



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

**ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ
ΑΠΟΦΑΣΕΩΝ**

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΠΟΦΑΣΕΩΝ ΚΑΙ ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ

**ΠΟΛΥΣΤΟΧΙΚΗ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ
ΚΛΙΜΑΤΙΚΩΝ ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΩΝ ΥΠΟ
ΑΒΕΒΑΙΟΤΗΤΑ**

Διδακτορική Διατριβή

της

Αικατερίνης Φορούλη

Επιβλέπων Καθηγητής: Αναπ. Καθ. Χρυσόστομος (Χάρης) Δούκας

Αθήνα 2022



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

**ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ
ΑΠΟΦΑΣΕΩΝ**

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΠΟΦΑΣΕΩΝ ΚΑΙ ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ

ΠΟΛΥΣΤΟΧΙΚΗ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΚΛΙΜΑΤΙΚΩΝ ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΩΝ ΥΠΟ ΑΒΕΒΑΙΟΤΗΤΑ

Διδακτορική Διατριβή

της

Αικατερίνης Φορούλη

Συμβουλευτική Επιτροπή:

Χ. Δούκας, Αναπλ. Καθηγητής Ε.Μ.Π. (επιβλέπων)

Ι. Ψαρράς, Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Δ. Ασκούνης, Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την επταμελή εξεταστική επιτροπή την: 21^η Ιουλίου 2022

.....
Χάρης Δούκας
Αναπλ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

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

.....
Ιωάννης Ψαρράς
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Αλέξανδρος Φλάμος
Καθηγητής ΠΑ.ΠΕΙ.

.....
Ευάγγελος Μαρινάκης
Επικ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Δημήτριος Ασκούνης
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Γρηγόριος Μέντζας
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα 2022

.....

Φορούλη Αικατερίνη

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

Copyright © Αικατερίνη Φορούλη, 2022

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 κλιματική αλλαγή και οι στόχοι που τίθενται από τις διεθνείς περιβαλλοντικές συσκέψεις σχετικά με την αντιμετώπισή της απαιτούν την ανάπτυξη και εφαρμογή μιας σειράς κλιματικών στρατηγικών οι οποίες προϋποθέτουν την κατάλληλη προσαρμογή των ανθρώπινων δραστηριοτήτων και αξιολογούνται όχι μόνο ως προς την αποτελεσματικότητά τους ως προς τη μείωση των επιπέδων των εκπεμπόμενων αερίων του θερμοκηπίου, αλλά και ως προς τις επιπτώσεις τους (θετικές ή αρνητικές) στην οικονομία και τις κοινωνικές δραστηριότητες σε εθνική και παγκόσμια κλίμακα. Παράλληλα, στην προσπάθεια χάραξης κλιματικής πολιτικής, οι ραγδαίες γεωπολιτικές, κοινωνικές, τεχνολογικές και επιστημονικές εξελίξεις αυξάνουν σε σημαντικό βαθμό την πολυπλοκότητα της λήψης απόφασης, ασκώντας σημαντική επιρροή στην αυξανόμενη αβεβαιότητα κατά τη διάρκεια της διαδικασίας αξιολόγησης των διαφορετικών παραμέτρων συστάσεων πολιτικών και δημιουργώντας την ανάγκη διαχείρισης του κινδύνου και της αβεβαιότητας προκειμένου να ληφθούν βιώσιμες και εύρωστες αποφάσεις.

Στην προσπάθεια αντιμετώπισης των παραπάνω προκλήσεων, η παρούσα διατριβή αναπτύσσει ένα ολοκληρωμένο πλαίσιο πολυστοχικής αξιολόγησης κλιματικών στρατηγικών υπό αβεβαιότητα, το οποίο επιτρέπει τη συμμετοχική εμπλοκή των εμπειρογνομόνων τόσο ως προς τη διαχείριση του κινδύνου, όσο και στην επιλογή της βέλτιστης εκ ενός συνόλου ευσταθών υποβέλτιστων λύσεων. Ξεκινώντας από την παρουσίαση των βασικών εννοιών και μεθόδων πολυστοχικής βελτιστοποίησης, επιλέγεται η κατηγορία των μεθόδων των περιορισμών και συγκεκριμένα η οικογένεια των μεθόδων Augmecon ως βάση για την ανάπτυξη ενός βελτιωμένου αλγορίθμου πολυστοχικού γραμμικού προγραμματισμού, ο οποίος επιτυγχάνει την παραγωγή του ακριβούς συνόλου των βέλτιστων λύσεων και επιτρέπει την αποτελεσματική επίλυση προβλημάτων με πολλά κριτήρια βελτιστοποίησης, και συγκεκριμένα στις περιπτώσεις μεγάλων προβλημάτων, δηλαδή σε προβλήματα όπου το εύρος των προς βελτιστοποίηση συναρτήσεων είναι μεγάλο. Λόγω της επίτευξης της αποτελεσματικής επίλυσης τέτοιων προβλημάτων εντός περιορισμένου χρόνου,

καθίσταται δυνατή η επαναληπτική επίλυση με σκοπό την αξιολόγηση της ευρωστίας των λύσεων μέσω στοχαστικών προσομοιώσεων. Ο βελτιωμένος αλγόριθμος πολυστοχικού προγραμματισμού ενσωματώνεται στη συνέχεια ως μέρος ενός ολοκληρωμένου εργαλείου επίλυσης προβλημάτων επιλογής βέλτιστων χαρτοφυλακίων κλιματικών στρατηγικών με ανάλυση αβεβαιότητας, με το οποίο καθίσταται εφικτός ο εύκολος χειρισμός των εισόδων του προβλήματος από τον εκάστοτε αποφασίζοντα, καθώς και η εποπτεία και ανάλυση των εξόδων με και χωρίς αβεβαιότητα, ώστε να διασφαλίζεται η διαφάνεια των δεδομένων και η ευρωστία των αποτελεσμάτων της επίλυσης.

Η αξία της προτεινόμενης πολυστοχικής επίλυσης ενισχύεται με τη σύνδεσή της με ευρέως χρησιμοποιούμενα εργαλεία για την χάραξη κλιματικής πολιτικής, όπως η μοντελοποίηση κλίματος- οικονομίας και η πολυκριτήρια ανάλυση, καθώς και με την πρόταση και εφαρμογή τριών πλαισίων διαχείρισης αβεβαιότητας εντός τριών κρίσιμων, πραγματικών προβλημάτων ενεργειακής και κλιματικής πολιτικής τα οποία διαφοροποιούνται ως προς: τα γεωγραφικά επίπεδα της ανάλυσης (τοπικό, εθνικό, περιφερειακό επίπεδο), την έννοια του χρόνου (ανάλυση σε βραχυπρόθεσμο και μεσοπρόθεσμο ορίζοντα), τον αριθμό των προς βελτιστοποίηση κριτηρίων και τους παράγοντες με βάση τους οποίους αυτά επιλέγονται (βελτιστοποίηση με βάση στόχους εξοικονόμησης, σχέση κόστους αποδοτικότητας, εμπλεκόμενου κινδύνου, με κριτήρια σχετικά με τους στόχους βιώσιμης ανάπτυξης που αφορούν την υγεία, τη δράση για το κλίμα και την πρόσβαση σε καθαρή, σύγχρονης μορφής ενέργεια και με κοινωνικά κριτήρια - δημιουργίας νέων θέσεων εργασίας), και τέλος το πλαίσιο ενσωμάτωσης αβεβαιότητας (ενσωμάτωση της έννοιας του κινδύνου και στοχαστικής αβεβαιότητας και προσομοίωση αβεβαιότητας υπό τη μορφή διαφορετικών κοινωνικοοικονομικών σεναρίων σε συνδυασμό με στοχαστική ανάλυση για την πρόταση ενός νέου σεναρίου μεταξύ διαφορετικών κοινωνικοοικονομικών μονοπατιών, στοχαστική προσομοίωση και ανάλυση μεταξύ των αποτελεσμάτων μοντελοποίησης τριών μοντέλων κλίματος - οικονομίας).

Λέξεις - κλειδιά: πολυστοχική βελτιστοποίηση, γραμμικός ακέραιος προγραμματισμός, μέθοδος περιορισμών, αβεβαιότητα, κλιματική πολιτική, υποστήριξη αποφάσεων, μοντέλα ολοκληρωμένης αποτίμησης

Abstract

Climate change and the objectives set by international climate change conferences on global climate action require the development and implementation of a range of climate strategies, which in turn imply the appropriate adaptation of human activities and are assessed not only in terms of their effectiveness in addressing climate change, but also in terms of their (positive or negative) economic and social impact on a national and global scale. At the same time, in the climate policy-making effort, rapid geopolitical, social, technological, and scientific developments significantly increase the complexity of decision-making, exerting increased uncertainties in the process of evaluating the different parameters in framing policy recommendations, and creating the need to assess related risks and uncertainties in order to make viable and robust decisions.

To address the above challenges, this dissertation develops an integrated framework for multi - objective optimization of climate strategies under uncertainty, which allows for the engagement of stakeholders both in terms of identifying and evaluating risks and in selecting the optimal out of a set of robust suboptimal solutions. Starting from the presentation of the basic concepts and methods of multi - objective optimization, the family of ϵ - constraint methods and in particular Augmecon methods are selected as the basis for the development of an improved multi - objective linear programming algorithm, which generates the exact set of optimal solutions and allows the efficient and timely solution of hard or practically impossible, in terms of time and processing requirements, problems of numerous objective functions. Due to the reduced solution times of the new algorithm, it becomes possible to iteratively solve them in order to evaluate the robustness of the solutions through stochastic simulations. The improved multi-objective programming algorithm is then integrated as part of a complete tool for solving problems of selecting optimal portfolios of climate strategies under uncertainty, which enables decision makers to easily manipulate the inputs of the problem, as well as analyze the outputs with and without uncertainty, ensuring data transparency and robustness of results.

The value of the proposed multi - objective optimization methodology is enhanced by its integration with widely used tools for climate policy making, such as climate-economy modelling and multi-criteria analysis, as well as by the proposal and application of three uncertainty management frameworks within three critical, real-world energy and climate policy problems that are differentiated in terms of: the geographical levels of analysis (local, national, regional), the examined time horizon (short- and medium-term analysis), the number and nature of objectives to be optimized (optimization based on energy savings targets, cost-effectiveness, related risk, optimization criteria connected to sustainable development goals related to health, climate action and access to clean, modern energy and social criteria, like job creation), and finally the uncertainty integration framework (risk integration within the evaluation, stochastic uncertainty, simulation of uncertainty in the form of different socio-economic scenarios combined with stochastic analysis to propose a new scenario between different socio-economic paths, stochastic simulation and analysis between the modelling results of three climate-economy models).

Keywords: multi – objective optimization, linear integer programming, ϵ -constraint method, uncertainty, climate policy, decision support, integrated assessment models;

Extended Abstract

Climate change and the objectives set by international climate change conferences on global climate action require the development and implementation of a range of climate strategies, which in turn imply the appropriate adaptation of human activities and are assessed not only in terms of their effectiveness in addressing climate change, but also in terms of their (positive or negative) economic and social impact on a national and global scale. At the same time, in the climate policy-making effort, rapid geopolitical, social, technological, and scientific developments significantly increase the complexity of decision-making, exerting increased uncertainties in the process of evaluating the different parameters in framing policy recommendations, and creating the need to assess related risks and uncertainties in order to make viable and robust decisions. To address the above challenges, this dissertation develops an integrated framework for multi - objective optimization of climate strategies under uncertainty, which allows for the engagement of stakeholders both in terms of identifying and evaluating risks and in selecting the optimal out of a set of robust suboptimal solutions.

Despite rapid technological advancements in software and hardware performance, many problems featuring numerous evaluation criteria (or objective functions), multiple constraints of different nature and hundreds to thousands of decision variables still remain challenging to solve. Several methods have been developed to solve multi-objective linear programming problems, each of which features strengths and weaknesses. Among these, the ϵ -constraint method, along with its variants, has been used in many applications and reported as a powerful way to solve multi-objective linear programming problems and preferred over competing techniques. Starting from the presentation of the basic concepts and methods of multi - objective optimization, the family of ϵ - constraint methods and in particular Augmecon methods are selected as the basis for the development of an improved multi - objective linear programming algorithm, which generates the exact set of optimal solutions and allows the efficient and timely solution of hard or practically impossible, in terms of time and processing requirements, problems of numerous objective functions. In particular, this thesis introduces AUGMECON-

R, a new powerful method for solving multi-objective linear programming problems, by drawing from the weaknesses of one of the most widely used improvements of the ϵ -constraint method, AUGMECON 2. These weaknesses can be summarised in the ineffective handling of the true nadir points of the objective functions and, most notably, in the significant amount of time required to apply it as more objective functions are added to a problem. Subsequently, AUGMECON-R is applied in comparison with its predecessor, in both a set of reference problems from the literature and a series of significantly more complex problems of four to six objective functions. Findings suggest that the proposed method greatly outperforms its predecessor, by solving significantly less models in emphatically less time and allowing easy and timely solution of hard or practically impossible, in terms of time and processing requirements, problems of numerous objective functions. AUGMECON-R, furthermore, solves the limitation of unknown nadir points, by using very low or zero-value lower bounds without increasing the time requirements; and enables solving non-integer multi-objective problems, as its capacity to solve integer problems in a very limited amount of time, compared to other approaches, allows for the transformation of any non-integer problem to an integer one, without surging the time and resources required.

Due to the reduced solution times of the new algorithm, it becomes possible to iteratively solve them in order to evaluate the robustness of the solutions through stochastic simulations. The improved multi-objective programming algorithm is then integrated as part of a complete tool for solving problems of selecting optimal portfolios of climate strategies under uncertainty, which enables decision makers to easily manipulate the inputs of the problem, as well as analyze the outputs with and without uncertainty, ensuring data transparency and robustness of results. For that, AUGMECON – R is implemented in Python so as to overcome the limitations of its predecessors regarding memory requirements, and to further extend the solution algorithm to ensure no efficient solution is left outside the solution grid. From a user interaction perspective and compared to AUGMECON-R implemented in GAMS, the Python implementation offers a diversity of additional libraries, and better opportunities for data pre- and post-processing as well as management and visualization of results. This way, the user can run the

model under different scenarios by flexibly altering the model's input data and choose between different data output formats to analyse the results. The proposed multi - objective optimization tool is used successfully to support low-carbon investment decisions and can be further used in fields where stochastic uncertainty is significant.

Furthermore, the value of the proposed multi - objective optimization methodology is enhanced by its integration with widely used tools for climate policy making, such as climate-economy modelling and multi-criteria analysis, as well as by the proposal and application of three uncertainty management frameworks within three critical, real-world energy and climate policy problems that are differentiated in terms of: the geographical levels of analysis (local, national, regional), the examined time horizon (short- and medium-term analysis), the number and nature of objectives to be optimized (optimization based on energy savings targets, cost-effectiveness, related risk, optimization criteria connected to sustainable development goals related to health, climate action and access to clean, modern energy and social criteria, like job creation), and finally the uncertainty integration framework (risk integration within the evaluation, stochastic uncertainty, simulation of uncertainty in the form of different socio-economic scenarios combined with stochastic analysis to propose a new scenario between different socio-economic paths, stochastic simulation and analysis between the modelling results of three climate-economy models).

The first application presented in the thesis introduces a risk-oriented optimisation model to support the optimal allocation of budget to energy efficiency measures, with a view to achieving the 2020 Greek national targets. The trans-disciplinary methodological framework initially builds on the Energy Efficiency Action Plans for Greece and involves stakeholder engagement, multiple-criteria decision making and multi - objective optimization for policy portfolios evaluation. The evaluation of the policy instruments is based on two criteria, namely energy savings and implementation risk, under a set of technical and financial constraints. Uncertainty complicating the decision process is addressed by both taking into account the implementation risks and further assessing the stochastic uncertainty inherent in the model parameters. In a further step, the

robustness of both the optimal policy portfolios and the individual policies composing these portfolios is assessed. This approach provides policymakers with a supplementary tool to guide and support their final decision, by giving additional fruitful information on the optimal solutions, i.e. the robustness of the resulting portfolios and instruments against perturbations in the model's parameters. Results show that, considering the available budget and the technical constraints associated with the examined energy efficiency actions, the national energy savings target for the period 2018-2020 cannot be achieved; therefore, either a broader set of more cost-effective and robust measures should be considered for implementation, or funds from and collaborations with the private sector must be secured. For the set of instruments considered, policy portfolios achieving savings greater than 1,000 kTOE are furthermore more susceptible to perturbations of the model's parameters and, therefore, feature significant levels of uncertainty over the actual savings they can achieve. Among the available policy instruments, the most effective and robust selection includes one instrument per sector of interest: a financial program for energy upgrades of buildings in the residential sector; an action oriented on energy efficiency and demonstration projects in the private services sector, and specifically small and medium-sized enterprises; and a policy focusing on appointing energy managers and implementing action plans in the broader public built environment. Considering both the expected savings and the implementation risk levels associated with them, these appear to be the most robust policy instruments. These are, then, followed by street lights and pump stations retrofitting, as well as actions oriented on promoting behavioral change in the residential sector through promotion and dissemination activities regarding energy performance certificates. Another important finding is that considering the vulnerability of each policy instrument, against barriers hindering its successful implementation, significantly changes the modelling outcomes. It is noteworthy that, despite their expected contributions to energy efficiency, only one of the highly risky policy instruments, namely appointing energy managers and implementing action plans in public buildings, is eventually considered in the resulting optimal portfolios. Finally, the multi-objective nature of the modelling process provided the policymakers with the flexibility to select among numerous near-optimal portfolios, enabling them to eventually select the course of action

that is in line with both their risk aversion levels and other political constraints and preferences.

The second application introduces a two-level integration of climate-economy modelling and multi - objective optimization, to simulate technological subsidization with implications for multiple Sustainable Development Goals (SDGs), across socioeconomic trajectories and considering different levels of uncertainties. In particular, the first goal of this study is to create an efficient scientific workflow and a two-way technical integration of integrated assessment modelling and portfolio optimization outcomes. To this end, at first, future policy under policy-relevant socioeconomic scenarios are simulated, such as the Shared Socioeconomic Pathways (SSPs). The Global Change Assessment Model (GCAM) is used as the implementation integrated assessment model. The outputs from each policy scenario are translated into progress parameters relevant to three SDGs of the United Nations' 2030 Agenda for Sustainable Development and fed into a PA model. These parameters include air pollution-related mortality (SDG3), access to clean energy (SDG7) and greenhouse gas emissions (SDG13). The optimization problem formulation is run for selecting the optimal combinations of subsidy levels for six technologies, which simultaneously maximize progress in each of the selected SDGs. This is the first step of IAM-optimization model integration. Moreover, acknowledging that uncertainty is widely accepted to be pervasive in any attempt to manage and understand environmental problems, a robustness analysis is incorporated in the proposed framework. Depending on the discipline and context of application, uncertainty of data or model components can be interpreted in different ways, varying from measures of performance, bounds, alternative scenarios or probability distributions. In this approach, the propagation of uncertainties through the integrated models involves determining the effect on the output of changes in the inputs and is expressed stochastically, by means of a probability distribution, and deterministically, with the use of scenarios. Probabilistic uncertainty is incorporated in the optimization model to find robust Pareto-optimal portfolios of technologies in each of SSPs. Deterministic uncertainty, referring to specific scenarios with clearly determined datasets, is used to assess the robustness of the modelling results across different

socioeconomic pathways and timescales. This is done primarily by using different SSPs, which represent epistemic uncertainty but constitute reference single futures of deterministic nature, on which modelling exercises anchor to cover a broad spectrum of possible future socioeconomic states of the world. The second goal of this paper is to simulate an “SSP robustness” scenario, by defining SSP-based uncertainty bounds as boundaries for robustness and simulate probabilistic uncertainty among the socioeconomic pathways. Results of the “SSP robustness” scenario are compared with results of the distinct socioeconomic pathways analysis. The second step of IAM-optimization model integration is achieved by feeding the optimization results back to GCAM. The SSP-robust subsidy portfolios are re-run in the GCAM model with each SSP, to check whether portfolios that are found to be robust to SSP-based uncertainty are also translated to more homogeneity between the SSPs with respect to the portfolio’s impact on SDG progress. The identification of technological portfolios that are robust among the different SSPs can be helpful for stakeholders to make decisions and formulate policies that will be optimal, independently of the realization of different SSPs in the future, providing a useful tool to handle SSP-based uncertainty. A multiple-uncertainty analysis framework for integrated assessment modelling of several sustainable development goals is applied in a case study for Eastern Africa. Specifically, three different SSP datasets have been modelled in GCAM for the purposes of a case study focusing on twelve Eastern African countries, aggregated and assessed as one region. These datasets include SSP 2 (‘Middle of the Road’), SSP 3 (‘Regional Rivalry’) and SSP 5 (‘Fossil-fuelled Development’). The candidate actions are six technological subsidisation pathways revolving around liquefied petroleum gas (LPG), photovoltaics (PV), biogas, ethanol, charcoal and fuelwood, i.e. technologies likely to be adopted in the twelve developing countries of Eastern Africa (based on their action pledges, as reflected in their Nationally Determined Contributions), while contributing to the three predefined SDGs. The GCAM-generated parameters for the three SDGs showcase the contribution of each technology pathway to each of the objective functions under twenty subsidy levels. For each of the four major optimisation problems different time frames are applied and results for the years 2020, 2030 and 2040 are extracted. The budget constraint starts from \$3.5 billion (USD at 2015 values) in 2020 and increases by

5% per year until 2030 and 2040. Results on the cost-effectiveness of technology subsidies for SDG progress show that subsidies for biogas systems are the most cost-effective for each of the indicators, scenarios and years. On the contrary, subsidies for fuelwood pathways are only reasonably cost-effective in the short-term. For charcoal pathways, we observe that cost effectiveness is highly dependent on the invested subsidies. When examining progress on the different timescales we see that more subsidies are required for achieving the same impact in the long-term, at least for energy access and premature mortality indicators. In addition, in the medium- and long-term, technologies like fuelwood, charcoal and ethanol show an even negative impact for the examined subsidies. Between the different SSPs, cost-effectiveness remains in the same levels for each technology, with some differences observed in the short-term for biogas and the GHG emissions indicator, as well as on charcoal for reducing GHG emissions in the medium- and long-term. Overall, more subsidies are required to achieve a positive impact in the three SDGs when SSP 5 is realised. Generally, we notice that depending on the scenario and the point in time, some technology pathways are more cost-effective than others for a specific SDG and some result in negative outcomes. Thus, the need to identify technological portfolios that are both Pareto-optimal in terms of contributing simultaneously to the three SDGs and, most importantly, robust among the different scenarios is more than prominent. For the differences on technological performance among the SSPs it is observed that SSP 2 can prove more progress-friendly in achieving the three SDGs in the short-term, among all different socioeconomic pathways. In the medium- and long-term, SSP 3 leads to better results for the energy access and health criteria, while for the goal of reducing emissions, SSP 2 performs better. SSP 5 features the lowest contribution to the optimisation objectives for all considered time scales, which is fairly consistent with its intended narrative. SSP5 is characterised by higher incomes and urbanisation, which increase access to high-quality energy sources, such as LPG, even without subsidisation. Due to this more “positive” counterfactual, technology subsidisation in SSP5 is found less cost-effective. On the participation of the technologies on the robust optimal solutions, and consistent with the analysis on the cost-effectiveness of the technology subsidies, biogas is the technology with the higher participation in the robust portfolios. This

is evident across the different SSPs and timescales. The use of LPG and PV systems also have a high contribution to progress in the three SDGs. Charcoal kilns, and ethanol technologies reach their maximum potential, which though corresponds to a much lower subsidy and impact level compared to LPG, PV and biogas. Fuelwood is the least attractive technology. Also in this study, the SSPs are assumed as an uncertain set of conditions that affect the performance of every technological subsidy policy and we focus on how the realisation of the different SSPs will ultimately affect the participation of technologies in the robust portfolios. For the year 2020, technologies show a stable share of participation in the robust portfolios. In 2030, a high increase in the contribution of ethanol is observed for SSP 5, where ethanol is subsidised up to 11%, in contrast to SSPs 2 and 3 where subsidisation for ethanol is less than 2%. The realisation of different SSPs has on overall a bigger effect on SDG progress in 2040.

In the third application, three energy-economy models are combined with portfolio analysis to estimate the emissions and employment benefits of a potential allocation of announced recovery packages towards clean energy projects, in six major emitting regions: Canada, China, EU, India, Japan, and USA. It is true that the pandemic has posed significant challenges to human societies, beyond public health: following drastic policy responses to curb virus spread, economic activities forcefully paused. This, in turn, resulted in an impending economic recession with multiple socioeconomic implications, including for the labour market. In literature, there are positive indications that a transition from fossils to renewables typically creates net jobs, after accounting for workforce redistribution among sectors. Recent work has showcased large employment gains from a complete shift to a fully-renewable power sector, even more so for combined efforts in heat, transport, and desalination, while broader Paris-compliant mitigation pathways show similar findings for energy-sector employment. However, evidence on COVID-19 and associated recovery efforts is still scarce. In this respect, macroeconomic and integrated assessment models (IAMs) have been used to assess the pandemic's emissions and macroeconomic impacts, as well as its medium-to-long-term implications for the energy transition and the goals of the Paris Agreement. However, of these studies, only one

considered employment implications from a macro econometric perspective and, like similar macroeconomic modelling studies, provided only aggregated economy-wide insights. The extent to which green investments as part of the recovery stimulus can contribute to both mitigation and energy-sector employment gains remains understudied. Within this framework, the third application of this thesis investigates the optimal allocation of announced recovery packages towards clean energy projects in six major economies (Canada, China, EU, India, Japan, and USA), in terms of further emissions cuts and employment gains against a pre-pandemic current-policy baseline, by overcoming three associated challenges. First, acknowledging IAM analyses are highly dependent on the model used and the underlying economic-engineering approach, a diverse ensemble of three well-established IAMs (GCAM, TIAM, GEMINI-E3) is employed to understand how each modelling approach affects outcomes. Second, building on recent efforts, these IAMs are linked with employment factor databases that provide the necessary granularity for targeted technology interventions, to address criticisms on model representation of energy–economy feedbacks and employment considerations. Third, since IAMs typically only optimize costs in respect to emissions constraints, these are integrated with an optimization model to economically integrate and simultaneously optimize emissions cuts with near- and long-term employment gains. In particular, IAM results are fed into a multi-objective optimization model, with a view to maximizing the returns of the assumed ‘green’ part of COVID-19 recovery fiscal programs, expected to be allocated towards the ten technologies considered, in terms of new employment created in the energy sector and of further CO₂ emissions cuts. Three different objective functions are defined. The first objective revolves around further reducing CO₂ emissions; 2030 is used as a time horizon for this objective, considering that 2030 is a milestone year in NDCs. The second objective lies in creating new energy-sector jobs; assuming policymakers seek to maximize immediate returns on recovery funds spent in the next five years, 2025 is used as a time horizon for this objective. However, aside from differences across the six regions given their domestic resources and manufacturing capacity, different projects imply different allocations of new jobs along the project pipelines; a key question, therefore, is whether new jobs created

in the near-term (2025) by subsidies in the considered technologies can be sustained in the longer run. As a result, a third objective is defined, which is maximizing new employment gains by the end of the decade. In summary, the portfolio optimization process seeks to optimize emissions cuts by 2030, employment gains by 2025, and employment gains by 2030 simultaneously. The optimization process is based on the Python implementation of the AUGMECON-R algorithm, improved to optimally allocate the objective functions within the nested loops of the algorithm towards capturing all solutions, thereby considerably reducing execution time. Finally, to increase confidence in the resulting optimal technological subsidization portfolios, it is assumed that the outputs of IAMs (CO₂ emissions cuts as well as both near-term and long-term employment gains per subsidy level of each technology for each region) feature uncertainty. 100 Monte Carlo simulations are employed for each portfolio optimization problem, carried out in a $\pm 5\%$ range. 'Robustness' is defined as the number of times a subsidization portfolio is found optimal (i.e., as part of the Pareto front) among the 100 Monte Carlo simulations. In other words, if a specific budget allocation is found optimal in n simulations, then the robustness of this portfolio is $n\%$. Despite trade-offs and regional differences, the study finds potential technology portfolios that both reduce emissions and increase employment across all regions and models. While for some economies (EU, China, Japan, and Canada) such packages will likely provide good progress towards either or both objectives, for other economies (USA and India) they clearly fall short. The progress in emissions abatement falls short of 2°C-compatible pathways, contradicting effective green recovery IAM scenarios published before the extent of green recovery packages was announced. However, the main reason for that is the green share in total recovery funds being much smaller than assumed in those studies; at the same time, our analysis only focused on the power and biofuel sectors. Another important difference between this study and earlier IAM studies is that we projected the impact of recovery funds on top of an existing current policy trajectory. In contrast, earlier studies defined the investment gap by looking at differences in low-carbon investments between pre-existing reference and Paris-compliant scenarios, without taking interactions between existing policies and public incentives into account. In terms of employment, the

structure of the impact in most countries is more focused on short-term employment gains relative to other studies, while the absolute impact is hard to compare due to strong differences in assumed recovery package sizes. This study suggests that, in optimal packages, most countries would invest over 50% of their energy-focused green recovery packages in financing PV, over 10% in onshore wind, while investments in other clean energy technologies strongly depend on the country, preferred objective, and model applied. However, a mix of supply problems and quickly recovered demand (in part due to post-COVID stimulus measures) has caused a strong increase in prices for many materials over the course of 2021, affecting costs of PV and wind projects throughout the world by 16-70% and 10-25%, respectively. This inflationary impact of recovery policies is not taken into account in this analysis and the lack of material and supply-chain representation is a weakness in many IAMs that are used in these types of analyses. The three models applied in this study have significantly different features and solution mechanisms, which causes a wide spread in outcomes. In fact, for most countries analysed, emissions reductions and employment gains depend more on the model applied than on the objective priority on the Pareto front of optimal support packages. For example, the GCAM portfolio with most emissions reductions in China shows lower reductions than the GEMINI-E3 portfolio with lowest emissions reductions, and similarly when comparing GEMINI-E3 with TIAM. The most important reasons behind these strong differences are the solution mechanisms, which affect the effectiveness of each additional dollar of support in a specific technology, and the way technology dispatch in the electricity market is modelled—e.g., with constant or flexible capacity factors. Since none of the models can be objectively classified as better or worse for these types of analyses, model diversity should be seen as an important prerequisite to capturing the entire solution space of a specified research question, while a lack of such diversity may give a false sense of precision.

Ευχαριστίες

Η διδακτορική διατριβή εκπονήθηκε στο Εργαστήριο Συστημάτων Αποφάσεων και Διοίκησης της Σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Εθνικού Μετσοβίου Πολυτεχνείου, το διάστημα Σεπτέμβριος 2016–Ιούλιος 2022.

Φτάνοντας στο τέλος αυτής της προσπάθειας θα ήθελα να ευχαριστήσω τους ανθρώπους που συνέβαλλαν στην πραγματοποίησή της.

Η διατριβή πραγματοποιήθηκε υπό την επίβλεψη, συνεχή παρακολούθηση και καθοδήγηση του Αν. Καθηγητή κ. Χάρη Δούκα, τον οποίο θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά, καταρχάς για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε με την ανάθεση του συγκεκριμένου θέματος και επιπροσθέτως για την άριστη συνεργασία που είχαμε όλα αυτά τα χρόνια. Η συνεργασία με τον κ. Δούκα αποτέλεσε για εμένα σημαντική εμπειρία και υπήρξε καθοριστική στη διαμόρφωση του τρόπου σκέψης και εργασίας μου, τόσο σε ακαδημαϊκό, όσο και σε επαγγελματικό επίπεδο. Παράλληλα θα ήθελα να εκφράσω τις θερμότερες ευχαριστίες μου στον Καθηγητή και διευθυντή του εργαστηρίου Συστημάτων Αποφάσεων και Διοίκησης ΕΜΠ, κ. Ιωάννη Ψαρρά για τη διαρκή εμπιστοσύνη και ενθάρρυνση στο έργο μου.

Ακόμη, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους Καθηγητές κ.κ. Δημήτριο Ασκούνη και Αλέξανδρο Φλάμο για την ερευνητική μας συνεργασία και τη συμμετοχή τους στη συμβουλευτική και πενταμελή επιτροπή της διατριβής, καθώς επίσης και τους Καθηγητές κ.κ., Βασίλη Ασημακόπουλο, Γρηγόριο Μέντζα και τον Επ. Καθηγητή κ. Ευάγγελο Μαρινάκη για την τιμή που μου έκαναν να είναι μέλη της επταμελούς επιτροπής καθοδήγησης και αξιολόγησης της διδακτορικής διατριβής.

Η διατριβή αυτή δε θα μπορούσε να είχε ολοκληρωθεί χωρίς τη στήριξη και ουσιαστική συνεισφορά του Διδάκτορα του Εργαστηρίου Συστημάτων Αποφάσεων και Διοίκησης ΕΜΠ, Αλέξανδρου Νίκα. Σε επαγγελματικό επίπεδο, η ποιότητα του επιστημονικού έργου και η ξεχωριστή ικανότητα διαχείρισης ομάδων που διαθέτει ο Αλέξανδρος, και σε προσωπικό επίπεδο, ο ευχάριστος χαρακτήρας του και η προθυμία για βοήθεια, καθιστούν τον Αλέξανδρο ένα ξεχωριστό συνεργάτη και φίλο, τον οποίο αισθάνομαι πραγματικά τυχερή που συνάντησα.

Ταυτόχρονα θα ήθελα να ευχαριστήσω τον διπλωματούχο της Σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Ηλεκτρονικών Υπολογιστών Ά. Φουντουλάκη και τους απόφοιτους του μεταπτυχιακού προγράμματος «Τεχνοοικονομικά Συστήματα», Β. Παπακωνσταντίνου, Ε. Αλεξανδρίδη και Α.

Παγώνη, οι οποίοι με την εκπόνηση των διπλωματικών και μεταπτυχιακών τους εργασιών συνέβαλλαν σημαντικά στην υλοποίηση της παρούσας διατριβής.

Οφείλω επίσης ευχαριστώ σε όλη την οικογένεια του Εργαστηρίου για το φιλικό κλίμα και ευχάριστο περιβάλλον που δημιούργησαν, για τις συμβουλές και την αγάπη τους, και ειδικά στους Χαρά και Κατερίνα, Κωνσταντίνο, Θέμη και Γιώργο, Αποστόλη και Λευτέρη για τη μεταξύ μας συνεργασία, στους Παναγιώτη, Ράνια, Σπύρο, Αριάδνη, Χρήστο, Ελένη, Ευμορφία και Κώστα για την όμορφη παρέα, καθώς και στις Ξανθή και Μάρω για τη σημαντική βοήθειά τους σε όλα τα θέματα γραμματειακής υποστήριξης.

Έπειτα, από τη θέση αυτή θα ήθελα να εκφράσω θερμές ευχαριστίες στους γονείς μου και στα αδέρφια μου για την αγάπη τους, στους ανθρώπους που με μεγάλωσαν και μου έμαθαν τις αξίες της προσπάθειας, επιμονής και ειλικρίνειας και στην οικογένεια του Αχιλλείου για τις χαρές που συνεχίζουν να μου δίνουν. Τέλος, ένα μεγάλο ευχαριστώ οφείλω στους φίλους και φίλες μου Παναγιώτη, Μιχάλη, Κωνσταντίνα και Ανθή για την ανταπόκριση στους προβληματισμούς μου, την πίστη τους σε εμένα και τις όμορφες στιγμές που μοιραζόμαστε παρέα.

Κατερίνα Φορούλη

Περιεχόμενα

| | |
|---|-----------|
| Περίληψη..... | 5 |
| Abstract | 7 |
| Extended Abstract | 9 |
| Ευχαριστίες | 20 |
| 1 Εισαγωγή..... | 27 |
| 1.1 Περιγραφή Προβλήματος..... | 27 |
| 1.2 Σκοπός τόμου και αντικείμενο διατριβής | 31 |
| 1.3 Συμβολή διατριβής..... | 32 |
| 1.4 Δομή Διατριβής..... | 36 |
| 2 Επισκόπηση σχετιζόμενων μεθόδων πολυστοχικής βελτιστοποίησης | 39 |
| 2.1 Εισαγωγή | 39 |
| 2.1.1 Διατύπωση του προβλήματος βελτιστοποίησης | 39 |
| 2.1.2 Η αξία της πολυστοχικής βελτιστοποίησης | 43 |
| 2.1.3 Βασικές αρχές πολυστοχικής βελτιστοποίησης | 48 |
| 2.2 Βιβλιογραφική ανασκόπηση πολυστοχικών μεθόδων βελτιστοποίησης με βάση το στάδιο εμπλοκής του αποφασίζοντα..... | 63 |
| 2.2.1 Έκφραση προτίμησης πριν την έναρξη διαδικασίας επίλυσης (<i>a priori</i>)..... | 64 |
| 2.2.2 Έκφραση προτίμησης κατά τη διάρκεια της διαδικασίας επίλυσης (<i>interactive</i>)..... | 70 |
| 2.2.3 Έκφραση προτίμησης μετά το τέλος της διαδικασίας επίλυσης (<i>a posteriori</i>) 72 | |
| 3 Μέθοδοι της οικογένειας της μεθόδου των περιορισμών..... | 87 |
| 3.1 Η μέθοδος <i>ε-constraint</i> (Μέθοδος των περιορισμών)..... | 87 |

| | | |
|----------|--|------------|
| 3.2 | Η μέθοδος AUGMECON (Augmented ϵ -constraint) | 91 |
| 3.2.1 | <i>Αλγοριθμική υλοποίηση της μεθόδου AUGMECON</i> | 100 |
| 3.3 | Η μέθοδος AUGMECON 2 | 105 |
| 3.4 | Η AUGMECON 2 στον ακέραιο πολυκριτηριακό προγραμματισμό..... | 111 |
| 3.5 | Συγκριτική ανάλυση μεταξύ των AUGMECON και AUGMECON 2 | 113 |
| 3.6 | Συγκριτική ανάλυση AUGMECON 2 και άλλων αλγορίθμων | 117 |
| 3.7 | Βιβλιογραφική επισκόπηση εφαρμογών και εργασιών βελτίωσης της μεθόδου AUGMECON..... | 119 |
| 4 | Προτεινόμενος αλγόριθμος πολυστοχικής βελτιστοποίησης | 128 |
| 4.1 | Αδυναμίες της AUGMECON 2 | 128 |
| 4.2 | Διερεύνηση εναλλακτικών προσεγγίσεων βελτίωσης της μεθόδου AUGMECON 2..... | 132 |
| 4.3 | Η μέθοδος AUGMECON - R | 140 |
| 4.4 | Επεξήγηση της μεθόδου AUGMECON – R μέσω παραδείγματος | 143 |
| 4.5 | Αλγοριθμική υλοποίηση της AUGMECON - R..... | 155 |
| 4.6 | Συγκριτική ανάλυση μεθόδων AUGMECON – 2 & AUGMECON – R..... | 166 |
| 4.6.1 | <i>Συγκριτική ανάλυση επί των προβλημάτων αναφοράς</i> | 166 |
| 4.6.2 | <i>Συγκριτική ανάλυση σύνθετων προβλημάτων πολυστοχικής βελτιστοποίησης</i> 169 | |
| 4.7 | Συμπεράσματα..... | 177 |
| 5 | Ένταξη αλγορίθμου AUGMECON – R σε ολοκληρωμένο εργαλείο πολυστοχικής βελτιστοποίησης υπό αβεβαιότητα..... | 180 |
| 5.1 | Εισαγωγή | 180 |
| 5.2 | Επέκταση της μεθόδου AUGMECON – R και υλοποίηση σε περιβάλλον python | 182 |
| 5.2.1 | <i>Υλοποίηση του αλγορίθμου επίλυσης της βελτιστοποίησης</i> | 183 |
| 5.2.2 | <i>Υπολογισμός απόδοσης βελτιωμένου αλγορίθμου επί των σύνθετων προβλημάτων αναφοράς</i> | 185 |
| 5.3 | Χειρισμός δεδομένων εισόδου | 186 |

| | | |
|----------|--|------------|
| 5.4 | Παρουσίαση των λύσεων και χειρισμός αβεβαιότητας | 188 |
| 5.5 | Συμπεράσματα..... | 190 |
| 6 | Πολυστοχικό μοντέλο ανάλυσης χαρτοφυλακίου με αξιολόγηση κινδύνου και ανάλυση ευρωστίας για την προώθηση της ενεργειακής αποδοτικότητας στην Ελλάδα..... | 191 |
| 6.1 | Εισαγωγή | 191 |
| 6.2 | Μέθοδοι και Μοντέλα..... | 199 |
| 6.2.1 | Συγκέντρωση δεδομένων για τα υπό εξέταση μέτρα πολιτικής | 205 |
| 6.2.2 | Ανάλυση Χαρτοφυλακίου με τη μέθοδο AUGMECON 2..... | 207 |
| 6.2.3 | Προτεινόμενο πλαίσιο ανάλυσης αβεβαιότητας..... | 213 |
| 6.3 | Αποτελέσματα..... | 219 |
| 6.3.1 | Αποτελέσματα πολυκριτηριακής ανάλυσης ρίσκου..... | 219 |
| 6.3.2 | Αποτελέσματα μοντέλου ανάλυσης χαρτοφυλακίου..... | 223 |
| 6.3.3 | Αποτελέσματα με ενσωμάτωση αβεβαιότητας..... | 229 |
| 6.4 | Συμπεράσματα..... | 232 |
| 7 | Πρόταση ολοκληρωμένου πλαισίου ανάλυσης αβεβαιότητας υπό διαφορετικά κοινωνικοοικονομικά σενάρια για τον προσδιορισμό βέλτιστων χαρτοφυλακίων ενεργειακών τεχνολογιών στην ανατολική Αφρική στο πλαίσιο επίτευξης των Στόχων Βιώσιμης Ανάπτυξης. | 236 |
| 7.1 | Εισαγωγή | 236 |
| 7.2 | Μέθοδοι και μοντέλα..... | 245 |
| 7.2.1 | Περιγραφή σεναρίων..... | 250 |
| 7.2.2 | Ανάλυση Χαρτοφυλακίου με τη Μέθοδο AUGMECON 2..... | 263 |
| 7.2.3 | Προτεινόμενο πλαίσιο ανάλυσης αβεβαιότητας..... | 266 |
| 7.3 | Αποτελέσματα..... | 271 |
| 7.3.1 | Οικονομική αποδοτικότητα επιδοτήσεων στους ΣΒΑ..... | 271 |
| 7.3.2 | Προσδιορισμός βέλτιστων χαρτοφυλακίων – μελέτη ευστάθειας σε επίπεδο SSPs | 277 |

| | | |
|----------|---|------------|
| 7.3.3 | Προσδιορισμός βέλτιστων και ευσταθών χαρτοφυλακίων στο μέσο κοινωνικοοικονομικό σενάριο | 280 |
| 7.3.4 | Συμμετοχή τεχνολογιών στα πιο ευσταθή χαρτοφυλάκια..... | 282 |
| 7.4 | Συμπεράσματα..... | 286 |
| 8 | Εφαρμογή βελτιωμένου αλγορίθμου πολυστοχικής βελτιστοποίησης και ολοκλήρωση με MOA για τη μεγιστοποίηση των κλιματικών και κοινωνικών ωφελειών των πακέτων ανάκαμψης από τον COVID-19 | 290 |
| 8.1 | Εισαγωγή | 290 |
| 8.2 | Μέθοδοι και Μοντέλα..... | 295 |
| 8.2.1 | Περιγραφή MOA και ορισμός σεναρίου αναφοράς..... | 298 |
| 8.2.2 | Επιλεγμένα μέγιστα επίπεδα επιδότησης | 301 |
| 8.2.3 | Υπολογισμός δεικτών απασχόλησης..... | 303 |
| 8.2.4 | Πολυστοχική ανάλυση χαρτοφυλακίου υπό αβεβαιότητα με τη μέθοδο AUGMECON - R..... | 305 |
| 8.3 | Αποτελέσματα..... | 307 |
| 8.3.1 | Επιρροή των πακέτων ανάκαμψης στις δυναμικές των τριών στόχων βελτιστοποίησης..... | 307 |
| 8.3.2 | Προσδιορισμός βέλτιστων τεχνολογιών για κάθε γεωγραφική περιοχή και MOA | 310 |
| 8.3.3 | Ο ρόλος των διαφορετικών μοντέλων στα αποτελέσματα κατανομής της οικονομικής επιδότησης..... | 312 |
| 8.4 | Συμπεράσματα..... | 316 |
| 9 | Συμπεράσματα και προοπτικές..... | 319 |
| | Βιβλιογραφία..... | 326 |
| | Παράρτημα 1 | 369 |
| | Άρθρα σε έγκριτα επιστημονικά περιοδικά | 369 |
| | Κεφάλαια σε διεθνή επιστημονικά βιβλία | 370 |
| | Ανακοινώσεις σε επιστημονικά συνέδρια..... | 370 |
| | Πρόσθετες δημοσιεύσεις | 372 |

| | |
|--|------------|
| Παράρτημα 2 | 373 |
| Δεδομένα προβλήματος 4kr40 | 373 |
| Δεδομένα προβλήματος 4kr50 | 375 |
| Δεδομένα προβλήματος 5kr40 | 378 |
| Δεδομένα προβλήματος 6kr50 | 380 |
| Παράρτημα 3 | 383 |
| Υλοποίηση του αλγορίθμου επίλυσης της βελτιστοποίησης AUGMECON - R | 383 |
| Παράρτημα 4 | 392 |
| Χειρισμός εισόδων του εργαλείου πολυστοχικής βελτιστοποίησης..... | 392 |
| Παράρτημα 5 | 397 |
| Χειρισμός εξόδων του εργαλείου πολυστοχικής βελτιστοποίησης..... | 397 |
| Παράρτημα 6 | 406 |
| Συμπληρωματικά δεδομένα εισόδου Κεφαλαίου 8..... | 406 |

Κεφάλαιο 1

1 Εισαγωγή

1.1 Περιγραφή Προβλήματος

Η κλιματική αλλαγή αποτελεί τη μεγαλύτερη πρόκληση της εποχής μας, ταυτόχρονα, όμως, αποτελεί ευκαιρία για την οικοδόμηση ενός νέου, βιώσιμου περιβαλλοντικά, κοινωνικά και οικονομικά, αναπτυξιακού μοντέλου. Στα πλαίσια της κλιματικής δράσης, ιστορικό ορόσημο αποτελεί η Συμφωνία του Παρισιού του 2015, η οποία συγκροτεί την πρώτη πολυμερή συμφωνία για την κλιματική αλλαγή που καλύπτει το σύνολο σχεδόν των παγκόσμιων εκπομπών. Η Συμφωνία καθόρισε έναν μακροπρόθεσμο στόχο περιορισμού της αύξησης της θερμοκρασίας σε λιγότερο από 2°C σε σύγκριση με τα προ-βιομηχανικά επίπεδα – και δεσμεύει για συνέχιση της προσπάθειας για περιορισμό της αύξησης της θερμοκρασίας σε 1,5°C. Για την ενίσχυση των φιλόδοξων στόχων με την πάροδο του χρόνου, προβλέπεται ένας δυναμικός μηχανισμός απολογισμού με βάση τον οποίο τα μέρη θα συναντώνται ανά πενταετία σε έναν «παγκόσμιο απολογισμό» για να εξετάσουν την πρόοδο όσον αφορά τη μείωση των εκπομπών, την προσαρμογή και την στήριξη που παρέχεται και λαμβάνεται εν όψει των μακροπρόθεσμων στόχων της Συμφωνίας (UNFCCC, 2016). Ο εν λόγω περιοδικός μηχανισμός δεσμεύσεων συγκέντρωσε από την αρχή ανησυχίες σχετικά με την αποτελεσματικότητά του (Kemp, 2018) και κρίθηκε συχνά ως ανεπαρκής για τον έγκαιρο μετριασμό της κλιματικής αλλαγής καθώς και ασυνεπής σε όρους δικαιοσύνης για όλα τα συμμετέχοντα μέρη (Falkner, 2016). Σε αυτό το πλαίσιο, η πρόσφατη σύνοδος της Γλασκόβης (UNFCCC, 2021), αναγνώρισε ότι οι δεσμεύσεις που έχουν αναλάβει οι χώρες μέχρι στιγμής ως προς τη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου δεν είναι αρκετές ώστε να επιτευχθεί ο στόχος αύξησης της θερμοκρασίας το πολύ κατά 1,5 βαθμό Κελσίου πάνω από τα

προβιομηχανικά επίπεδα, και οι κυβερνήσεις κλήθηκαν να ενισχύσουν τις προσπάθειές τους έως το τέλος του έτους (2022) και όχι κάθε πέντε χρόνια, όπως απαιτούνταν προηγουμένως. Μη παραβλέποντας τις σημαντικές προκλήσεις που φέρει η Συμφωνία του Παρισιού (Peters, 2016), στις σημαντικότερες διαστάσεις της Συμφωνίας τοποθετείται ο ορισμός μια σαφούς κατεύθυνσης σε όλους τους ενδιαφερομένους, τους επενδυτές, τις επιχειρήσεις, την κοινωνία των πολιτών και τους αρμόδιους για τη χάραξη πολιτικής, η οποία στοχεύει προς την παγκόσμια μετάβαση προς την καθαρή ενέργεια και ως εκ τούτου στη μετατόπιση των πόρων μακριά από τα ορυκτά καύσιμα. Η μετάβαση σε καθαρές πηγές ενέργειας παγκοσμίως θα απαιτήσει αλλαγές στην επιχειρηματική και επενδυτική συμπεριφορά και παροχή κινήτρων σε ολόκληρο το φάσμα πολιτικών, οι οποίες είναι απαραίτητο να διαμορφωθούν με γνώμονα την Ατζέντα του 2030 για τη βιώσιμη ανάπτυξη.

Σε επίπεδο Ευρωπαϊκής Ένωσης (ΕΕ), η ΕΕ έγινε η πρώτη μεγάλη οικονομία που παρουσίασε το σχέδιό της για το κλίμα (δηλαδή τις εθνικά καθορισμένες προθέσεις συνεισφοράς ή «INDC») στις 6 Μαρτίου 2015, γεγονός που αντανακλά το πλαίσιο πολιτικής για το κλίμα και την ενέργεια έως το 2030 που καθορίστηκε από το Ευρωπαϊκό Συμβούλιο του Οκτωβρίου του 2014¹ καθώς και από το σχέδιο στρατηγικής της Ευρωπαϊκής Επιτροπής για την αντιμετώπιση της παγκόσμιας κλιματικής αλλαγής μετά το 2020². Η ΕΕ έθεσε για το σύνολο της οικονομίας τον φιλόδοξο εσωτερικό στόχο για μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου κατά τουλάχιστον 40 % για το 2030, στόχος ο οποίος βασίζεται σε παγκόσμιες προβολές οι οποίες συνάδουν με τον μεσοπρόθεσμο στόχο της Συμφωνίας του Παρισιού (EC, 2015). Οι στόχοι αυτοί πρόσφατα (Ιούλιος 2021) αναθεωρήθηκαν, με τη δέσμευση των 27 κρατών μελών της ΕΕ να μετατρέψουν την ΕΕ στην πρώτη κλιματικά ουδέτερη ήπειρο έως το 2050 μέσω της Ευρωπαϊκής Πράσινης Συμφωνίας. Προς αυτό το σκοπό δέχθηκαν τη δέσμευση για μείωση των εκπομπών κατά τουλάχιστον 55 % έως το 2030, σε σύγκριση με τα επίπεδα του 1990. Η Ευρωπαϊκή Πράσινη Συμφωνία αναγνωρίζει ότι η πράσινη μετάβαση δεν αφορά μόνο στον ενεργειακό τομέα, αλλά ταυτίζεται με την βιωσιμότητα σε

¹ Συμπεράσματα του Ευρωπαϊκού Συμβουλίου της 24ης Οκτωβρίου 2014

² Το Πρωτόκολλο του Παρισιού – ένα σχέδιο στρατηγικής για την αντιμετώπιση της παγκόσμιας κλιματικής αλλαγής μετά το 2020 COM(2015) 81 final.

όλους τους τομείς (μεταφορές, βιομηχανία, γεωργία, κτηνοτροφία). Κατανοώντας πως η χάραξη κλιματικής πολιτικής οφείλει να περιλαμβάνει εξίσου ποικίλα επιστημονικά πεδία, το σύνολο των προτάσεων της ΕΕ έχουν ως στόχο να καταστήσουν όλους τους τομείς της οικονομίας της ΕΕ έτοιμους να ανταποκριθούν στην πρόκληση επίτευξης των στόχων της για το κλίμα έως το 2030 με τρόπο δίκαιο, ανταγωνιστικό και οικονομικά αποδοτικό. Στο πλαίσιο αυτό η συμφωνία έχει ως στόχο να δημιουργήσει νέες ευκαιρίες για καινοτομία, επενδύσεις και θέσεις εργασίας, καθώς και να εξασφαλίσει ευκαιρίες, στηρίζοντας τους ευάλωτους πολίτες μέσω της αντιμετώπισης της ανισότητας και της ενεργειακής φτώχειας και της μείωσης του ενεργειακού κόστους για τους καταναλωτές και τη βιομηχανία. Σε επίπεδο στόχων, η Επιτροπή προτείνει να αυξηθεί σε 40 % ο δεσμευτικός στόχος για τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας στο ενεργειακό μείγμα της ΕΕ και επιπλέον να αυξηθούν οι στόχοι ενεργειακής απόδοσης σε επίπεδο ΕΕ και να καταστούν δεσμευτικοί, ώστε να επιτευχθεί συνολική μείωση της κατανάλωσης τελικής και πρωτογενούς ενέργειας κατά 36-39 % έως το 2030 (EC, 2019).

Η συγκεκριμένη συμφωνία αποτελεί απόδειξη πως η επίτευξη μεταβάσεων σε κοινωνίες χαμηλών εκπομπών άνθρακα αποτελεί μία ιδιαίτερα σύνθετη, πολυδιάστατη διεργασία που απαιτεί την αξιολόγηση των μέτρων, στρατηγικών και μιγμάτων πολιτικής που μπορούν να προάγουν τα διαφορετικά κοινωνικοοικονομικά μονοπάτια με τρόπο εύρωστο, κοινωνικά αποδεκτό και οικονομικά βιώσιμο. Ταυτόχρονα όμως, δεδομένων των υφιστάμενων και ενδεχόμενων νέων προκλήσεων που σχετίζονται με τις θεσμοθετημένες συμφωνίες για το κλίμα, και προκειμένου η διαδικασία χάραξης πολιτικής να οδηγήσει σε πιο αποτελεσματικές και εύρωστες, επιστημονικά τεκμηριωμένες συστάσεις, είναι απαραίτητος ο χειρισμός των αβεβαιοτήτων που τις απαρτίζουν (Paradelis et al., 2013). Στον χώρο της χάραξης κλιματικής πολιτικής, οι ανακύπτουσες αβεβαιότητες προκύπτουν τόσο από τις κρίσεις των εμπειρογνομόνων όσο και από τα μοντέλα υποστήριξης καθαυτά, αλλά ταυτόχρονα περιλαμβάνουν και πρόσθετες διαστάσεις που σχετίζονται με τις αβεβαιότητες και κινδύνους του εξωτερικού περιβάλλοντος που πλαισιώνει το εκάστοτε πρόβλημα απόφασης. Αυτές οι αβεβαιότητες ορίζονται από

εξωτερικούς παράγοντες, σχετικούς με το χώρο του προβλήματος και ως εκ τούτου δεν ελέγχονται από τους αποφασίζοντες που λαμβάνουν την απόφαση, ούτε από τους ερευνητές – επιστήμονες που χειρίζονται τα μοντέλα απόφασης. Η διαχείριση αβεβαιοτήτων και κινδύνων τέτοιου τύπου μπορεί να επιτευχθεί είτε υπό την θεώρηση ενός συνόλου εναλλακτικών δράσεων – σεναρίων (Fuss et al., 2012; Hua et al., 2015; Marinoni et al., 2011), είτε με την ενσωμάτωσή τους μέσω στοχαστικής προσομοίωσης και χρήσης της θεωρίας πιθανοτήτων, που αποτελεί παραδοσιακά την πιο ευρέως διαδεδομένη μέθοδο ανάλυσης της αβεβαιότητας (Zadeh, 2005; Montanari, 2007). Παρόλα αυτά, η υπάρχουσα βιβλιογραφία (πχ. Buurman & Baboni, 2016; Di Lullo et al., 2016; Narita & Klepper, 2016) δεν φαίνεται να διαχειρίζεται άμεσα και επαρκώς αυτές τις αβεβαιότητες και τους κινδύνους που σχετίζονται με την κλιματική αλλαγή ή/και πολιτική.

Σε κάθε περίπτωση, καθοριστική στην καλύτερη κατανόηση των αβεβαιοτήτων και κινδύνων του πλαισίου της εκάστοτε απόφασης είναι η αξιοποίηση της γνώσης εμπειρογνομόνων. Ειδικά δεδομένων των συνεργειών και συγκρούσεων κλιματικής δράσης με πολιτικές άλλων επιπέδων, η ανάγκη εμπλοκής επιστημονικών ομάδων διαφορετικών πεδίων, αλλά και ενδιαφερόμενων μερών, τα οποία περιλαμβάνουν αλλά δεν περιορίζονται στους φορείς χάραξης πολιτικής, είναι προϋπόθεση για την αποτελεσματική αντιμετώπιση της κλιματικής αλλαγής (Geels et al., 2016). Ταυτόχρονα, η ενσωμάτωση στις μοντελικές διεργασίες των πληροφοριών και προτιμήσεων των ενδιαφερόμενων φορέων συνεισφέρει σημαντικά στη διαφάνεια και αξιοπιστία των επιστημονικών μεθόδων και ευρωστία των ευρημάτων (Verdolini et al., 2018). Ωστόσο, παρά τη σημαντικότητα της εμπλοκής τους, οι εμπειρογνώμονες παραμένουν αποσυνδεδεμένοι από τις μοντελικές δραστηριότητες, είτε εμπλέκονται στα πρώτα στάδια της διαμόρφωσης των αρχικών υποθέσεων και σεναρίων. Φαίνεται δηλαδή ότι υπάρχει ένα κενό μεταξύ των τυπικών αναπαραστάσεων των μοντέλων και του πραγματικού περιβάλλοντος διαμόρφωσης της απόφασης, διαδικασία η οποία θα μπορούσε να επωφεληθεί σημαντικά από την εξαγωγή και αξιοποίηση της γνώσης εμπειρογνομόνων.

Σύμφωνα με τα παραπάνω, στην προσπάθειά αξιόπιστης και αποδοτικής πλαισίωσης και θεμελίωσης των διαδικασιών χάραξης κλιματικής πολιτικής

κρίνεται απαραίτητη η διαμόρφωση ολοκληρωμένων μεθοδολογιών, βασισμένων στις τρέχουσες επιστημονικές εξελίξεις, οι οποίες επικεντρώνονται στην επιτυχή διαχείριση των ακόλουθων διαστάσεων: α) την πολυδιάστατη αξιολόγηση των κλιματικών στρατηγικών με στόχο την αποτελεσματική διαχείριση των συνεργειών της κλιματικής δράσης με τις σύγχρονες κοινωνικο-οικονομικές διαστάσεις, μέσω του καθορισμού και επίλυσης πολυστοχικών προβλημάτων βελτιστοποίησης β) την ουσιαστική συμμετοχή των εμπειρογνομώνων στη διαμόρφωση των απαιτήσεων των επιστημονικών διεργασιών μέσω της πρότασης κατάλληλων εργαλείων για την άμεση εμπλοκή τους στη διαδικασία λήψης απόφασης γ) τη μεγιστοποίηση της ευρωστίας των μοντέλων και των αποτελεσμάτων τους, μέσω της εφαρμογής μεθοδολογιών για την αποτελεσματική διαχείριση της αβεβαιότητας επί των παραμέτρων αξιολόγησης των κλιματικών στρατηγικών και της σαφούς αναγνώρισης και αποτελεσματικής αξιολόγησης των κινδύνων που εμποδίζουν την αποτελεσματική εφαρμογή των προτεινόμενων στρατηγικών.

1.2 Σκοπός τόμου και αντικείμενο διατριβής

Σκοπός της παρούσας διδακτορικής διατριβής είναι η ανάπτυξη ενός συνόλου ολοκληρωμένων μεθοδολογιών επίλυσης προβλημάτων πολυστοχικής βελτιστοποίησης υπό συνθήκες αβεβαιότητας, η υλοποίηση των προτεινόμενων μεθοδολογιών μέσω της κατασκευής των κατάλληλων αλγοριθμικών εργαλείων και τελικά η εφαρμογή τους για την επίλυση πραγματικών προβλημάτων λήψης απόφασης όσον αφορά στρατηγικές μετριασμού ή/και προσαρμογής στην κλιματική αλλαγή. Σε αυτό το πλαίσιο η έρευνα εκτείνεται σε τρία σκέλη. Το πρώτο σκέλος είναι θεωρητικό και αφορά την επισκόπηση των βασικών εννοιών και των κύριων μεθόδων πολυστοχικής βελτιστοποίησης, όπου και αναδεικνύονται τα πλεονεκτήματα της. Στο δεύτερο, υπολογιστικό - μαθηματικό, σκέλος αναπτύσσονται νέοι, βελτιωμένοι υπολογιστικά, αλγόριθμοι για την επίλυση προβλημάτων πολυστοχικής βελτιστοποίησης και ενσωματώνονται σε αυτούς διαφορετικές μέθοδοι διαχείρισης αβεβαιότητας. Οι νέοι αλγόριθμοι εντάσσονται σε ένα σύνολο ειδικά διαμορφωμένων μεθοδολογιών, οι οποίες εφαρμόζονται σε πραγματικά προβλήματα αξιολόγησης κλιματικών

στρατηγικών, εργασία η οποία αποτελεί και το τρίτο, πρακτικό, σκέλος της έρευνας. Από μεθοδολογική σκοπιά, έμφαση δίνεται στη συμμετοχή των εμπειρογνώμων στη διαδικασία λήψης απόφασης, στην ολοκληρωμένη απεικόνιση των εναλλακτικών λύσεων - επιλογών από τις οποίες οι εμπειρογνώμονες επιλέγουν την βέλτιστη βάσει των προτιμήσεων τους και στην αποτελεσματική αντιμετώπιση της αβεβαιότητας ώστε να επιτευχθεί η παραγωγή ενός συνόλου εύρωστων λύσεων.

1.3 Συμβολή διατριβής

Η παρούσα διατριβή στοχεύει στην ενίσχυση των εργαλείων υποστήριξης αποφάσεων ενεργειακής και κλιματικής πολιτικής σε αρκετές κατευθύνσεις, τόσο όσον αφορά στο υπολογιστικό - μαθηματικό της σκέλος όσο και στο πρακτικό. Συγκεκριμένα, η συνεισφορά της διδακτορικής διατριβής σε σχέση με την υπάρχουσα, σχετική βιβλιογραφία, εντοπίζεται κατά κύριο λόγο στα εξής επιμέρους πεδία:

1. Βελτιστοποίηση αλγορίθμου επίλυσης προβλημάτων ακέραιου πολυκριτηριακού προγραμματισμού για τον προσδιορισμό του συνόλου των ικανών λύσεων του εκάστοτε προβλήματος σε ρεαλιστικό υπολογιστικό χρόνο (Κεφάλαιο 4) και ένταξή του σε ολοκληρωμένο εργαλείο πολυστοχικής βελτιστοποίησης υπό αβεβαιότητα (Κεφάλαιο 5).
2. Δημιουργία μεθοδολογίας για την υποστήριξη ενεργειακής και κλιματικής πολιτικής τοποθετώντας στον πυρήνα των επιστημονικών διεργασιών τον ανθρώπινο παράγοντα με την ενεργό συμμετοχή τόσο των φορέων χάραξης πολιτικής όσο και όλων των ενδιαφερόμενων φορέων και εμπειρογνώμων, επιτυγχάνοντας με αυτόν τον τρόπο τη σύνδεση του τεχνικού πλαισίου προσομοίωσης των μοντέλων με το πραγματικό περιβάλλον στο οποίο διαμορφώνονται και λαμβάνονται οι αποφάσεις (Κεφάλαιο 6).
3. Δημιουργία μεθοδολογίας για την υποστήριξη ενεργειακής και κλιματικής πολιτικής συνδυάζοντας μοντέλα πολυστοχικού προγραμματισμού με μοντέλα ολοκληρωμένης αποτίμησης (MOA), ώστε να αναλυθούν

αποτελεσματικά οι διαφορετικές διαστάσεις που επηρεάζουν τον ενεργειακό σχεδιασμό και την κλιματική δράση (Κεφάλαια 7, 8). Επιπλέον, χρησιμοποίηση ενός συνόλου τριών καθιερωμένων ΜΟΑ (Κεφάλαιο 8) για τη διερεύνηση του τρόπου με τον οποίο κάθε προσέγγιση μοντελοποίησης επηρεάζει τα αποτελέσματα του μοντέλου με σκοπό τη μεγιστοποίηση της ακρίβειας και αξιοπιστίας των αποτελεσμάτων.

4. Δημιουργία μεθοδολογίας για την υποστήριξη ενεργειακής και κλιματικής πολιτικής συνδυάζοντας μοντέλα πολυστοχικού προγραμματισμού με προσεγγίσεις ενσωμάτωσης στοχαστικής και ντετερμινιστικής αβεβαιότητας, προκειμένου να μεγιστοποιηθεί η ευρωστία των μοντέλων και των αποτελεσμάτων τους (Κεφάλαια 6, 7, 8).
5. Εφαρμογή των προτεινόμενων μεθοδολογιών και βελτιωμένων αλγορίθμων για την επίλυση κρίσιμων, πραγματικών προβλημάτων ενεργειακής και κλιματικής πολιτικής (Κεφάλαια 6, 7, 8) με επιπλέον μοντελοποίηση των Διαμοιρασμένων Κοινωνικοοικονομικών Μονοπατιών (Κεφάλαιο 7) και αξιοποίηση και κατάλληλο χειρισμό της πληροφορίας βάσεων δεδομένων δεικτών απασχόλησης για την ένταξή τους στα κριτήρια βελτιστοποίησης.
6. Εφαρμογή των προτεινόμενων μεθοδολογιών και βελτιωμένων αλγορίθμων σε μελέτες περίπτωσης που καλύπτουν με διαφορετικό τρόπο τις διαστάσεις που τις απαρτίζουν. Η διαφοροποίηση αφορά: τα γεωγραφικά επίπεδα της ανάλυσης (τοπικό, περιφερειακό, παγκόσμιο επίπεδο, στα Κεφάλαια 6, 7 και 8 αντιστοίχως), την έννοια του χρόνου (ανάλυση σε βραχυπρόθεσμο και μεσοπρόθεσμο ορίζοντα, στα Κεφάλαια 6 και 7, 8 αντιστοίχως), τον αριθμό των προς βελτιστοποίηση κριτηρίων (δύο προς βελτιστοποίηση κριτήρια στην εφαρμογή του Κεφαλαίου 6, τρία για το πρόβλημα στο Κεφάλαιο 7, συνδυασμός δύο και τριών κριτηρίων στο Κεφάλαιο 8) και τους παράγοντες με βάση τους οποίους αυτά επιλέγονται (βελτιστοποίηση με βάση στόχους εξοικονόμησης, σχέση κόστους αποδοτικότητας, εμπλεκόμενου κινδύνου για τη μελέτη του Κεφαλαίου 6, βελτιστοποίηση με κριτήρια σχετικά με τους στόχους

βιώσιμης ανάπτυξης που αφορούν την υγεία, τη δράση για το κλίμα και την πρόσβαση σε καθαρή, σύγχρονης μορφής ενέργεια στην εφαρμογή του Κεφαλαίου 7, στόχοι μείωσης των εκπομπών και κοινωνικά κριτήρια - δημιουργίας νέων θέσεων εργασίας σε βραχυπρόθεσμο και μακροπρόθεσμο ορίζοντα- στο Κεφάλαιο 8), και τέλος το πλαίσιο ενσωμάτωσης αβεβαιότητας (ενσωμάτωση της έννοιας του κινδύνου και στοχαστικής αβεβαιότητας στο Κεφάλαιο 6, προσομοίωση αβεβαιότητας υπό τη μορφή διαφορετικών κοινωνικοοικονομικών σεναρίων σε συνδυασμό με στοχαστική ανάλυση για την πρόταση ενός νέου σεναρίου μεταξύ διαφορετικών κοινωνικοοικονομικών μονοπατιών στην εφαρμογή του Κεφαλαίου 7, στοχαστική προσομοίωση και ανάλυση μεταξύ των αποτελεσμάτων μοντελοποίησης τριών ΜΟΑ στο Κεφάλαιο 8).

Πιο αναλυτικά, ως προς το υπολογιστικό – μαθηματικό σκέλος της διατριβής, ξεκινώντας από την ανάλυση των αδυναμιών υπάρχουσών αλγορίθμων βελτιστοποίησης με δυνατότητα εφαρμογής σε πολυστοχικά προβλήματα ακέραιου προγραμματισμού, προτείνεται και υλοποιείται ένας ισχυρός αλγόριθμος βασιζόμενος στην μέθοδο των περιορισμών, χάρη στον οποίο επιλύονται εύκολα προβλήματα πολυστοχικής ανάλυσης αποφάσεων που μέχρι τώρα ήταν δυσεπίλυτα. Ο βελτιωμένος αλγόριθμος που αναπτύσσεται στα πλαίσια της διατριβής αντιμετωπίζει αποτελεσματικά μειονεκτήματα προηγούμενων αλγορίθμων που σχετίζονται με τον υψηλό χρόνο επίλυσης προβλημάτων με πολλά κριτήρια βελτιστοποίησης, τα οποία γίνονται εντονότερα στις περιπτώσεις μεγάλων προβλημάτων, δηλαδή σε προβλήματα όπου το εύρος του πεδίου τιμών των λύσεων είναι μεγάλο. Επιδιώκοντας την πλήρη εξάλειψη των περιττών βελτιστοποιήσεων κατά την επαναληπτική επίλυση του προβλήματος, ο βελτιωμένος αλγόριθμος της διατριβής μπορεί να εφαρμοσθεί επιτυχώς και σε μεγάλα προβλήματα, τα οποία μέχρι πρότινος λόγω του αυξημένου υπολογιστικού τους φορτίου, καθιστούσαν τον υπολογισμό του συνόλου των ικανών λύσεων πολύ χρονοβόρο ή και πρακτικά αδύνατο.

Σε πρακτικό επίπεδο, το πρόβλημα βελτιστοποίησης του Κεφαλαίου 6 προσεγγίζεται ως ένα πρόβλημα ανάλυσης χαρτοφυλακίου μέτρων πολιτικής εξοικονόμησης ενέργειας. Η προτεινόμενη μεθοδολογία επεκτείνει τις

υπάρχουσες μελέτες στο πεδίο της ανάλυσης χαρτοφυλακίου στον ενεργειακό τομέα, εντάσσοντας την ανάλυση χαρτοφυλακίου σε μοντέλα πολυστοχικής βελτιστοποίησης και ταυτόχρονα επιτυγχάνοντας την ενεργό συμμετοχή των εμπειρογνομόνων στα πλαίσια της ανάλυσης. Στις καινοτομίες της μελέτης προστίθεται η ενσωμάτωση της έννοιας του κινδύνου και η διαχείριση της αβεβαιότητας, στοιχεία εγγενή στο σχεδιασμό εύρωστων ενεργειακών μοντέλων. Ταυτόχρονα αποδεικνύεται η σημαντικότητα της εφαρμογής της προτεινόμενης μεθοδολογίας σε ένα ρεαλιστικό πρόβλημα για την διαμόρφωση του ρυθμιστικού πλαισίου ενεργειακής αποδοτικότητας στην Ελλάδα. Η χρησιμοποίηση της μελέτης στην επιστημονική πλαισίωση των προσπαθειών για επανασχεδιασμό του εθνικού πλαισίου πολιτικής για την ενεργειακή αποδοτικότητα, αποτελεί μια από τις καινοτομίες της μελέτης, η οποία πλαισιώνεται από τα καινοτόμα στοιχεία σε επίπεδο τεχνικής υλοποίησης, όπως αυτά περιεγράφηκαν παραπάνω.

Ως προς τις καινοτομίες της μελέτης του Κεφαλαίου 7, ξεχωρίζουν η εισαγωγή ντετερμινιστικών σεναρίων με τη μορφή διαφορετικών πολιτικών γης και κοινωνικοοικονομικών μονοπατιών και η προσομοίωση ενός νέου ενδιαμέσου σεναρίου κοινωνικοοικονομικής μετάβασης το οποίο προκύπτει από την στοχαστική ανάλυση ευρωστίας μεταξύ των διαφορετικών κοινωνικοοικονομικών μονοπατιών. Ένα πρόσθετο στοιχείο καινοτομίας αποτελεί η δυεπίπεδη σύνδεση της εξεταζόμενης μεθόδου πολυστοχικού προγραμματισμού με το επιλεγέν ΜΟΑ, η οποία επιτυγχάνεται τόσο με την αξιοποίηση των δεδομένων του ΜΟΑ για την διαμόρφωση του προβλήματος βελτιστοποίησης όσο και με την επανατροφοδότηση των αποτελεσμάτων της βελτιστοποίησης στο ΜΟΑ για την επιβεβαίωση της ευρωστίας των λύσεων. Στα πρωτότυπα στοιχεία της μελέτης προστίθεται και η αντιστοίχιση των κριτηρίων της πολυστοχικής βελτιστοποίησης με τρεις στόχους βιώσιμης ανάπτυξης, σύνδεση που αυξάνει την αξία της ανάλυσης σε επίπεδο πολιτικής.

Στο Κεφάλαιο 8 χρησιμοποιούνται τρία μοντέλα κλίματος-οικονομίας σε συνδυασμό με τον βελτιωμένο αλγόριθμο πολυστοχικής βελτιστοποίησης που αναπτύχθηκε στο Κεφάλαιο 5 και αποδεικνύεται α) η σημαντικότητα του βελτιωμένου αλγορίθμου ειδικά ως προς την ανάλυση της αβεβαιότητας του προβλήματος, καθώς λόγω του μεγάλου μεγέθους του προβλήματος αυτό θα

ήταν πρακτικά αδύνατο να λυθεί με οποιαδήποτε από τις ήδη υπάρχουσες στην βιβλιογραφία μεθόδους, και β) η σημαντικότητα της εφαρμογής διαφορετικών μοντέλων για τη μεγιστοποίηση της ακρίβειας και αξιοπιστίας των αποτελεσμάτων. Ως προς το πρόβλημα που επιλύεται, αυτό, πέρα από την άμεση καθοδήγηση που δύναται να προσφέρει σε ένα επίκαιρο ζήτημα χάραξης πολιτικής, επεκτείνει τις υπάρχουσες εφαρμογές τόσο λόγω της ευρύτητας εφαρμογής του σε διαφορετικές χώρες, με την ανάλυση έξι περιοχών με υψηλές εκπομπές αερίων ανά την υφήλιο, όσο και με την αξιοποίηση και κατάλληλη προσαρμογή δεδομένων από βάσεις συντελεστών απασχόλησης και την αξιοποίηση της εν λόγω πληροφορίας για την ένταξη του δείκτη δημιουργίας θέσεων εργασίας στα κριτήρια βελτιστοποίησης.

1.4 Δομή Διατριβής

Το κείμενο του τόμου της διδακτορικής διατριβής οργανώνεται σε τρία κύρια μέρη τα οποία όπως προαναφέρθηκε αφορούν το θεωρητικό, μαθηματικό – υπολογιστικό και πρακτικό κομμάτι της έρευνας αντιστοίχως. Τα τρία μέρη του κυρίως κορμού αποτελούνται από έξι επιμέρους κεφάλαια (Κεφάλαια 2-8), στα οποία επιπλέον προστίθεται η παρούσα εισαγωγή (Κεφάλαιο 1) και η αποτύπωση των συμπερασμάτων και μελλοντικών προοπτικών του ερευνητικού έργου (Κεφάλαιο 9). Οι επιστημονικές δημοσιεύσεις που πλαισιώνουν τα αποτελέσματα της ερευνητικής εργασίας δίνονται στο Παράρτημα 1.

Στο πρώτο μέρος και συγκεκριμένα στο Κεφάλαιο 2 παρουσιάζεται η επισκόπηση των σχετιζόμενων μεθόδων πολυστοχικής βελτιστοποίησης. Αρχικά, διατυπώνεται το πρόβλημα της πολυστοχικής βελτιστοποίησης, δίνοντας τους απαραίτητους ορισμούς και εξηγώντας τις ιδιαιτερότητες και την αξία της πολυστοχικής ανάλυσης (Ενότητα 2.1). Στην Ενότητα 2.2 πραγματοποιείται εκτεταμένη βιβλιογραφική επισκόπηση των μεθόδων πολυστοχικής βελτιστοποίησης, με κύριο άξονα ως προς τον διαχωρισμό των μεθόδων να αποτελεί το στάδιο εμπλοκής των εμπειρογνομόνων στη διαδικασία επίλυσης της βελτιστοποίησης. Ως προς το τελευταίο, έμφαση δίνεται στην κριτική παρουσίαση των βασικών σχημάτων που εφαρμόζονται στο πεδίο του πολυκριτηριακού ακέραίου μαθηματικού προγραμματισμού.

Το δεύτερο μέρος του τόμου εστιάζει στα αλγοριθμικά σχήματα που αναπτύχθηκαν στα πλαίσια της διατριβής. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στην οικογένεια μεθόδων των περιορισμών (μέθοδοι της οικογένειας ϵ -constraint) οι οποίες αποτέλεσαν και τη βάση των μεθοδολογιών που αναπτύχθηκαν στα πλαίσια της διατριβής. Η αναλυτική περιγραφή των αλγορίθμων και απαιτήσεων των συγκεκριμένων μεθόδων ακολουθούμενη από τη συγκριτική αξιολόγησή τους μεταξύ άλλων δημοφιλών μεθόδων πολυκριτηριακού προγραμματισμού παρουσιάζονται στο Κεφάλαιο 3. Ξεκινώντας από τις αδυναμίες των πιο εξελιγμένων αλγορίθμων στην οικογένεια των μεθόδων των περιορισμών που παρουσιάστηκαν στο Κεφάλαιο 3, στο Κεφάλαιο 4 διερευνώνται εναλλακτικές προσεγγίσεις βελτίωσής τους. Στη συνέχεια, αναπτύσσεται και παρουσιάζεται λεπτομερώς μια βελτιωμένη έκδοση των εν λόγω αλγορίθμων, η οποία αναπτύχθηκε ειδικά για τους σκοπούς της παρούσας διατριβής και στην οποία δίνεται η ονομασία AUGMECON – R. Ο βελτιωμένος αλγόριθμος της AUGMECON – R επεκτείνεται περαιτέρω στο Κεφάλαιο 5, όπου και εντάσσεται σε ολοκληρωμένο εργαλείο πολυστοχικής βελτιστοποίησης υπό αβεβαιότητα, το οποίο επιτρέπει ευελιξία στον χειρισμό των εισόδων και στην αποτύπωση και ανάλυση των εξόδων του προβλήματος.

Κάνοντας χρήση των αλγορίθμων που παρουσιάστηκαν στο δεύτερο μέρος, το τρίτο και τελευταίο σκέλος του τόμου προτείνει τρεις ολοκληρωμένες μεθοδολογίες υποστήριξης απόφασης στις οποίες γίνεται εμβάθυνση στο ζήτημα της αβεβαιότητας. Η πρώτη μεθοδολογική προσέγγιση (Κεφάλαιο 6) προτείνει ένα πολυστοχικό μοντέλο ανάλυσης χαρτοφυλακίου με αξιολόγηση κινδύνου και ανάλυση ευρωστίας για την προώθηση της ενεργειακής αποδοτικότητας στην Ελλάδα. Η δεύτερη εφαρμογή (Κεφάλαιο 7) αφορά την πρόταση ολοκληρωμένου πλαισίου ανάλυσης αβεβαιότητας υπό διαφορετικά κοινωνικοοικονομικά σενάρια για τον προσδιορισμό βέλτιστων χαρτοφυλακίων ενεργειακών τεχνολογιών στην ανατολική Αφρική στο πλαίσιο επίτευξης των Στόχων Βιώσιμης Ανάπτυξης. Στην τρίτη εφαρμογή, ο βελτιωμένος αλγόριθμος AUGMECON – R χρησιμοποιείται σε συνδυασμό με διαφορετικά μοντέλα κλίματος-οικονομίας σε ένα πρόβλημα μεγιστοποίησης των κλιματικών και κοινωνικών

ωφελειών των πακέτων ανάκαμψης από τον COVID-19 σε ένα σύνολο γεωγραφικών περιοχών σε παγκόσμιο επίπεδο (Κεφάλαιο 8).

Τέλος, στο Κεφάλαιο 9 παρουσιάζονται τα συμπεράσματα και οι μελλοντικές προοπτικές του ερευνητικού έργου της διδακτορικής διατριβής.

Κεφάλαιο 2

2 Επισκόπηση σχετιζόμενων μεθόδων πολυστοχικής βελτιστοποίησης

2.1 Εισαγωγή

2.1.1 Διατύπωση του προβλήματος βελτιστοποίησης

Κεντρική συνιστώσα του πρώτου - θεωρητικού μέρους της διατριβής αποτελεί ο ορισμός του προβλήματος της πολυστοχικής βελτιστοποίησης. Η έννοια της βελτιστοποίησης εφαρμόζεται σε προβλήματα λήψης αποφάσεων και προϋποθέτει μια διαδοχή από εναλλακτικές επιλογές (alternatives) και αξιολογήσεις (evaluations) των επιπτώσεων κάθε επιλογής. Κάθε επιλογή που ικανοποιεί τους περιορισμούς του προβλήματος καλείται *εφικτή* (feasible). Το σύνολο των εφικτών επιλογών καλείται *εφικτός χώρος/ εφικτή περιοχή* (feasible space/region) ή *χώρος αποφάσεων* (decision space) ή *χώρος αναζήτησης* (search space). Θεωρώντας ότι κάθε εφικτή επιλογή μπορεί να περιγραφεί από ένα σύνολο n μεταβλητών ελέγχου ή απόφασης (control / decision variables) $\mathbf{x} = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ και αν σε κάθε τέτοια περιγραφή μπορεί να αντιστοιχιστεί ένα μέτρο επίδοσης (performance measure), τότε ως βέλτιστη (optimal) λαμβάνεται η απόφαση που μεγιστοποιεί το εν λόγω μέτρο. Η μαθηματική έκφραση του μέτρου επίδοσης καλείται *αντικειμενική ή στοχική συνάρτηση* (objective function) και συμβολίζεται $f(\mathbf{x})$. Η συνάρτηση $f(\mathbf{x})$ αναφέρεται συχνά και ως *συνάρτηση κόστους* (cost function) (Καρατζάς & Παπαδοπούλου, 2016).

Η γενική διατύπωση του προβλήματος έχει ως εξής:

Έστω $f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ είναι μια πραγματική συνάρτηση ορισμένη στο πεδίο $D \subseteq R^n$ και $\mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T$ το διάνυσμα στήλη των μεταβλητών απόφασης (με τον εκθέτη T να δηλώνει ανάστροφη μήτρα). Η συνάρτηση f είναι όπως ορίστηκε

πρωτίτερα η αντικειμενική συνάρτηση και οι συνιστώσες του x οι μεταβλητές απόφασης. Ελλείψει περιορισμών ο εφικτός χώρος του προβλήματος ταυτίζεται με το πεδίο ορισμού της συνάρτησης f και συμβολίζεται με $S \equiv D$. Το πεδίο τιμών της συνάρτησης, ονομάζεται *χώρος αποτίμησης* (evaluation space) ή *αντικειμενικός χώρος ή επιφάνεια/χώρος απόκρισης* (response surface/space) και συμβολίζεται με F . Μαθηματικά η βελτιστοποίηση διατυπώνεται γενικά ως εξής (Coello Coello C. , 1999):

$$\min / \max f(x) = f(x_1, x_2, \dots, x_n), \text{ όπου } x \in S \quad (2.1)$$

Παρατηρείται ότι είναι εφικτή η χρησιμοποίηση είτε του του τελεστή ελαχιστοποίησης "min" είτε η χρήση του δυικού του, δηλαδή του τελεστή μεγιστοποίησης (maximization - "max"). Φυσικά ένα πρόβλημα ελαχιστοποίησης μπορεί εύκολα να μετατραπεί σε πρόβλημα μεγιστοποίησης μέσω των κατάλληλων μετασχηματισμών και αντίστροφα (Καρλάυτης & Λάγαρος, 2010). Σχετικοί μετασχηματισμοί που συναντώνται συχνότερα είναι οι:

$$f(x) = -f(x)$$

Ή

$$f(x) = \frac{1}{f(x)}$$

Ως επέκταση της γενικής διατύπωσης του προβλήματος που δόθηκε στην (2.1) η αντικειμενική συνάρτηση, και άρα το αντίστοιχο πρόβλημα βελτιστοποίησης, μπορεί να πάρει διαφορετικές μορφές, όπως να είναι βαθμωτή (το μέτρο επίδοσης περιλαμβάνει ένα κριτήριο - μονοκριτηριακή βελτιστοποίηση) ή διανυσματική (το μέτρο επίδοσης περιλαμβάνει περισσότερα κριτήρια), με συνεχείς, διακριτές, ακέραιες ή μικτές μεταβλητές ελέγχου, με περιορισμούς ή χωρίς περιορισμούς, με ρητούς ή ασαφείς (fuzzy) περιορισμούς, γραμμική ή μη γραμμική, κυρτή (μοναδικό ακρότατο) ή μη κυρτή (πολλαπλά ακρότατα) κ.α. (Ευστρατιάδης & Μακρόπουλος, 2012).

Το πρόβλημα της *μονοκριτηριακής βελτιστοποίησης* ή βελτιστοποίησης ενός κριτηρίου ορίζεται ως το πρόβλημα εύρεσης των μεταβλητών απόφασης x που κατά περίπτωση ελαχιστοποιούν ή μεγιστοποιούν μια βαθμωτή συνάρτηση f με

πεδίο ορισμού το $D \subseteq R^n$ και πεδίο τιμών το $F \subseteq R$. Το πεδίο τιμών στην προκειμένη είναι μία μοναδική τιμή. Απεικονίζοντας με n το πλήθος των μεταβλητών απόφασης \mathbf{x} , ορίζουμε το διάνυσμα-στήλη των μεταβλητών απόφασης ως:

$$\mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T$$

Και το πρόβλημα μονοκριτηριακής βελτιστοποίησης διατυπώνεται ως εξής:

$$\max(\min) f(\mathbf{x})$$

s. t.

$$\mathbf{x} \in S = \{\mathbf{x} \in R^n \mid g_i(\mathbf{x}) \otimes b_i, i = 1, 2, \dots, k\}$$

Όπου:

f : η αντικειμενική συνάρτηση

\mathbf{x} : το διάνυσμα των n κατά το πλήθος μεταβλητών απόφασης

S : ο εφικτός χώρος

g_i : η i -οστή συνάρτηση του αριστερού μέλους των περιορισμών

\otimes : ένα σύμβολο από το σύνολο ($\leq, =, \geq$)

b_i : ο πραγματικός συντελεστής του δεξιού μέλους του περιορισμού i

k : ο αριθμός των περιορισμών

Οι περιορισμοί του προβλήματος, που υποδηλώνονται εδώ με τη συντομογραφία της έκφρασης "subject to - *s. t.*" (υποκείμενο σε), εκφράζονται ως ανισότητες ανάμεσα στις συναρτήσεις των μεταβλητών απόφασης g_i και στους σταθερούς όρους b_i .

Όπως είναι φανερό, η τεχνική της μονοκριτηριακής βελτιστοποίησης έχει ως κύριο στόχο τον εντοπισμό μιας μονοσήμαντης λύσης του προβλήματος. Μια τέτοια επίλυση όπου υπάρχει μια μόνο αντικειμενική συνάρτηση καταλήγει στην εύρεση της *άριστης λύσης*, δηλαδή της εφικτής λύσης που βελτιστοποιεί τη μοναδική αντικειμενική συνάρτηση. Ωστόσο, η ύπαρξη ενός μόνο κριτηρίου

βελτιστοποίησης είναι μη ρεαλιστική για πολύπλοκα συστήματα και μπορεί να οδηγήσει σε μεροληπτικές λύσεις. Η υποκειμενικότητα των λύσεων ισχύει ακόμα και στην περίπτωση που το πρόβλημα επιλύεται εντάσσοντας πολλαπλά κριτήρια σε μια ενιαία αντικειμενική συνάρτηση. Αυτό είναι και το σημαντικότερο μειονέκτημα των μονοκριτηριακών μεθόδων. Επιπλέον η μονοκριτηριακή προσέγγιση του προβλήματος έρχεται σε αντίθεση με την υποχρέωση του μηχανικού να προτείνει στον αποφασίζοντα εναλλακτικές στρατηγικές δράσεις, γεγονός που υποστηρίζει την ανάγκη ανάπτυξης πολυκριτηριακών προσεγγίσεων. Ένα πολυκριτηριακό πρόβλημα βελτιστοποίησης περιέχει έναν αριθμό αντικειμενικών συναρτήσεων που πρέπει να ελαχιστοποιηθούν ή να μεγιστοποιηθούν. Η πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση είναι γνωστή και ως πολυστοχική ή διανυσματική βελτιστοποίηση και οι όροι χρησιμοποιούνται ισοδύναμα στα πλαίσια της παρούσας διατριβής.

Η γενική μορφή της πολυκριτηριακής αντικειμενικής συνάρτησης είναι η διανυσματική συνάρτηση $f(x) = (f_1(x), f_2(x), \dots, f_M(x))^T$. με πεδίο ορισμού το $D \subseteq R^n$ και διανυσματικό πεδίο τιμών το $F \subseteq R^M$. Όπως και στα προηγούμενα, $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T$ με $x \in R^n$ είναι το διάνυσμα των μεταβλητών απόφασης. Οι M συνιστώσες της διανυσματικής συνάρτησης f είναι βαθμωτές συναρτήσεις που αντιπροσωπεύουν τα M κριτήρια επίδοσης του προβλήματος. Όπως και σε ένα μονοκριτηριακό πρόβλημα, υπάρχουν και εδώ περιορισμοί που πρέπει να ικανοποιεί κάθε εφικτή λύση.

Η γενική μορφή του πολυκριτηριακού προβλήματος διατυπώνεται ως εξής:

$$\begin{aligned} \max(\min) f_m(x) \quad & m = 1, 2, \dots, M \\ \text{s. t.} & \\ x \in S = \{x \in R^n \mid g_i(x) \otimes b_i, i = 1, 2, \dots, k\} & \end{aligned} \quad (2.2)$$

Όπου:

f_m : η m - οστή αντικειμενική συνάρτηση

x : το διάνυσμα των n μεταβλητών απόφασης

S : ο εφικτός χώρος

g_i : η i -οστή συνάρτηση του αριστερού μέλους των περιορισμών

\otimes : ένα σύμβολο από το σύνολο ($\leq, =, \geq$)

b_i : ο πραγματικός συντελεστής του δεξιού μέλους του περιορισμού i

M : ο αριθμός των αντικειμενικών συναρτήσεων

k : ο αριθμός των περιορισμών

Στη διατύπωση (2.2) θεωρούνται M αντικειμενικές συναρτήσεις, με κάθε αντικειμενική συνάρτηση να μπορεί είτε να ελαχιστοποιηθεί, είτε να μεγιστοποιηθεί. Η μετατροπή ενός προβλήματος μεγιστοποίησης σε ένα πρόβλημα ελαχιστοποίησης μπορεί να καταστεί δυνατή με βάση την αρχή της δυαδικότητας, όπως ισχύει για τα προβλήματα βελτιστοποίησης. Η μετατροπή απαιτεί τον πολλαπλασιασμό των αντίστοιχων συναρτήσεων με «-1». Δεδομένου ότι πολλοί αλγόριθμοι αναπτύσσονται ώστε να λύνουν μόνο ενός τύπου προβλήματα π.χ. μεγιστοποίησης, η αρχή της δυαδικότητας κρίνεται ιδιαίτερα σημαντική όταν συνυπάρχουν κριτήρια μικτού τύπου.

Οι συντελεστές των αντικειμενικών συναρτήσεων $f_m, m = 1, 2, \dots, M$ και των συναρτήσεων του αριστερού μέλους των περιορισμών $g_i, i = 1, 2, \dots, k$, καθώς και οι συντελεστές $b_i, i = 1, 2, \dots, k$ του δεξιού μέλους του περιορισμού είναι τα ήδη γνωστά μεγέθη του προβλήματος και ονομάζονται *παράμετροι* του προβλήματος.

Με τον όρο *λύση* ενός προβλήματος, εννοείται ο συνδυασμός των τιμών που λαμβάνουν οι μεταβλητές απόφασης. Αν η λύση αυτή ανήκει ταυτόχρονα στον εφικτό χώρο S , δηλαδή αν οι τιμές των μεταβλητών απόφασης ικανοποιούν τους περιορισμούς του προβλήματος, τότε χαρακτηρίζεται ως *εφικτή λύση* του προβλήματος, αλλιώς πρόκειται για *μη εφικτή λύση*.

2.1.2 Η αξία της πολυστοχικής βελτιστοποίησης

Η πολυστοχική βελτιστοποίηση προσελκύει το ενδιαφέρον των ερευνητών, για τρεις κυρίως λόγους. Πρώτον, αναγνωρίστηκε ότι τα περισσότερα προβλήματα λήψης απόφασης που εκφράζονται με μοντέλα μαθηματικού προγραμματισμού είναι στην ουσία πολυκριτηριακά. Τα περισσότερα του ενός κριτήρια εκφράζουν

μια πιο ρεαλιστική εκδοχή των σύγχρονων μοντέλων λήψης απόφασης. Αυτό ενισχύεται και από το γεγονός ότι στα σημερινά προβλήματα υπάρχουν περισσότεροι του ενός εμπλεκόμενοι φορείς, με διαφορετικές οπτικές γωνίες, που αντιστοιχούν σε διαφορετικά, πολλές φορές αλληλοσυγκρουόμενα, κριτήρια. Τα κριτήρια αυτά, σε ένα πρόβλημα μαθηματικού προγραμματισμού, ποσοτικοποιούνται με τις κατάλληλες αντικειμενικές συναρτήσεις. Έπειτα, η αποτύπωση του προβλήματος απόφασης ως πολυκριτηριακό δίνει τη σημαντική δυνατότητα στον αποφασίζοντα να εμπλακεί άμεσα και δυναμικά στην επίλυση του προβλήματος (στην αρχή, κατά τη διάρκεια του προβλήματος ή στο τέλος) και να καθορίσει τη βέλτιστη λύση, συγκρίνοντας τις εναλλακτικές λύσεις και επιλέγοντας την καταλληλότερη σύμφωνα με τις δικές του προτιμήσεις. Η συμμετοχή του αποφασίζοντος στην διαδικασία λύσης του προβλήματος, μετατρέπει την πολυκριτηριακή ανάλυση σε διαδικασία λήψης αποφάσεων, σε αντίθεση με τα μονοκριτηριακά προβλήματα, στα οποία ο αναλυτής συμμετέχει μόνο στη φάση της μοντελοποίησης του προβλήματος. Ο τρίτος λόγος είναι η αλματώδης εξέλιξη στην υπολογιστική τεχνολογία (αύξηση ταχύτητας, δυνατότητα αποθήκευσης κλπ), η οποία ενθαρρύνει την ανάπτυξη και εφαρμογή μεθόδων που είναι κατ'εξοχήν απαιτητικές σε υπολογιστική ισχύ.

Υπάρχουν πολλοί αλγόριθμοι και μελέτες σε διάφορες εφαρμογές που περιλαμβάνουν πολλαπλά κριτήρια. Ωστόσο, υπάρχει ένα κοινό στοιχείο στις περισσότερες από αυτές. Στη συντριπτική πλειοψηφία τους αποφεύγουν την πολυπλοκότητα ενός πραγματικού προβλήματος πολλαπλών στόχων συγχωνεύοντας τα επιμέρους κριτήρια σε μία μονοκριτηριακή συνάρτηση με χρήση παραμέτρων που ορίζονται από τον χρήστη. Αυτή την μονοκριτηριακή προσέγγιση χρησιμοποιούν οι μέθοδοι με εμπλοκή του αποφασίζοντα πριν από την επίλυση - a priori. Έτσι, οι περισσότερες μελέτες στις οποίες ο αποφασίζων εκφράζει προτίμηση πριν από την επίλυση δεν αντιμετωπίζουν τα προβλήματα με διαφορετικό τρόπο από ότι η μονοκριτηριακή βελτιστοποίηση. Πρακτικά, η πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση εξετάζεται σαν μία εφαρμογή μονοκριτηριακής που ενσωματώνει πολλά κριτήρια. Οι μελέτες δείχνουν να επικεντρώνονται στα μέσα μετατροπής πολλαπλών κριτηρίων σε ένα και εξετάζουν διαφορετικές τεχνικές τέτοιων μετατροπών, παρέχοντας επιχειρήματα για την επιλογή των πιο

πλεονεκτικών. Ωστόσο, σε κάθε περίπτωση, η μονοκριτηριακή θεώρηση αποτελεί υπό-περίπτωση της πολυκριτηριακής και η δεύτερη δεν συνιστά μία απλή επέκταση της πρώτης.

Στην ανάλυση ενός κριτηρίου η επίδοση του υπό μελέτη προβλήματος αντιπροσωπεύεται από ένα βαθμωτό μέγεθος, την αντικειμενική συνάρτηση, και χρησιμοποιείται στην αξιολόγηση των εναλλακτικών λύσεων. Το εν λόγω μέτρο έχει θεωρηθεί καθολικό, με την έννοια ότι αποτυπώνει μια αντιπροσωπευτική εικόνα του προβλήματος. Ακόμη και αν περιλαμβάνει περισσότερα του ενός κριτήρια, έστω $\{P_1, \dots, P_m\}$, αυτά είναι ενταγμένα σε μια ενιαία, συνδυασμένη αριθμητική έκφραση P . Στην περίπτωση αυτή, οι εναλλακτικές λύσεις δεν αξιολογούνται ως προς τα επιμέρους κριτήρια, παρά μόνο ως προς την συνάθροιση αυτών, μέσω της αντικειμενικής συνάρτησης. Αυτή η διαδικασία χειρισμού πολυκριτηριακών προβλημάτων είναι απλούστερη και βασίζεται στις προτιμήσεις του χρήστη, ωστόσο αποτελεί και μία πιο υποκειμενική μέθοδο. Για παράδειγμα μία απλή μέθοδος και διαδεδομένη μέθοδος στην κατηγορία αυτή είναι ο σχηματισμός μίας σύνθετης αντικειμενικής συνάρτησης σαν το σταθμισμένο άθροισμα των κριτηρίων, όπου το βάρος του κάθε κριτηρίου να είναι ανάλογο με τον παράγοντα προτίμησης που έχει δοθεί στο εν λόγω κριτήριο. Αυτή η μέθοδος μετατρέπει ένα πολυκριτηριακό πρόβλημα σε ένα μονοκριτηριακό και έτσι είναι δυνατή η εύρεση μία συγκεκριμένης συμβιβαστικής λύσης. Αυτό συνεπάγεται την απώλεια σημαντικής πληροφορίας στην αξιολόγηση των πτυχών του προβλήματος, που ενδεχομένως να επέβαλλε μια διαφορετική πορεία αναζήτησης. Πράγματι, όταν σε ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης, διατυπωμένου στην τυπική βαθμωτή μορφή, εμπλέκονται πολλαπλά κριτήρια, ο χώρος αποτίμησης διαμορφώνεται ανάλογα με την μαθηματική διατύπωση του συνδυασμένου μέτρου επίδοσης. Το γεγονός αυτό, εκτός του ότι εμποδίζει τη διερεύνηση των επιμέρους κριτηρίων, εισάγει έντονη υποκειμενικότητα, σε μια αντικειμενική, θεωρητικά, διαδικασία, όπως είναι η βελτιστοποίηση.

Τα μειονεκτήματα της μονοκριτηριακής προσέγγισης γίνονται εμφανή όταν τα κριτήρια επίδοσης του συστήματος είναι αντικρουόμενα (conflicting) ή/και μη σύμμετρα (non-commensurable), δηλαδή μη αποτυπωμένα σε κοινή μονάδα

μέτρησης. Στην πρώτη περίπτωση, η διαδικασία περιπλέκεται, αφού η βελτίωση ορισμένων κριτηρίων οδηγεί σε αναπόφευκτη επιδείνωση των υπολοίπων. Αναγκαστικά, ο ορισμός του μέτρου επίδοσης υποκρύπτει έναν αυθαίρετο «συμβιβασμό» μεταξύ των κριτηρίων, που περιγράφεται μαθηματικά (χωρίς ωστόσο να ερμηνεύεται ξεκάθαρα) από τον τρόπο που γίνεται η αριθμητική συνάθροιση των κριτηρίων στην ενιαία αντικειμενική συνάρτηση.

Από τα παραπάνω προκύπτει η ανάγκη αναδιατύπωσης του προβλήματος βελτιστοποίησης, ώστε τα επιμέρους κριτήρια να αντιπροσωπεύονται με σαφήνεια στο μέτρο επίδοσης του προβλήματος, καθώς και στο μαθηματικό της ανάλογο, δηλαδή την αντικειμενική συνάρτηση. Η απαίτηση αυτή επιφέρει θεμελιώδεις διαφοροποιήσεις στον ορισμό του βέλτιστου, και συνακόλουθα στις στρατηγικές αναζήτησης και αποτίμησης λύσεων. Συνεπώς, όπως είδαμε στην πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση, η προσπάθεια επικεντρώνεται στην εύρεση του συνόλου των βέλτιστων λύσεων θεωρώντας όλα τα κριτήρια που είναι σημαντικά. Γίνεται δηλαδή, όπως ορίστηκε στις βασικές έννοιες, αναζήτηση ενός συνόλου σημείων τα οποία είναι βέλτιστα με τον ορισμό του Pareto, κατά τον οποίο η βελτίωση της τιμής ενός κριτηρίου απαιτεί την χειροτέρευση της επίδοσης τουλάχιστον ενός άλλου κριτηρίου. Σε δεύτερη φάση, με βάση τα αποτελέσματα, ο χρήστης μπορεί να αξιοποιήσει υψηλότερου επιπέδου ποιοτικά κριτήρια για να λάβει μία απόφαση, δηλαδή ο αποφασίζων εκφράζει την προτίμησή του μετά το τέλος διαδικασίας υπολογισμού λύσεων. Εδώ εντοπίζεται και η θεμελιώδης διαφορά ανάμεσα στις δύο μεθόδους. Στη μέθοδο με χρήση της σύνθετης αντικειμενικής συνάρτησης, ο καθορισμός του διανύσματος προτίμησης γίνεται χωρίς γνώση των πιθανών συνεπειών στα αποτελέσματα της βελτιστοποίησης. Ωστόσο, στην πολυκριτηριακή μέθοδο, οι πληροφορίες του προβλήματος χρησιμοποιούνται για την επιλογή μίας από τις λύσεις της βελτιστοποίησης. Αυτή η διαφορά καθιστά την πολυκριτηριακή μέθοδο με έκφραση προτίμησης μετά το τέλος της διαδικασίας υπολογισμού λύσεων, περισσότερο μεθοδική, πρακτική και λιγότερο υποκειμενική. Σε προβλήματα δύο ή τριών κριτηρίων η γραφική παρουσίαση των λύσεων είναι σχετικά απλή και οι μεθοδολογίες που στοχεύουν στον εντοπισμό όλων των λύσεων του μετώπου Pareto και στην εκ των υστέρων (a posteriori) επιλογή των τελικών βέλτιστων

λύσεων από τον αποφασίζοντα είναι σχετικά εύκολη διαδικασία, αλλά και πιο αντικειμενική και πλήρης. Σε περισσότερες διαστάσει όμως η γραφική παράσταση του μετώπου Pareto είναι αρκετά πολύπλοκη και δύσκολα δίνει χρήσιμη πληροφορία στον αποφασίζοντα.

Φυσικά η καταλληλότητα της εφαρμογής μιας μεθόδου πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης σε ένα συγκεκριμένο πρόβλημα εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά του προβλήματος, τα χαρακτηριστικά του αποφασίζοντα, την εμπειρία του αναλυτή και τα διαθέσιμα υπολογιστικά εργαλεία. Αν σε ένα πρόβλημα δεν υπάρχει γνώση ως προς τη σπουδαιότητα των κριτηρίων, πριν από την έναρξη της διαδικασίας επίλυσης, τότε είναι προτιμότερες οι μεθοδολογίες που εντοπίζουν το σύνολο των Pareto βέλτιστων λύσεων. Αντίθετα, σε περίπτωση που ο αποφασίζοντας γνωρίζει από την αρχή ποιο είναι το κριτήριο που επιθυμεί να κυριαρχήσει ως προς τη σπουδαιότητά του, τότε είναι προτιμότερο να χρησιμοποιήσει μονοκριτήρια βελτιστοποίηση και να εστιάσει σε μια συμβιβαστική λύση. Η μέθοδος που αναπτύσσεται στην παρούσα διατριβή ανήκει στις μεθόδους παραγωγής (generation methods) του πολυκριτηριακού γραμμικού προγραμματισμού (Hwang & Masud, 1979). Οι μέθοδοι παραγωγής είναι χαρακτηριστικές a posteriori μέθοδοι, όπου παράγεται πρώτα το σύνολο των ικανών λύσεων του προβλήματος και στη συνέχεια καλείται ο αποφασίζων να εκφράσει τις προτιμήσεις του. Το μειονέκτημα των μεθόδων αυτών είναι ότι δεν μπορούν να εφαρμοσθούν σε μεγάλα προβλήματα λόγω του αυξημένου υπολογιστικού φορτίου που καθιστούν τον υπολογισμό του συνόλου των ικανών λύσεων πολύ χρονοβόρο ή και πρακτικά αδύνατο. Το πλεονέκτημά τους είναι ότι παρέχουν πλήρη πληροφόρηση στον αποφασίζοντα, ενώ δεν απαιτείται η εμπλοκή του στο πρώτο στάδιο, της παραγωγής των ικανών λύσεων η οποία γίνεται απολύτως αντικειμενικά (Evans, 1984). Με τη ραγδαία αύξηση της υπολογιστικής ισχύος, όλο και μεγαλύτερα προβλήματα πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης είναι δυνατό να επιλυθούν με μεθόδους παραγωγής (Μαυρωτάς, 2000).

2.1.3 Βασικές αρχές πολυστοχικής βελτιστοποίησης

2.1.3.1 Κυρτότητα προβλημάτων

Η *κυρτότητα* (convexity) αποτελεί μία από τις πλέον σημαντικές μαθηματικές έννοιες, με ιδιαίτερη σημασία στη βελτιστοποίηση. Αυτό γιατί η κυρτότητα υποδηλώνει ότι κάθε γραμμικός συνδυασμός εγγυάται τη γέννηση σημείων εντός του χώρου αναζήτησης D , και συνακόλουθα θεωρείται δεδομένη η παραγωγή εφικτών λύσεων (Κρασόπουλος, 2017). Αρχικά, δίνεται ο ορισμός της κυρτότητας για πεδία (sets), και στη συνέχεια γενικεύεται για συναρτήσεις πολλών μεταβλητών, σύμφωνα με τον (Deb K., 2001).

Ένα n -διάστατο πεδίο S είναι κυρτό εφόσον:

$$\lambda x_1 + (1 - \lambda) x_2 \in S$$

για κάθε $x_1, x_2 \in S$ και για κάθε $\lambda \in [0, 1]$. Η παραπάνω σχέση ονομάζεται *κυρτός συνδυασμός* και υποδηλώνει ότι το ευθύγραμμο τμήμα που ενώνει το ζεύγος σημείων $\{x_1, x_2\} \in S$ κείται αποκλειστικά στο πεδίο S .

Εξ ορισμού, κάθε υπερ-ορθογώνιο θεωρείται κυρτό, ενώ κάθε διακριτό πεδίο είναι μη κυρτό. Από τον (Marlow, 1993) αποδεικνύεται ότι η τομή δύο κυρτών πεδίων είναι εξ ορισμού κυρτό πεδίο, ενώ η ένωση δύο κυρτών πεδίων δεν δίνει απαραίτητα κυρτό πεδίο. Σύμφωνα με την τελευταία συνθήκη πρέπει να επισημανθεί πως ένα μη κυρτό πεδίο μπορεί να αποτελείται από την ένωση κυρτών πεδίων.

Μία συνάρτηση $f : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ είναι (Deb K., 2001):

- μία *κυρτή* συνάρτηση αν για οποιοδήποτε ζεύγος λύσεων $x_1, x_2 \in \mathbb{R}^n$, ισχύει η ακόλουθη συνθήκη για κάθε $\lambda \in [0, 1]$:

$$\lambda f(x_1) + (1 - \lambda) f(x_2) \geq f[\lambda x_1 + (1 - \lambda) x_2]$$

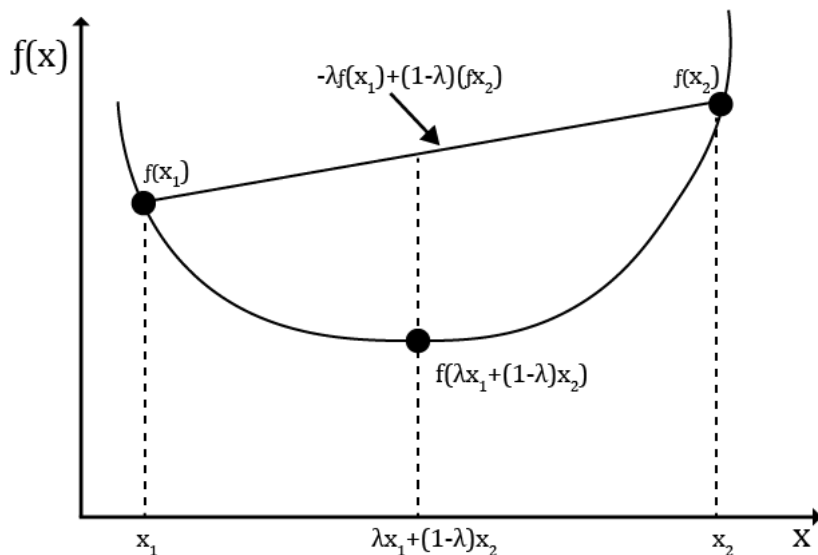
Εφόσον η συνάρτηση είναι κυρτή, τότε το ευθύγραμμο τμήμα που ενώνει δύο τυχαία σημεία του πεδίου ορισμού της δεν βρίσκεται ποτέ κάτω από το γράφημά της (1). Επίσης βάσει του ορισμού που δόθηκε, για μία κυρτή συνάρτηση το τοπικό ελάχιστο, είναι πάντοτε και το ολικό ελάχιστο.

- μία κοίλη συνάρτηση αν για οποιοδήποτε ζεύγος λύσεων $x_1, x_2 \in \mathbb{R}^n$, ισχύει η ακόλουθη συνθήκη για κάθε $\lambda \in [0, 1]$:

$$\lambda f(x_1) + (1 - \lambda) f(x_2) \leq f[\lambda x_1 + (1 - \lambda) x_2]$$

Ομοίως, αν η συνάρτηση είναι κοίλη, τότε το ευθύγραμμο τμήμα που ενώνει δύο τυχαία σημεία του πεδίου ορισμού της δεν βρίσκεται ποτέ πάνω από το γράφημά της. Στην προκειμένη περίπτωση το τοπικό μέγιστο είναι πάντοτε και το ολικό μέγιστο. Παρατηρούμε ότι μια συνάρτηση f είναι κοίλη, αν η $(-f)$ είναι κυρτή.

Σε κάθε άλλη περίπτωση, η συνάρτηση είναι *μη-κυρτή* (*non-convex*). Αν η συνάρτηση είναι μη-κυρτή, τότε το ευθύγραμμο τμήμα που ενώνει δύο τυχαία σημεία του πεδίου ορισμού της βρίσκεται άλλοτε κάτω και άλλοτε πάνω από το γράφημά της. Σε αντίθεση με την κυρτή συνάρτηση που εμφανίζει μόνο ένα ακρότατο, κάθε μη κυρτή συνάρτηση περιλαμβάνει περισσότερα από ένα ακρότατα, που απεικονίζονται ως κορυφές ή βυθίσματα του χώρου αποτίμησης. Εκτός από το ολικό ακρότατο, τα υπόλοιπα σημεία αντιστοιχούν σε τοπικά ελάχιστα ή/και μέγιστα.



Σχήμα 2-1: Παράδειγμα κυρτής συνάρτησης. Μία γραμμή που ενώνει τις τιμές της συνάρτησης σε δύο σημεία x_1, x_2 πάντοτε υπερεκτιμά τη τιμή της κυρτής συνάρτησης.

2.1.3.2 Βελτιστοποίηση υπό ή άνευ περιορισμών

Στη γενικότερη περίπτωση όπου ο εφικτός χώρος ταυτίζεται με τον n –διάστατο ευκλείδειο χώρο, $S \equiv R^n$, το πρόβλημα βελτιστοποίησης διατυπώνεται *άνευ περιορισμών* (unconstrained optimization).

Ωστόσο, τα προβλήματα που συναντώνται στην περίπτωση πραγματικών εφαρμογών απαιτούν συνηθέστερα *βελτιστοποίηση υπό περιορισμούς* (constrained optimization). Σε αυτές τις περιπτώσεις, ο εφικτός χώρος S περιγράφεται από ένα σύνολο μαθηματικών *περιορισμών* (constraints) το οποίο λαμβάνει την παρακάτω μορφή:

$$c(x_1, x_2, \dots, x_n) \leq, =, \geq 0$$

Επιπλέον οι περιορισμοί ενδέχεται να διατυπώνονται υπό την μορφή διπλής ανισότητας με ανώτερα και κατώτερα όρια, εκφράζοντας ενδεικτικά όρια διακύμανσης παραμέτρων ή περιορισμούς τύπου χωρητικότητας. Οι περιορισμοί ορίου, ή *ρητοί* (explicit) περιορισμοί, όπως απαντώνται στη βιβλιογραφία διατυπώνονται στην ακόλουθη μορφή:

$$l_j \leq x_j \leq u_j$$

Όπως θα γίνει φανερό και στη συνέχεια με την περιγραφή της έννοιας του εφικτού χώρου, η ύπαρξη περιορισμών αυξάνει σημαντικά την πολυπλοκότητα του προβλήματος, όχι μόνο επειδή καθιστά τις ενδιάμεσες υπολογιστικές διαδικασίες σημαντικά πιο πολύπλοκες αλλά και επειδή απαιτεί πολυάριθμο αριθμό δοκιμών σε σύγκριση με την βελτιστοποίηση της αυτής συνάρτησης χωρίς περιορισμούς (Αποστολοπούλου, 2011).

2.1.3.3 Η έννοια της εφικτότητας στο χώρο αποτίμησης

Η ύπαρξη περιορισμών εισάγει επιπλέον απαιτήσεις στη διαδικασία βελτιστοποίησης, δεδομένου ότι επιβάλλει την αναζήτηση εφικτών, αποκλειστικά, λύσεων. Κάθε διάνυσμα μεταβλητών $x \in R^n$ που δεν ικανοποιεί τους περιορισμούς που θεσπίζει το πρόβλημα βελτιστοποίησης θεωρείται *μη εφικτό* (non-feasible).

Στην περίπτωση προβλημάτων με περιορισμούς αναζητείται το σημείο που μεγιστοποιεί ή ελαχιστοποιεί τη τιμή της συνάρτησης εντός του εφικτού χώρου (Van Veldhuizen & Garry, 2000). Συνηθέστερα, η υπό περιορισμούς βέλτιστη λύση κείται στο όριο του εφικτού χώρου, συναντάται δηλαδή στο σημείο τομής κάποιων από τους περιορισμούς του προβλήματος. Οι περιορισμοί αυτοί καλούνται *δεσμευτικοί* (binding). Οι υπόλοιποι περιορισμοί, οι οποίοι δεν επηρεάζουν την επίλυση του προβλήματος, καλούνται *χαλαροί* (slack). Στην περίπτωση αυτή, κάθε εφικτό σημείο που δεν επαληθεύει τους δεσμευτικούς περιορισμούς καλείται *υποβέλτιστο* (sub-optimal).

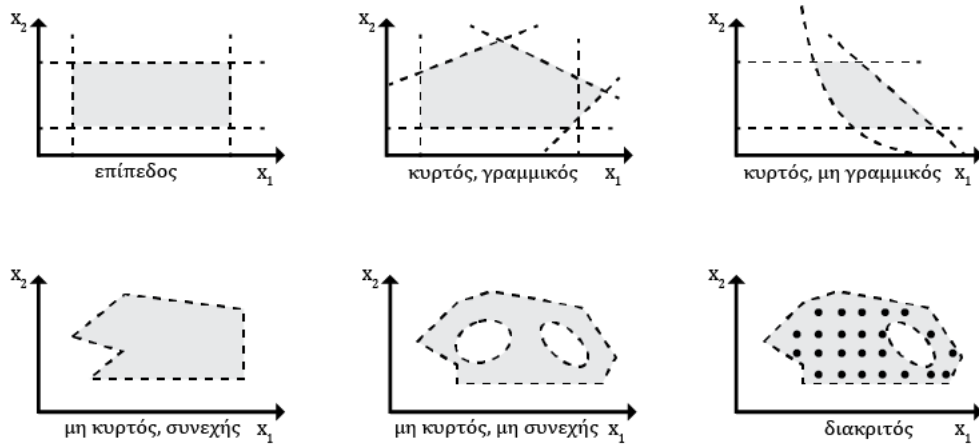
Ταυτόχρονα, σε προβλήματα με περιορισμούς, είναι πιθανό το ολικό ακρότατο της αντικειμενικής συνάρτησης να είναι μη εφικτό, εφόσον βρίσκεται εκτός των ορίων του χώρου αναζήτησης. Κάθε μη εφικτό σημείο που έχει καλύτερη επίδοση από το βέλτιστο καλείται *υπερβέλτιστο* (over – optimal) (Μπενιάκαρ, 2014).

2.1.3.4 Μορφές εφικτού χώρου και χώρου αποτίμησης

Σύμφωνα με τα όσα ορίστηκαν παραπάνω ο χώρος αποτίμησης αποτελεί ουσιαστικά τη γεωμετρική απεικόνιση του εφικτού χώρου (S). Η κατανόηση της γεωμετρίας του χώρου αποτίμησης της αντικειμενικής συνάρτησης θεωρείται κομβικής σημασίας και σημαντική προϋπόθεση για τον επιτυχή χειρισμό του προβλήματος βελτιστοποίησης, ειδικά στην περίπτωση πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης η οποία θα εξεταστεί στη συνέχεια. Η γεωμετρία του χώρου αποτίμησης και ως επακόλουθο η στρατηγική αναζήτησης λύσεων διαφοροποιείται αναλόγως του τύπου των περιορισμών (Ευστρατιάδης, 2008).

Οι βασικές κατηγορίες εφικτών χώρων που συναντώνται σε προβλήματα βελτιστοποίησης, είτε αυτοτελώς είτε σε αντίστοιχους συνδυασμούς είναι οι εξής:

- Συνεχείς ή διακριτοί χώροι
- Γραμμικοί ή μη γραμμικοί χώροι
- Κυρτοί ή μη κυρτοί χώροι

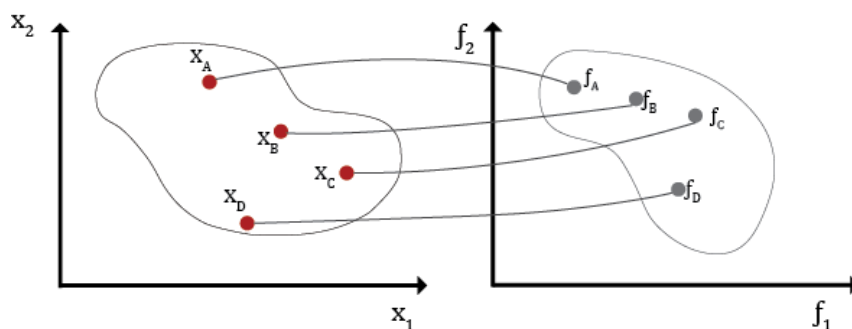


Σχήμα 2-2: Τυπικές μορφές δυδιάστατων εφικτών χώρων

2.1.3.5 Χώρος των αντικειμενικών συναρτήσεων

Στην περίπτωση της πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης οι αντικειμενικές συναρτήσεις σχηματίζουν ένα χώρο πολλών διαστάσεων, κατά αναλογία με τον χώρο των μεταβλητών απόφασης (εφικτός χώρος). Σε αντίθεση με τη μονοκριτηριακή βελτιστοποίηση όπου η διαδικασία επίλυσης επικεντρώνεται στην εξέταση του χώρου των μεταβλητών απόφασης R^n , στην πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση έχει ιδιαίτερη σημασία ο χώρος των αντικειμενικών συναρτήσεων R^M . Αυτό γιατί στη διαδικασία επίλυσης προβλημάτων πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης είναι σημαντική η εξέταση των τιμών των αντικειμενικών συναρτήσεων που προκύπτουν από κάθε λύση. Επομένως είναι αρκετά πιο βοηθητική η απεικόνιση του προβλήματος βελτιστοποίησης στο χώρο των αντικειμενικών συναρτήσεων αντί του χώρου των μεταβλητών απόφασης. Αυτή είναι μια από τις πιο ουσιαστικές διαφορές μεταξύ μονοκριτηριακής και πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης. Ο χώρος των αντικειμενικών συναρτήσεων ονομάζεται σύμφωνα με τα προηγούμενα χώρος αποτίμησης. Κάθε λύση x στο χώρο των μεταβλητών απόφασης αντιστοιχίζεται με ένα σημείο του χώρου αποτίμησης που συμβολίζεται ως $f(x) = z = (z_1, z_2, \dots, z_M)^T$, όπου z_m η τιμή της m αντικειμενικής συνάρτησης. Το διάνυσμα z ορίζεται ως *διάνυσμα τιμών των κριτηρίων (criterion vector)*. Η αντιστοίχιση γίνεται μεταξύ ενός n -διάστατου διανύσματος λύσης (θεωρώντας n μεταβλητές απόφασης) και ενός M -διάστατου διανύσματος στόχου (θεωρώντας M αντικειμενικές συναρτήσεις). Επισημαίνεται εδώ ότι στην πλειοψηφία των προβλημάτων βελτιστοποίησης το πλήθος M των αντικειμενικών συναρτήσεων είναι μικρότερο από το πλήθος n των μεταβλητών

απόφασης, γεγονός που καθιστά τη γραφική απεικόνιση στο χώρο των αντικειμενικών συναρτήσεων ευκολότερη.



Σχήμα 2-3: Σχηματική αναπαράσταση αντιστοίχισης ενός χώρου μεταβλητών απόφασης τριών διαστάσεων σε έναν χώρο αποτίμησης δύο διαστάσεων

2.1.3.6 Η έννοια της μερικής διάταξης

Καθώς στα πολυκριτηριακά προβλήματα γίνεται συνήθως αναφορά σε διανύσματα και χώρους δύο και τριών διαστάσεων (ή συχνά και παραπάνω), η έννοια της διάταξης είναι συγκεχυμένη εν συγκρίσει με την απόλυτη διάταξη που προσφέρει η μια διάσταση και οι πραγματικοί αριθμοί, καθώς δεν μπορούν να εφαρμοστούν άμεσα οι τελεστές σύγκρισης σε διανύσματα. Αυτό το πρόβλημα είναι και ο ακρογωνιαίος λίθος στις δυσκολίες λήψης αποφάσεων, καθώς άμεση συνέπεια του, είναι η αδυναμία απόλυτα αντικειμενικής αξιολόγησης των λύσεων, και αδυναμία ορισμού της έννοιας του βέλτιστου. Σαν πρώτο βήμα ορίζεται η έννοια της μερικής διάταξης (partial ordering) των διανυσμάτων, ως ακολούθως. Για κάθε ζεύγος διανυσμάτων u και v , ορίζονται οι ακόλουθες σχέσεις μερικής διάταξης, βάσει της σύγκρισης των συνιστωσών των διανυσμάτων:

- $u = v$ αν $u_i = v_i$ για κάθε i
- $u \leq v$ αν $u_i \leq v_i$ για κάθε i
- $u < v$ αν $u_i \leq v_i$ για κάθε i και $u_i < v_i$ για ένα τουλάχιστον i
- $u \sim v$ αν δεν ισχύει τίποτα από τα παραπάνω

Στην τελευταία περίπτωση δηλαδή αν δεν ικανοποιείται καμία από τις τρεις πρώτες συνθήκες, τότε τα διανύσματα u και v αναφέρονται ως *αδιάφορα* (indifferent).

2.1.3.7 Η έννοια της κυριαρχίας

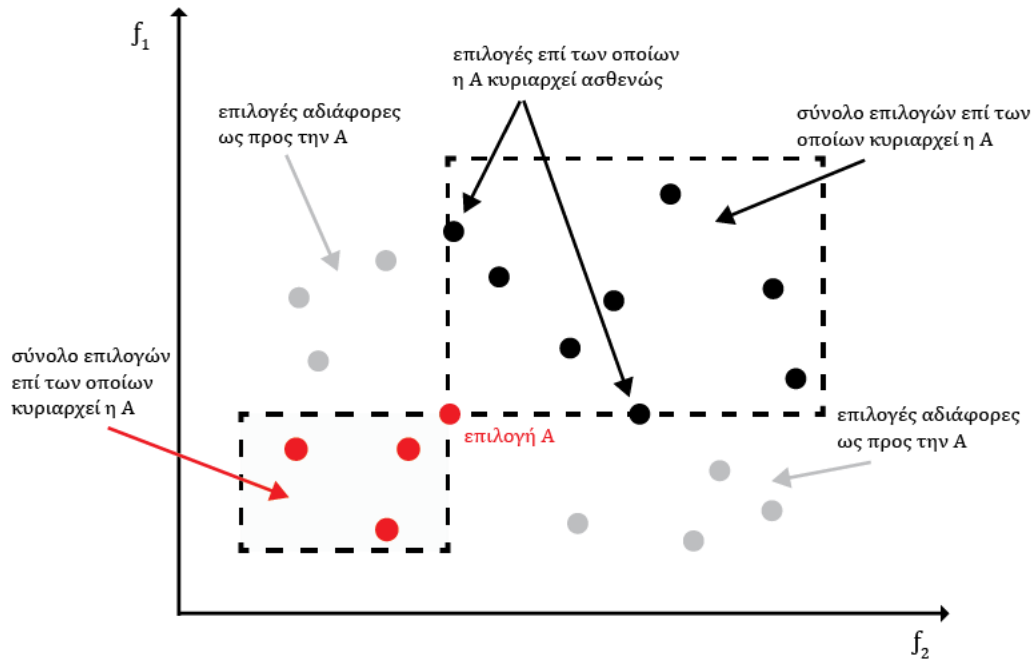
Βασιζόμενοι στη μερική διάταξη, και επεκτείνοντας τις παραπάνω σχέσεις, ορίζουμε τις σχέσεις *κυριαρχίας* (dominance) μεταξύ δύο εφικτών λύσεων a, b ενός προβλήματος πολυκριτηριακής ελαχιστοποίησης:

- Το a κυριαρχεί ισχυρώς ως προς το b αν $f(a) < f(b)$
- Το a κυριαρχεί ασθενώς ως προς το b αν $f(a) \leq f(b)$
- Το a είναι αδιάφορο ως προς το b αν $f(a) \sim f(b)$

Στο Σχήμα 2-4 απεικονίζονται οι δυνατές σχέσεις κυριαρχίας σε ένα χώρο αποτίμησης $F \subseteq R^2$ ενός υποθετικού προβλήματος ελαχιστοποίησης δύο κριτηρίων. Αν θεωρηθεί ένα σημείο A που αντιστοιχεί στην επιλογή αναφοράς, τότε, με βάση τον ορισμό της κυριαρχίας, το πεδίο F χωρίζεται σε τρεις υποπεριοχές:

- την υποπεριοχή κάτω αριστερά από το σημείο A , που περιλαμβάνει επιλογές που κυριαρχούν επί της αντίστοιχης επιλογής αναφοράς.
- την υποπεριοχή πάνω δεξιά από το σημείο A , που περιλαμβάνει επιλογές που κυριαρχούνται από την αντίστοιχη επιλογή αναφοράς. Στα όρια του χώρου βρίσκονται οι λύσεις επί των οποίων η A κυριαρχεί ασθενώς, αφού υπάρχει ένα κριτήριο τουλάχιστον για το οποίο οι λύσεις έχουν ίδια τιμή.
- την υποπεριοχή πάνω αριστερά και κάτω δεξιά από το σημείο A , που περιλαμβάνει επιλογές που είναι αδιάφορες ως προς την αντίστοιχη επιλογή αναφοράς.

Είναι προφανές ότι ο τρόπος διαχωρισμού του πεδίου αποτίμησης εξαρτάται από το σημείο αναφοράς. Επιπλέον, ο προσανατολισμός των τριών υποπεριοχών εξαρτάται από τον τελεστή βελτιστοποίησης που ορίζεται για κάθε κριτήριο (min ή max). Με τη συμβατική θεώρηση της ταυτόχρονης ελαχιστοποίησης όλων των κριτηρίων, η βελτίωση σε σχέση με μιας επιλογή αναφοράς επιτυγχάνεται αποκλειστικά προς την κάτω αριστερά περιοχή του πεδίου αποτίμησης.



Σχήμα 2-4: Γεωμετρική απεικόνιση των δυνατών σχέσεων κυριαρχίας ως προς ένα τυχαίο σημείο A του χώρου αποτίμησης σε ένα πρόβλημα ελαχιστοποίησης δύο κριτηρίων

2.1.3.8 Ισχυρή και ασθενής κυριαρχία

Σε προβλήματα βελτιστοποίησης με αντικρουόμενα κριτήρια, η σχέση κυριαρχίας μεταξύ δύο εφικτών σημείων μπορεί να είναι είτε ισχυρή ή ασθενής. Για ένα πρόβλημα ελαχιστοποίησης, ένα σημείο $x^* \in X$ είναι:

- *Ασθενώς μη κυριαρχούμενο* (weakly non-dominated) αν και μόνο αν δεν υπάρχει άλλο εφικτό σημείο $x \in X$ τέτοιο ώστε:

$$f_i(x^*) \leq f_i(x), \text{ για κάθε } i = 1, \dots, m.$$

- *Ισχυρά μη κυριαρχούμενο* (strongly non-dominated) αν και μόνο αν δεν υπάρχει άλλο εφικτό σημείο $x \in X$ τέτοιο ώστε:

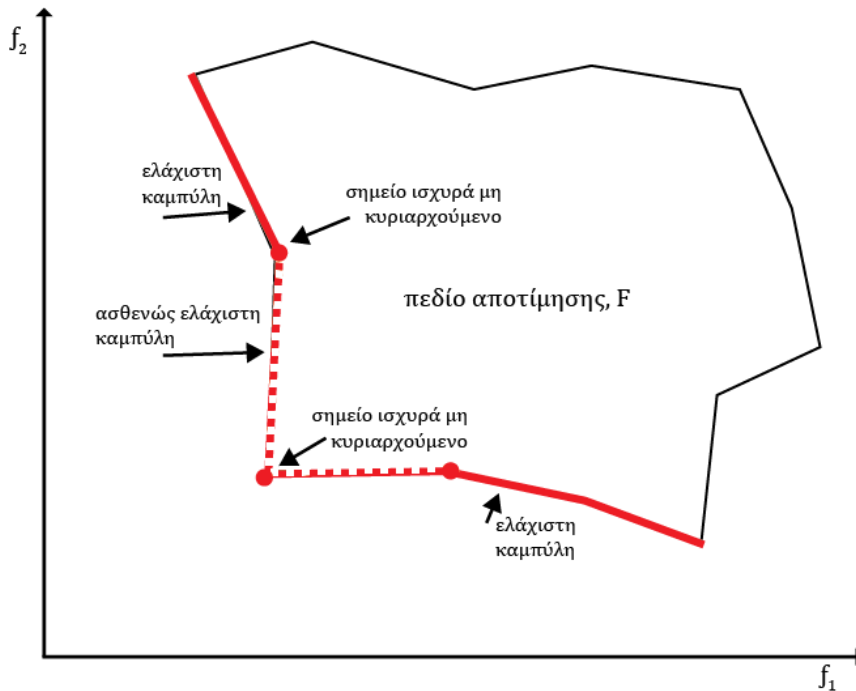
$$f_i(x^*) \leq f_i(x), \text{ για κάθε } i = 1, \dots, m, \text{ με}$$

$$f_i(x^*) < f_i(x) \text{ για τουλάχιστον ένα } i$$

Με βάση τους παραπάνω ορισμούς, κάθε σημείο που είναι ισχυρώς μη κυριαρχούμενο είναι και ασθενώς μη κυριαρχούμενο, χωρίς απαραίτητα να ισχύει το αντίστροφο.

Η απεικόνιση των ισχυρώς μη κυριαρχούμενων σημείων στο χώρο αποτίμησης ονομάζεται ελάχιστη καμπύλη (minimal curve), ενώ η απεικόνιση των ασθενώς

μη κυριαρχούμενων σημείων ονομάζεται ασθενώς ελάχιστη καμπύλη (weakly minimal curve). Όπως φαίνεται στο Σχήμα 2-5, η ασθενώς ελάχιστη καμπύλη είναι παράλληλη σε έναν τουλάχιστον άξονα του πεδίου τιμών. Σημειώνεται ότι το κάτω αριστερά σημείο, το οποίο βρίσκεται ακριβώς στην τομή των δύο ασθενώς ελάχιστων καμπυλών, είναι ισχυρά μη κυριαρχούμενο.



Σχήμα 2-5: Γεωμετρική ερμηνεία της ελάχιστης (συνεχής γραμμής) και της ασθενώς ελάχιστης καμπύλης (διακεκομμένη γραμμή) σε ένα πρόβλημα δύο κριτηρίων

Για τις λύσεις που βρίσκονται κατά μήκος της ασθενώς ελάχιστης καμπύλης (διακεκομμένη γραμμή) παρατηρείται ότι σε σύγκριση με κάθε άλλη ισχυρά μη κυριαρχούμενη λύση δεν υπάρχει κάποιο κριτήριο ως προς το οποίο να υπερτερούν. Δεδομένου ότι υπάρχουν άλλες λύσεις που δίνουν καλύτερο αποτέλεσμα ως προς ένα τουλάχιστον κριτήριο η επιλογή κάποιας λύσης εντός της ασθενώς ελάχιστης καμπύλης δεν παρέχει κανένα πλεονέκτημα στον αποφασίζοντα και για τον λόγο αυτό, για τα περισσότερα πρακτικά προβλήματα, η ασθενώς ελάχιστη καμπύλη δεν παρουσιάζει ενδιαφέρον. Τέλος αναφέρεται πως η ένωση της ελάχιστης και ασθενώς ελάχιστης καμπύλης ονομάζεται μέτωπο Pareto. Η έννοια του μετώπου Pareto παρουσιάζεται αναλυτικά στη συνέχεια.

2.1.3.9 Εναλλακτικές άριστες λύσεις

Όταν η άριστη τιμή μιας αντικειμενικής συνάρτησης προκύπτει από διαφορετικές λύσεις $x_1^*, x_2^*, \dots, x_k^*$ τότε λέμε ότι η συγκεκριμένη αντικειμενική συνάρτηση έχει k εναλλακτικές άριστες λύσεις.

2.1.3.10 Ικανή λύση

Η ύπαρξη περισσότερων της μιας αλληλοσυγκρουόμενων αντικειμενικών συναρτήσεων στα προβλήματα πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης, οδηγεί στην απουσία μίας άριστης λύσης που να βελτιστοποιεί συγχρόνως όλες τις αντικειμενικές, όπως στην μονοκριτηριακή βελτιστοποίηση. Στη συνηθέστερη περίπτωση όπου τα κριτήρια είναι βελτιστοποίησης είναι αντικρουόμενα, κάθε σημείο του χώρου αποτίμησης είναι υποβέλτιστο για ένα τουλάχιστον κριτήριο, και συνεπώς δεν υφίσταται μονοσήμαντα ορισμένη λύση. Προκειμένου λοιπόν να ξεπεραστεί αυτή η δυσκολία, η έννοια της άριστης λύσης της μονοκριτηριακής ανάλυσης αντικαθίσταται στην πολυκριτηριακή ανάλυση από αυτήν της *ικανής ή αποτελεσματικής ή μη κυριαρχούμενης ή κατά Pareto βέλτιστης λύσης* (efficient/dominant/non-dominated/Pareto optimal solution).

Για την περίπτωση ελαχιστοποίησης με πολλαπλά κριτήρια της μορφής:

$$\min [f_1(\mathbf{x}), f_2(\mathbf{x}), \dots, f_M(\mathbf{x})] \text{ s.t. } \mathbf{x} \in S$$

Όπου S είναι η περιοχή εφικτών λύσεων και $f_1(\mathbf{x}), f_2(\mathbf{x}), \dots, f_M(\mathbf{x})$ είναι M αντικειμενικές συναρτήσεις που βρίσκονται σε σύγκρουση η μία με την άλλη,

μια λύση \mathbf{x}^* κυριαρχεί επί μίας άλλης λύσης \mathbf{x} (δηλαδή $\mathbf{x}^* > \mathbf{x}$) και λέγεται *ικανή* εάν οι ακόλουθες δύο συνθήκες ικανοποιούνται:

$$\forall i \in \{1, 2, \dots, M\}, f_i(\mathbf{x}^*) \leq f_i(\mathbf{x})$$

$$\exists k \in \{1, 2, \dots, M\} f_k(\mathbf{x}^*) < f_k(\mathbf{x})$$

$$\text{με } \mathbf{x}, \mathbf{x}^* \in S.$$

Με άλλα λόγια, ορίζεται ότι η λύση \mathbf{x}^* που ανήκει στον εφικτό χώρο $\mathbf{x}^* \in S$ είναι *ικανή* εάν δεν υπάρχει εφικτό διάνυσμα λύσης \mathbf{x} που θα μείωνε την επίδοση σε κάποιο κριτήριο χωρίς να προκαλέσει μία ταυτόχρονη αύξηση σε τουλάχιστον ένα άλλο κριτήριο (υποθέτοντας ότι ο στόχος είναι η ελαχιστοποίηση). Πρέπει να

σημειωθεί ότι, στην περίπτωση της μεγιστοποίησης στην αντικειμενική συνάρτηση, απαιτείται μόνο μία μεταβολή της κατεύθυνσης των ανισώσεων. Σε κάθε περίπτωση (είτε ελαχιστοποίησης, είτε μεγιστοποίησης) κάθε ικανή λύση αντιστοιχεί σε ένα μη βελτιώσιμο διάνυσμα στο χώρο των αντικειμενικών συναρτήσεων, με την έννοια ότι δεν μπορεί να βελτιωθεί η τιμή μιάς αντικειμενικής συνάρτησης χωρίς ταυτόχρονα να χειροτερεύσει τουλάχιστον μία από τις άλλες.

Αντικειμενικός σκοπός της επίλυσης των προβλημάτων πολυκριτηριακού προγραμματισμού είναι, αρχικά, ο προσδιορισμός των ικανών λύσεων και στη συνέχεια η υποστήριξη του αποφασίζοντα ώστε να επιλέξει εκείνη την ικανή λύση που εκφράζει καλύτερα τις προτιμήσεις του. Απαραίτητη προϋπόθεση για να είναι μία λύση ενός τέτοιου προβλήματος αποδεκτή είναι να πρόκειται για ικανή λύση.

2.1.3.11 Ικανή ακραία λύση

Ως *ικανή ακραία λύση* (*efficient extreme solution*) ενός προβλήματος πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης ονομάζεται μια ικανή λύση του προβλήματος που αντιστοιχεί σε ένα ακραίο σημείο του εφικτού χώρου του προβλήματος (*κορυφή*). Μία ακραία λύση αντιστοιχεί σε ακραίο σημείο και στο χώρο των αντικειμενικών συναρτήσεων. Οι ακραίες λύσεις που αντιστοιχούν σε γειτονικές κορυφές στο εφικτό σύνορο ονομάζονται *γειτονικές ακραίες λύσεις* (*adjacent extreme solutions*) (Μαυρωτάς, 2000).

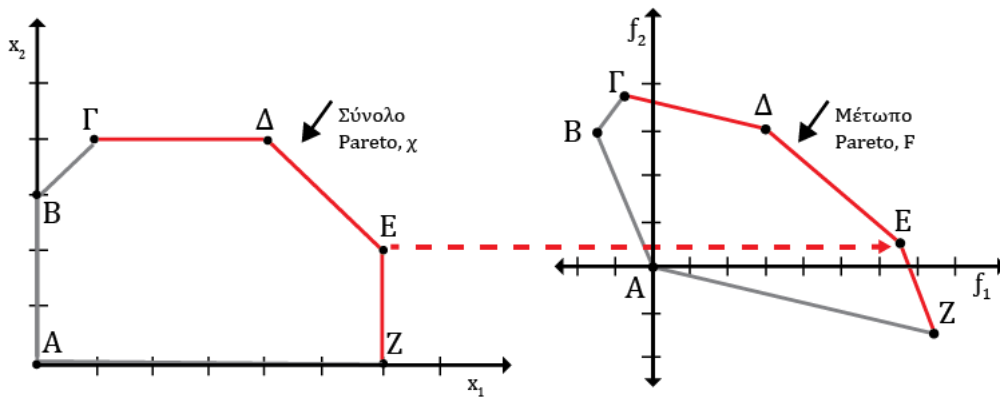
Επίσης, αποδεικνύεται (Steur, 1986) το ακόλουθο θεώρημα στο οποίο στηρίζονται οι αλγόριθμοι παραγωγής του συνόλου των ακραίων ικανών λύσεων.

Το σύνολο των ικανών ακραίων λύσεων στα προβλήματα πολυκριτηριακού γραμμικού προγραμματισμού με συνεχείς μεταβλητές απόφασης είναι διασυνεδεμένο, δηλαδή κάθε μία ικανή ακραία λύση έχει τουλάχιστον μία γειτονική ικανή ακραία λύση.

2.1.3.12 Σύνολο και μέτωπο Pareto

Οι ικανές και αναγκαίες συνθήκες που παρουσιάστηκαν για τον ορισμό μια ικανής λύσης ισχύουν προφανώς στην περίπτωση πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης

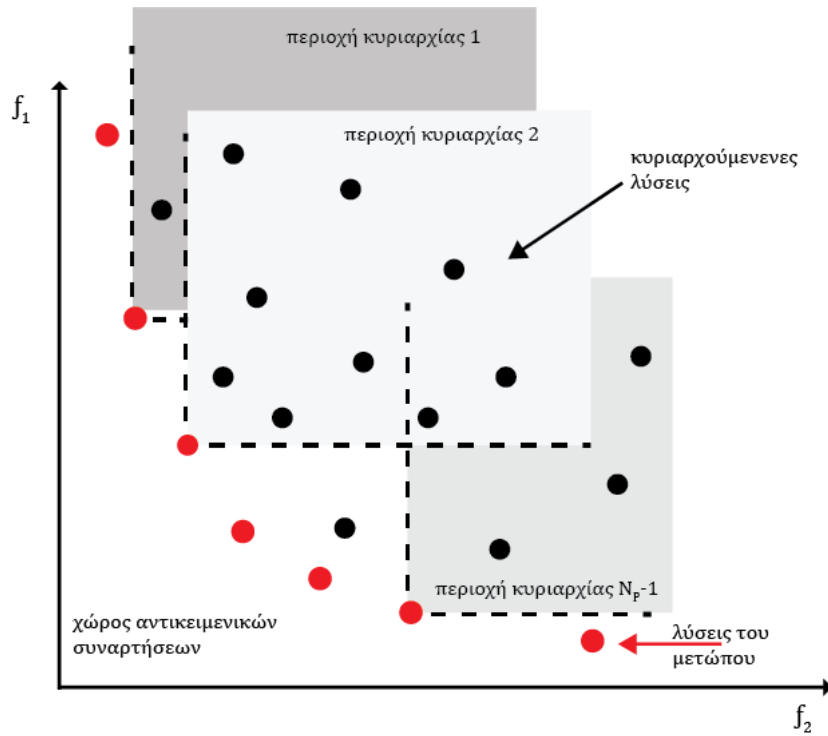
για περισσότερα του ενός εφικτά σημεία. Το σύνολο των ικανών λύσεων, που συμβολίζεται με X^* , είναι γνωστό ως *σύνολο Pareto* (Pareto set).



Σχήμα 2-6: Παράδειγμα γραμμικού πολυκριτηριακού προβλήματος, στο οποίο σύνολο Pareto και το αντίστοιχο μέτωπο απεικονίζονται με παχιά γραμμή.

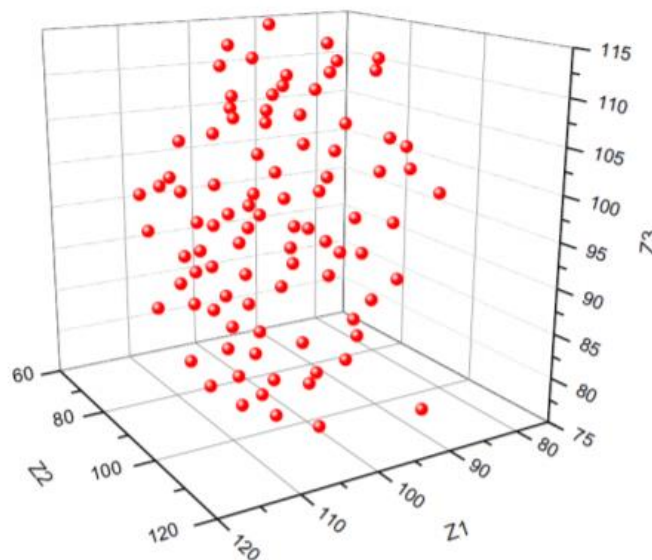
Η απεικόνιση $f(x^*)$ των ικανών λύσεων $x^* \in S$ στο M -διάστατο χώρο αποτίμησης ορίζει ένα υποσύνολο του πεδίου, που ονομάζεται *μέτωπο Pareto* (Pareto Front) και συμβολίζεται με F^* . Η χάραξη του μετώπου F^* προϋποθέτει τον εντοπισμό του συνόλου X^* . Όταν το πεδίο αναζήτησης X είναι συνεχές, τότε και το σύνολο X^* είναι επίσης συνεχές, και συνεπώς μη αριθμήσιμο. Σε αντίθεση λοιπόν με την μονοκριτηριακή βελτιστοποίηση, στην οποία αναζητάται ένα και μόνο ένα σημείο του εφικτού χώρου, όπου και το ολικό ακρότατο της συνάρτησης, στην πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση αναζητάται ένα συνεχές, ως επί το πλείστον, πεδίο, άγνωστης έκτασης και άγνωστης γεωμετρίας. Συνεπώς, το πρακτικό ζητούμενο είναι ο εντοπισμός ενός αντιπροσωπευτικού αριθμού μη κατώτερων λύσεων, που περιγράφουν με ικανοποιητική ακρίβεια το πεδίο X^* , με βάση τις οποίες είναι δυνατή μια προσεγγιστική χάραξη του μετώπου Pareto.

Κάθε σημείο του μετώπου Pareto, είτε κυριαρχεί, είτε είναι αδιάφορο, ως προς κάθε άλλο σημείο του εφικτού υποχώρου αποτίμησης, ενώ είναι αυστηρά αδιάφορο σε σχέση με τα υπόλοιπα σημεία του μετώπου. Όσον αφορά στην μορφή του μετώπου Pareto αυτή σε προβλήματα δύο κριτηρίων ($m=2$), είναι μια καμπύλη, που είναι γνωστή από τις οικονομικές επιστήμες και ως *καμπύλη αντιστάθμισης* (trade-off curve).



Σχήμα 2-7: Απεικόνιση μετώπου Pareto σε ένα πρόβλημα ελαχιστοποίησης δύο κριτηρίων

Σε προβλήματα τριών κριτηρίων, το μέτωπο Pareto είναι μια επιφάνεια, ενώ σε προβλήματα περισσότερων κριτηρίων (έστω M), μολονότι δεν μπορεί να αποτυπωθεί ώστε να γίνει αντιληπτό, εν γένει γενικεύεται και το μέτωπο συνιστά μια υπερ-επιφάνεια $(M - 1)$ -διαστάσεων.



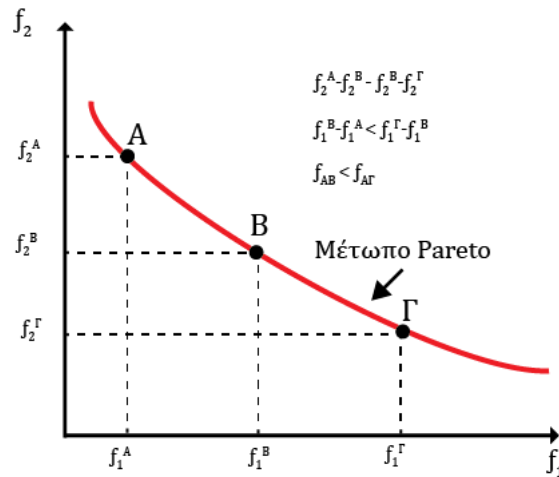
Σχήμα 2-8: Μέτωπο Pareto για τρεις αντικειμενικές συναρτήσεις

2.1.3.13 Η έννοια του λόγου αντιστάθμισης

Έστω ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης δύο κριτηρίων, f_1 και f_2 αντίστοιχα. Προκειμένου να επιτευχθεί η μετάβαση από μια ικανή λύση του μετώπου Pareto σε μια δεύτερη, διαφορετική, ικανή λύση είναι σαφές πως η τιμή του ενός κριτηρίου θα αυξηθεί, ενώ η τιμή του δεύτερου κριτηρίου θα μειωθεί. Με τον όρο λόγος αντιστάθμισης (trade off) ορίζεται η ποσότητα που πρέπει να «θυσιαστεί» από το πρώτο κριτήριο (f_1), οδηγώντας σε χειρότερη για αυτό τιμή, προκειμένου η τιμή του δεύτερου κριτηρίου (f_2) να αυξηθεί κατά μία μονάδα. Για δύο ικανές (βέλτιστες Pareto) λύσεις x_a και x_b , με $f(x_a) = (f_1^a, f_2^a)$ και $f(x_b) = (f_1^b, f_2^b)$ αντίστοιχα, ο λόγος αντιστάθμισης μεταξύ του πρώτου και του δεύτερου κριτηρίου, για μετακίνηση μεταξύ των δύο ικανών λύσεων και με βάση τον παραπάνω ορισμό είναι:

$$t_{1-2} = \frac{f_1^a - f_1^b}{f_2^a - f_2^b} = \frac{1}{t_{2-1}}$$

Η διακύμανση του λόγου αντιστάθμισης κατά μήκος του μετώπου Pareto αποτελεί μια σημαντική πληροφορία, που συμβάλλει στην κατανόηση της γεωμετρίας του καθώς και σε μια εποπτικότερη αξιολόγηση των βέλτιστων λύσεων του πολυκριτηριακού προβλήματος. Όταν το μέτωπο (ή τμήματα του μετώπου) είναι ομαλό, οι λόγοι αντιστάθμισης είναι κοντά στη μονάδα, που σημαίνει ότι οι λύσεις μεταξύ τους μπορούν να θεωρηθούν και από πρακτική πλευρά ισοδύναμες. Αντίθετα, όταν το μέτωπο είναι μη ομαλό, τότε διαμορφώνονται λόγοι αντιστάθμισης πολύ μμεγαλύτεροι της μονάδας (και αντίστοιχα πολύ μικρότεροι της μονάδας, κινούμενοι προς στην αντίθετη κατεύθυνση), που σημαίνει ότι μια μικρή μετατόπιση συνεπάγεται σημαντική μεταβολή της τιμής του ενός κριτηρίου σε σχέση με το άλλο. Ο χειρισμός τέτοιων προβλημάτων παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον στις εφαρμογές της πράξης, καθώς υποδηλώνει ότι τα κριτήρια βελτιστοποίησης είναι έντονα αντικρουόμενα μεταξύ τους (Ευστρατιάδης, 2008).



Σχήμα 2-9: Μεταβολή του λόγου αντιστάθμισης κατά μήκος του μετώπου Pareto.

Συγκεκριμένα από το παράδειγμα του σχήματος Σχήμα 2-9 φαίνεται πως για μετακινήσεις μεταξύ διαφορετικών ικανών λύσεων με δεδομένο και σταθερό «κέρδος» όσον αφορά το ένα κριτήριο (στην προκειμένη το f_2), η ποσότητα που πρέπει να αναλωθεί ως προς το άλλο κριτήριο (συνάρτηση f_1) διαφέρει και είναι ανάλογη της κλίση του μετώπου Pareto. Για τα σημεία x_A, x_B, x_Γ του σχήματος ισχύει ότι $f_2^A - f_2^B = f_2^B - f_2^\Gamma$, ενώ ταυτόχρονα $f_1^B - f_1^A < f_1^\Gamma - f_1^B$ και ως εκ τούτου $t_{A-B} < t_{B-\Gamma}$. Με άλλα λόγια, ο λόγος αντιστάθμισης είναι υψηλότερος, όταν η τιμή του ενός σε σχέση με το άλλο κριτήριο είναι υψηλή.

2.1.3.14 Τελική ή σχετικά βέλτιστη λύση

Από το μέτωπο Pareto προκύπτει ένα σύνολο ισοδύναμων λύσεων από τις οποίες θα πρέπει να επιλεγεί η μια, προτιμητέα λύση, για το συγκεκριμένο πρόβλημα λήψης απόφασης. Ως *τελική ή σχετικά βέλτιστη λύση ή καλύτερα συμβιβαστική λύση* (final or best compromise solution) ορίζεται η ικανή εκείνη λύση που τελικά επιλέγει από το σύνολο των ικανών λύσεων ο αποφασίζων. Το μειονέκτημα εδώ είναι ότι με όποιον τρόπο τελικά προσδιοριστεί η τελική λύση του προβλήματος, αυτή συνιστά μια υποκειμενική απόφαση. Ο όρος «σχετικά» σημαίνει ακριβώς ότι αποτελεί υποκειμενική επιλογή του αποφασίζοντα σε αντίθεση με τη άριστη λύση σε ένα πρόβλημα μονοκριτηριακής βελτιστοποίησης που είναι αντικειμενικά προσδιοριζόμενη. Συνακόλουθα, μολονότι η πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση προσφέρει αρχικά ένα καθαρά αντικειμενικά προσδιορισμένο σύνολο εναλλακτικών επιλογών, δηλαδή το σύνολο Pareto, εν τέλει αποδίδεται στην

μέθοδο ένας υποκειμενικός χαρακτήρας, ο οποίος έγκειται στο γεγονός πως για την επιλογή της τελικής λύσης υφίσταται παρέμβαση από τον λαμβάνοντα απόφαση και έτσι κλονίζεται η αντικειμενικότητα και αμεροληψία της λύσης.

2.1.3.15 Ιδεώδες σημείο

Στην περίπτωση της πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης εξετάζεται συχνά η βελτιστοποίηση κάθε αντικειμενικής συνάρτησης μεμονωμένα. Το σημείο εκείνο του χώρου των αντικειμενικών συναρτήσεων R^p που έχει ως συντεταγμένες τα άριστα των αντικειμενικών συναρτήσεων όπως αυτά προκύπτουν από τις μεμονωμένες βελτιστοποιήσεις ονομάζεται *ιδεώδες σημείο* (ideal point) ή *ιδεώδες διάνυσμα* (ideal vector). Συνήθως πρόκειται για σημείο που αντιστοιχεί σε μη εφικτή λύση (σε περίπτωση αντικρουόμενων μεταξύ τους κριτηρίων δεν υπάρχει εφικτή λύση που να βελτιστοποιεί συγχρόνως όλες τις αντικειμενικές συναρτήσεις). Συχνά αναφέρεται και ως *σημείο ουτοπίας* (utopia point). Το ιδεώδες σημείο χρησιμοποιείται συνήθως ως σημείο αναφοράς για να διερευνηθεί η προσέγγιση σ' αυτό των ικανών λύσεων.

2.2 Βιβλιογραφική ανασκόπηση πολυστοχικών μεθόδων βελτιστοποίησης με βάση το στάδιο εμπλοκής του αποφασίζοντα

Η συμμετοχή του αποφασίζοντος στην πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση είναι όπως είδαμε απαραίτητη προκειμένου να εκφράσει τις υποκειμενικές προτιμήσεις του, μεταξύ μαθηματικά μη συγκρίσιμων λύσεων. Λαμβάνοντας υπόψη το στάδιο στο οποίο εμπλέκεται ο αποφασίζων στη διαδικασία λήψης απόφασης, έχουν αναπτυχθεί τρεις προσεγγίσεις αλγορίθμων επίλυσης πολυκριτηριακού μαθηματικού προγραμματισμού που συνδυάζουν την βελτιστοποίηση με την υποστήριξη αποφάσεων. Οι τρεις προσεγγίσεις θεωρούν πως ο αποφασίζων εκφράζει τις προτιμήσεις του είτε πριν την επίλυση (π.χ. προγραμματισμός στόχων, goal programming), είτε κατά τη διάρκεια της επίλυσης (αλληλεπιδραστικές μέθοδοι, interactive methods) ή μετά την επίλυση (μέθοδοι παραγωγής, generation methods). Η πλειοψηφία των μεθόδων και των εφαρμογών πολυκριτηριακού γραμμικού προγραμματισμού ανήκουν στον προγραμματισμό στόχων και στις αλληλεπιδραστικές μεθόδους, κυρίως λόγω του

τρόπου υπολογισμού των ικανών λύσεων, για τον οποίο αρκεί ένας επιλύτης γραμμικού προγραμματισμού. Οι μέθοδοι παραγωγής είναι υπολογιστικά πιο πολύπλοκες, απαιτούν ιδιαίτερο λογισμικό, και το πεδίο εφαρμογής τους περιορίζεται όσο αυξάνει το μέγεθος του προβλήματος. Η πληροφορία όμως που παρέχουν είναι σαφώς πλουσιότερη καθώς υπολογίζουν το σύνολο των εναλλακτικών επιλογών από τις οποίες καλείται να επιλέξει ο αποφασίζων. Στα επόμενα υποκεφάλαια παρουσιάζονται τα βασικά χαρακτηριστικά και οι κύριες μέθοδοι που ανήκουν σε κάθε μια από τις τρεις προσεγγίσεις αλγορίθμων επίλυσης πολυκριτηριακού μαθηματικού προγραμματισμού, ανάλογα με το στάδιο στο οποίο εμπλέκεται ο αποφασίζων στη διαδικασία λήψης απόφασης. Έμφαση δίνεται στις μεθόδους παραγωγής (εντοπισμός όλων των λύσεων του μετώπου Pareto και συμμετοχή του αποφασίζοντα μετά την επίλυση), οι οποίες είναι οι πιο κατάλληλες για την επίλυση των εφαρμογών της παρούσας διατριβής.

2.2.1 Έκφραση προτίμησης πριν την έναρξη διαδικασίας επίλυσης (a priori)

Στον κλάδο της επιχειρησιακής έρευνας έχουν αναπτυχθεί περί τις τριάντα μαθηματικές τεχνικές πολυκριτηριακής ανάλυσης, με τις σχετικές προσεγγίσεις να περιλαμβάνουν από τον συνδυασμό των επιμέρους κριτηρίων σε μια ενιαία έκφραση (οι λεγόμενες αθροιστικές μέθοδοι) μέχρι την χρήση της θεωρίας παιγνίων για τον καθορισμό της σχετικής σημασίας κάθε κριτηρίου (Coello Coello, 1999). Οι προσεγγίσεις αυτές, μετασχηματίζοντας το αρχικό διανυσματικό πρόβλημα σε βαθμωτό, επιδιώκουν την εύρεση μιας μεμονωμένης μη κατώτερης λύσης του προβλήματος, που λαμβάνεται ως η καλύτερα συμβιβαστική. Τα χαρακτηριστικά της ορίζονται από τον αναλυτή πριν την υπολογιστική διαδικασία και εκφράζονται με τη μορφή συντελεστών βάρους, επιθυμητών τιμών, προτεραιότητας κριτηρίων, κτλ. Διαφοροποιώντας τον ορισμό της καλύτερα συμβιβαστικής λύσης και επαναλαμβάνοντας την διαδικασία αναζήτησης, είναι δυνατός ο εντοπισμός εναλλακτικών μη κατώτερων λύσεων από το μέτωπο Pareto. Οι συχνά αναφερόμενες και ως κλασικές πολυκριτηριακές τεχνικές βρήκαν ευρύ φάσμα εφαρμογών τις δεκαετίες του 1970 και του 1980, και μπορούν να ενσωματωθούν σε οποιοδήποτε σχήμα βελτιστοποίησης,

δεδομένου ότι δεν επηρεάζουν τις διαδικασίες αναζήτησης και παραγωγής λύσεων, παρά μόνο τις διαδικασίες αποτίμησης της αντικειμενικής συνάρτησης.

Στα επόμενα δίνεται μια συνοπτική περιγραφή τεσσάρων χαρακτηριστικών μεθόδων στις οποίες ο αποφασίζων συγκεκριμενοποιεί τις προτιμήσεις του πριν από τη διαδικασία επίλυσης του προβλήματος, είτε καθορίζοντας από την αρχή τη σημαντικότητα των κριτηρίων, είτε θέτοντας στόχους ή βάρη για το κάθε κριτήριο/αντικειμενική συνάρτηση. Οι μέθοδοι αυτές βασίζονται στη μετατροπή των πολυκριτηριακών προβλημάτων σε μονοκριτηριακά. Συνηθέστερα οι συγκεκριμένες τεχνικές δεν χρησιμοποιούνται μεμονωμένα, αλλά αποτελούν κομμάτι μιας επαναληπτικής διαδικασίας επίλυσης όπου ο αποφασίζων αποκτά μεγαλύτερη επίγνωση των προτιμήσεων του σταδιακά. Οι τέσσερις χαρακτηριστικές μέθοδοι είναι η μέθοδος του προγραμματισμού στόχων (goal programming), η λεξικογραφική βελτιστοποίηση (lexicographic optimization), η μέθοδος συνάρτησης χρησιμότητας (utility function) και η μέθοδος των σταθμισμένων βαρών (weighted sums approach).

2.2.1.1 Μέθοδος προγραμματισμός στόχων

Η μέθοδος του προγραμματισμού στόχων πρωτοεμφανίστηκε στις εργασίες των (Charnes & Cooper, 1961). Ο προγραμματισμός στόχων, αποτελεί μία εναλλακτική εκδοχή του γραμμικού προγραμματισμού, ώστε να συμπεριλαμβάνει στην επίλυση περισσότερα του ενός κριτήρια. Κύριος στόχος της μεθόδου είναι η ελαχιστοποίηση των αποστάσεων (αποκλίσεων) των αντικειμενικών συναρτήσεων του προβλήματος από κάποιες προκαθορισμένες τιμές-στόχους. Οι τιμές-στόχοι των κριτηρίων καθορίζονται a priori. Η ενοποίηση των κριτηρίων σε μία αντικειμενική συνάρτηση γίνεται συνήθως μέσω του σταθμισμένου αθροίσματος των αποκλίσεων αυτών. Τελικά η βαθμωτή συνάρτηση του ισοδύναμου βαθμωτού προβλήματος συνίσταται στην ελαχιστοποίηση της απόκλισης των κριτηρίων από τους αντίστοιχους στόχους, και στην απλούστερη μορφή διατυπώνεται ως:

$$\min \sum_i^m |f_i(\mathbf{x}) - t_i| \quad (2.3)$$

Όπου με $i = 1..m$ ορίζεται ο αριθμός των κριτηρίων/ αντικειμενικών συναρτήσεων f_i και με t_i οι αντίστοιχες τιμές-στόχοι για κάθε κριτήριο i

Το βασικό μειονέκτημα του προγραμματισμού στόχων είναι η ανάγκη καθορισμού συγκεκριμένων τιμών-στόχων για τις αντικειμενικές συναρτήσεις με βάση τις οποίες υπολογίζονται οι «άριστες» λύσεις, που μπορεί τελικά να μην είναι ικανές λύσεις. Επειδή η συγκεκριμένη μέθοδος βασίζεται στην αναζήτηση λύσεων που βρίσκονται πιο κοντά στην ιδανική λύση συχνά αναφέρεται και ως συμβιβαστική προσέγγιση.

Πέραν της βασικής έκφρασης της σχέσης (2.3) έχουν προταθεί διαφορετικές επεκτάσεις της μεθόδου του προγραμματισμού στόχου, οι οποίες παραδείγματος χάριν δίνουν στον αποφασίζων τη δυνατότητα να θέσει προτεραιότητες στην επίτευξη των στόχων (preemptive goal programming) έτσι ώστε αφού προσεγγισθεί όσο είναι δυνατόν ο πρώτος στόχος να προχωρήσει στο δεύτερο στόχο κ.ο.κ. Ως γενικευμένη διατύπωση της σχέσης (2.3) προτείνεται η:

$$\min \left(\sum_i^m w_i |f_i(\mathbf{x}) - t_i|^p \right)^{1/p}$$

Όπου w_i το βάρος της εκάστοτε συνάρτησης και p παράμετρος σχήματος. Ο παραπάνω μετασχηματισμός του διανυσματικού προβλήματος αναφέρεται ως γενικευμένος προγραμματισμός στόχων (generalized goal programming) ή διανυσματική βελτιστοποίηση στόχων (target vector optimization). Στην απλή περίπτωση όπου $p = 2$ και $w_i = 1$, η στοχική συνάρτηση εκφράζει την ευκλείδεια απόσταση των κριτηρίων από τους αντίστοιχους στόχους, ενώ όσο αυξάνεται η τιμή του p και για μεγάλη (θεωρητικά άπειρη) τιμή του, η συνάρτηση εκφράζει την απόσταση από το πλέον μακρινό στόχο. Μεταβάλλοντας τις τιμές των στόχων t_i και των βαρών w_i , προκύπτουν διαφορετικές βέλτιστες λύσεις του προβλήματος, που ανήκουν στο μέτωπο Pareto.

2.2.1.2 Λεξικογραφική Βελτιστοποίηση

Ο όρος αναφέρεται σε μια κατά στάδια βελτιστοποίηση προβλημάτων πολυκριτηριακού (γραμμικού) προγραμματισμού, στην οποία ο χρήστης ορίζει εκ των προτέρων τον τρόπο επιλογής της καλύτερα συμβιβαστικής λύσης. Αυτό

γίνεται κατατάσσοντας τα κριτήρια (δηλαδή τις συνιστώσες της διανυσματικής στοχικής συνάρτησης) κατά φθίνουσα σειρά προτεραιότητας, και κάνοντας διαδοχικές βελτιστοποιήσεις, ξεκινώντας από το πλέον σημαντικό κριτήριο (Ben-Tal, 1980). Στο πρώτο στάδιο βελτιστοποιείται η πρώτη (υψηλότερης προτεραιότητας) αντικειμενική συνάρτηση. Αν υπάρχουν εναλλακτικά βέλτιστα αναζητείται μεταξύ αυτών αυτό που βελτιστοποιεί τη δεύτερη αντικειμενική συνάρτηση (δεύτερο στάδιο). Με σταθερή δηλαδή την βέλτιστη τιμή της πρώτης αντικειμενικής συνάρτησης επιδιώκεται η βελτιστοποίηση της δεύτερης. Στη συνέχεια με σταθερές τις τιμές της πρώτης και της δεύτερης αντικειμενικής συνάρτησης επιδιώκεται η βελτιστοποίηση της τρίτης κ.ο.κ. μέχρι την τελευταία αντικειμενική συνάρτηση. Συνεπώς, το πρόβλημα i διατυπώνεται ως:

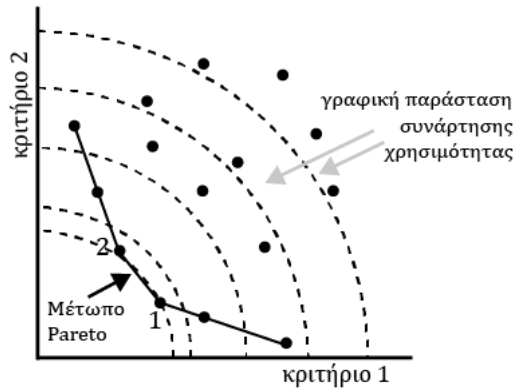
$$\begin{aligned} \min f_i(x) \\ \text{s. t. } f_j(x) = f_j^* \text{ για κάθε } j < i \end{aligned}$$

Το αποτέλεσμα της λεξικογραφικής βελτιστοποίησης για κάποια αντικειμενική συνάρτηση είναι η λύση εκείνη που βελτιστοποιεί τη συγκεκριμένη αντικειμενική συνάρτηση και παρουσιάζει τις καλύτερες δυνατές τιμές για τις υπόλοιπες αντικειμενικές συναρτήσεις με κάποια σειρά προτεραιότητας. Με άλλο λόγια η λύση f_m^* που αντιστοιχεί στο διάνυσμα x_m^* , και το οποίο προκύπτει μετά την βελτιστοποίηση του κριτηρίου που βρίσκεται στην κατώτατη σειρά προτεραιότητας, θεωρείται η καλύτερα συμβιβαστική του προβλήματος. Πρέπει να σημειωθεί ότι αν δεν υπάρχουν εναλλακτικά βέλτιστες λύσεις για μία αντικειμενική συνάρτηση τότε το αποτέλεσμα της λεξικογραφικής βελτιστοποίησης ταυτίζεται με αυτό της απλής βελτιστοποίησης.

2.2.1.3 Συναρτήσεις Χρησιμότητας

Η συνάρτηση χρησιμότητας είναι μια μαθηματική μέθοδος η οποία προβάλλει τις λύσεις από τον πολυδιάστατο χώρο των κριτηρίων στον μονοδιάστατο χώρο (Varian, 1999). Στην πραγματικότητα εκφράζει τη σχετική σημασία των κριτηρίων. Το αποτέλεσμα της συνάρτησης χρησιμότητας είναι ένας πραγματικός αριθμός. Με αυτόν τον τρόπο το πολυκριτηριακό πρόβλημα μετατρέπεται σε μονοκριτηριακό, όπου ο στόχος είναι η μεγιστοποίηση της τιμής της συνάρτησης χρησιμότητας. Η συνάρτηση μπορεί να λάβει οποιαδήποτε

μαθηματική μορφή, υπό την προϋπόθεση ότι είναι μονότονα φθίνουσα και κυρτή, εφόσον ζητούμενο είναι η ταυτόχρονη ελαχιστοποίηση του συνόλου των κριτηρίων.



Σχήμα 2-10: Γραφική απεικόνιση της συνάρτησης χρησιμότητας

Στο σχήμα απεικονίζεται η συνάρτηση χρησιμότητας με την βοήθεια των καμπυλών αδιαφορίας. Οι καμπύλες αδιαφορίας εκφράζουν ισοδύναμες λύσεις με βάση μια συγκεκριμένη συνάρτηση χρησιμότητας. Οι καμπύλες αδιαφορίας δεν τέμνονται ποτέ, ενώ η τιμή τους αυξάνει στην κατεύθυνση του μετώπου Pareto. Κατά συνέπεια, η καλύτερα συμβιβαστική λύση βρίσκεται στο σημείο όπου η καμπύλη αδιαφορίας εφάπτεται με το μέτωπο Pareto. Η συνάρτηση χρησιμότητας στο παράδειγμα του σχήματος ακολουθεί την εξίσωση του κύκλου $f_1^2 + f_2^2 = r^2$. Για τη συγκεκριμένη συνάρτηση χρησιμότητας οι λύσεις «1» και «2» του σχήματος ανήκουν και οι δύο στο σύνολο των Pareto λύσεων, με τη λύση «1» να είναι προτιμότερη από τη λύση «2».

2.2.1.4 Μέθοδος των σταθμισμένων βαρών

Η μέθοδος των σταθμισμένων βαρών αποτελεί την πλέον τετριμμένη προσέγγιση επίλυσης προβλημάτων πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης. Με τον όρο αυτό εννοείται η σύνθεση των αντικειμενικών συναρτήσεων, μέσω του σταθμισμένου αθροίσματός τους, ώστε να δημιουργηθεί μία γενικευμένη αντικειμενική συνάρτηση. Η μέθοδος των βαρών παρουσιάστηκε από τον (Zadeh, 1963) και είναι η πρώτη που αναπτύχθηκε για την εύρεση μη κατώτερων λύσεων στην πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση. Προκειμένου να επιλυθεί το πολυκριτηριακό πρόβλημα αποδίδεται σε κάθε κριτήριο (αντικειμενική συνάρτηση) ένας συντελεστής βαρύτητας εκφρασμένος με έναν πραγματικό αριθμό (συνήθως στο

διάστημα $[0,1]$) και στη συνέχεια συντίθενται τα επιμέρους κριτήρια σε ένα και μοναδικό καθολικό κριτήριο. Ο τρόπος σύνθεσης είναι συνήθως με τη δημιουργία του σταθμισμένου αθροίσματος των αντικειμενικών συναρτήσεων.

Συνεπώς, το πολυκριτηριακό πρόβλημα μετασχηματίζεται σε βαθμωτό της μορφής:

$$\min \sum_{i=1}^m w_i f_i(x) \quad (2.4)$$

όπου w_i οι συντελεστές βάρους που υποδηλώνουν την σχετική σημασία των επιμέρους κριτηρίων. Κατά κανόνα θεωρείται ότι:

$$\sum_{i=1}^m w_i = 1$$

Δεδομένου ότι η βέλτιστη λύση της (2.4) εξαρτάται σε σημαντικό βαθμό από τις τιμές των συντελεστών βάρους και καθώς δεν υπάρχει αντικειμενικός τρόπος επιλογής τους, απαιτείται μια ανάλυση ευαισθησίας, βάσει της οποίας επιλύεται το ισοδύναμο πρόβλημα πολλές φορές, με χρήση διαφορετικών τιμών των w_i . Στην περίπτωση αυτή, όλες οι λύσεις που προκύπτουν ανήκουν στο μέτωπο Pareto, και η επιλογή της καλύτερα συμβιβαστικής έγκειται στην υποκειμενική κρίση του αποφασίζοντα.

Επισημαίνεται επίσης ότι, επειδή οι συντελεστές της μιας αντικειμενικής συνάρτησης μπορεί να διαφέρουν τάξεις μεγέθους από τους συντελεστές μιας άλλης, καθίσταται απαραίτητη η αναγωγή στην ίδια κλίμακα, έτσι ώστε, το σταθμισμένο άθροισμα να αντιστοιχεί στις αρχικές εκτιμήσεις για τη σημαντικότητα των αντικειμενικών συναρτήσεων και να μην επηρεάζεται από τις μονάδες μέτρησης των αντικειμενικών συναρτήσεων. Στα μειονεκτήματα της συγκεκριμένης μεθόδου συγκαταλέγονται οι υπολογιστικές δυσχέρειες λόγω της ανάγκης επαναληπτικής επίλυσης εναλλακτικών διατυπώσεων του ίδιου προβλήματος, καθώς και η ανεπάρκεια της μεθόδου όταν το μέτωπο Pareto είναι μη κυρτό. Στην περίπτωση αυτή, είναι αδύνατος ο εντοπισμός των μη κατωτέρων

λύσεων του προβλήματος, ανεξάρτητα του συνδυασμού των συντελεστών βάρους (Richardson, Palmer, Liepins, & Hilliard, 1989).

2.2.2 Έκφραση προτίμησης κατά τη διάρκεια της διαδικασίας επίλυσης (interactive)

Οι μέθοδοι με έκφραση προτίμησης κατά τη διάρκεια της επίλυσης προϋποθέτουν την άμεση εμπλοκή και αλληλεπίδραση του αποφασίζοντα, μέσα από διαδοχικές επαναληπτικές διαδικασίες υπολογισμών. Σε κάθε επανάληψη μία ή περισσότερες λύσεις παρουσιάζονται στον αποφασίζοντα ο οποίος επιλέγει μία λύση εκφράζοντας την προτίμησή του και στη συνέχεια διαμορφώνεται αναλόγως η επόμενη επανάληψη για τον προσδιορισμό της νέας λύσης. Ο στόχος είναι οι τελικά προκύπτουσες λύσεις να συγκλίνουν με τις προτιμήσεις του αποφασίζοντα (Hwang, Paidy, Yoon, & Masud, 1980). Ακριβώς λόγω της άμεσης εμπλοκής του αποφασίζοντα στην επίλυση ονομάζονται αλληλεπιδραστικές ή διαδραστικές μέθοδοι. Ο αλληλεπιδραστικός τους χαρακτήρας, είναι εκείνος ακριβώς που επιφέρει τη σταδιακή και την ελεγχόμενη παραγωγή των ικανών λύσεων και προσδίδει το πλεονέκτημα στον αποφασίζοντα να ελέγξει το χώρο των ικανών λύσεων και να διαμορφώσει καλύτερα την προτιμησιακή του στρατηγική (Shin & Ravidran, 1991). Επίσης, οι αλληλεπιδραστικές μέθοδοι επειδή δεν χρειάζεται να παράγουν το σύνολο των ικανών λύσεων, αλλά απλώς αντιπροσωπευτικά δείγματα ικανών λύσεων σε κάθε επανάληψη, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την επίλυση μεγάλων προβλημάτων (Γεωργίου, 2010). Ένα ακόμη πλεονέκτημα των μεθόδων της κατηγορίας αυτής, είναι η απλότητα που προσφέρουν κατά την εφαρμογή τους, διότι δεν απαιτούν τη χρησιμοποίηση κάποιου ιδιαίτερου λογισμικού, αφού στις επιμέρους επαναλήψεις χρησιμοποιούν συμβατικά εργαλεία μαθηματικού προγραμματισμού για να πραγματοποιήσουν τις απαραίτητες ενδιάμεσες (τοπικές) βελτιστοποιήσεις (Μαυρωτάς, 2000). Από το 1970 έως σήμερα έχουν αναπτυχθεί αρκετές αλληλεπιδραστικές μέθοδοι, με πολλές από αυτές να εφαρμόζονται τόσο σε γραμμικά όσο και σε μη γραμμικά προβλήματα (π.χ. οι μέθοδοι «STEM» (Benayoun, de Montgolfier, Tergny, & Laritchev, 1971) και «GDF» (Geoffrion, Dyer, & Feinberg, 1972)). Η πλειοψηφία των μεθόδων αυτών βασίζεται στην επίλυση ενός μονοκριτηριακού προβλήματος βελτιστοποίησης ανά επανάληψη,

χρησιμοποιώντας τις βασικές αρχές των μεθόδων που παρουσιάστηκαν στην παράγραφο 2.2.1. Οι διαφορές των μεθόδων επομένως έγκεινται στη μορφή του προβλήματος γραμμικού προγραμματισμού που επιλύουν για να προσδιορίσουν τις αντιπροσωπευτικές ικανές λύσεις σε κάθε επανάληψη και ως προς τον τύπο της πληροφορίας που απαιτείται από τον αποφασίζοντα. Οι περισσότερες αλληλεπιδραστικές μέθοδοι, ανάλογα με τον τρόπο σύγκλισής τους, χαρακτηρίζονται ως μέθοδοι συρρικνώμενου εφικτού χωρίου (reduced feasible region) - όπου δηλαδή, σε κάθε επανάληψη, το εφικτό χωρίο του προβλήματος συρρικνώνεται λόγω της εισαγωγής νέων περιορισμών που αφορούν τις τιμές των αντικειμενικών συναρτήσεων - , μέθοδοι συρρικνώμενου χώρου συντελεστών στάθμισης (reduced weighting vector space) - όπου οι περιορισμοί συρρικνώνουν τον χώρο από τον οποίο παίρνουν τιμές οι συντελεστές στάθμισης σε κάθε επανάληψη - και ως μέθοδοι αναζήτησης της διεύθυνσης μέγιστης βελτίωσης (direction or line search methods) (Steuer, 1986). Επίσης κάποιες αλληλεπιδραστικές μέθοδοι χαρακτηρίζονται ως μέθοδοι σημείου αναφοράς (reference point methods) λόγω του ότι χρησιμοποιούν κάποιο σημείο αναφοράς (reference point) στο χώρο των αντικειμενικών συναρτήσεων- το οποίο μπορεί να είναι είτε ένα προσδοκώμενο σημείο (aspiration point) είτε το ιδεώδες σημείο - για να προσδιορίσουν τις δειγματικές ικανές λύσεις σε κάθε επανάληψη (Wierzbicki, 1982).

Χαρακτηριστικές μέθοδοι συρρικνώμενου εφικτού χωρίου είναι η «STEM» (1971), η μέθοδος «GDF» (1972) και η «Interactive Surrogate Worth Tradeoff» (Chankong & Haimes, 1983). Ενδεικτικά αναφέρεται ότι η μέθοδος STEM μπορεί να εφαρμοστεί και σε προβλήματα πολυκριτηριακού γραμμικού προγραμματισμού με ακέραιες μεταβλητές. Οι μέθοδοι «GDF» και «Interactive Surrogate Worth Tradeoff» μετατρέπουν το πολυκριτηριακό πρόβλημα σε μονοκριτηριακό μίας αντικειμενικής συνάρτησης, είτε συνθέτοντας τις επιμέρους συναρτήσεις σε μία συνάρτηση χρησιμότητας (όπως στην μέθοδο «GDF»), είτε μετατρέποντας τες σε περιορισμούς και εκτελώντας τη βελτιστοποίηση με μία αντικειμενική συνάρτηση (μέθοδος «Interactive Surrogate Worth Tradeoff»). Στις μεθόδους συρρικνώμενου χώρου των συντελεστών στάθμισης ανήκουν η μέθοδος «Zionts-Wallenius» (Zionts & Wallenius, 1976), η «Interval Criterion

Weights» (Steuer, 1977), η «Interactive weighted sums/filtering approach» (Steuer, 1989) και η «Interactive weighted Tchebycheff» (Steuer & Choo, 1983). Η βασική ιδέα των μεθόδων αυτών είναι η σταδιακή συρρίκνωση του χώρου των συντελεστών στάθμισης μέσω των διαδοχικών επαναλήψεων, έτσι ώστε να είναι εφικτή η παραγωγή των αντίστοιχων ικανών ακραίων λύσεων. Οι διαφορές μεταξύ των διαφόρων μεθόδων της κατηγορίας έγκεινται στον τρόπο που συρρικνώνεται ο χώρος των συντελεστών στάθμισης. Η μέθοδος «Achievement Scalarizing Function» (Wierzbicki, 1982) ακολουθεί την αρχή των μεθόδων σημείου αναφοράς, όπως και οι μέθοδοι «VIG» (Korhonen & Laakso, 1986) και «Pareto Race» (Korhonen & Wallenius, 1988). Βασική ιδέα της «Achievement Scalarizing Function» είναι ο καθορισμός ενός προσδοκώμενου σημείου αναφοράς στο χώρο των αντικειμενικών συναρτήσεων και η μετέπειτα προβολή του σημείου στο περίγραμμα του συνόλου των εφικτών λύσεων. Ο αποφασίζοντας επιλέγει την πιο ικανοποιητική για αυτόν προβολή μεταξύ του συνόλου των ικανών λύσεων. Αντιστοίχως οι «VIG» και «Pareto Race» έχουν ως κοινή βάση την γραφική εξερεύνηση του ικανού συνόρου του προβλήματος.

Ωστόσο, πρέπει να σημειωθεί ότι εκτός από τις παραπάνω βασικές μεθόδους έχουν κατά καιρούς αναπτυχθεί και διάφορες παραλλαγές τους. Οι παραλλαγές αυτές απορρέουν, είτε από τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά του προβλήματος που καλούνται να αντιμετωπίσουν οι μέθοδοι, είτε από βελτιωτικές μικροεπεμβάσεις που υπαγορεύονται από την πρόοδο της υπολογιστικής τεχνολογίας (Μαυρωτάς, 2000). Για περεταίρω μελέτη στο αντικείμενο των αλληλεπιδραστικών μεθόδων ο αναγνώστης παραπέμπεται στους (Alves & Climaco, 2007).

2.2.3 Έκφραση προτίμησης μετά το τέλος της διαδικασίας επίλυσης (a posteriori)

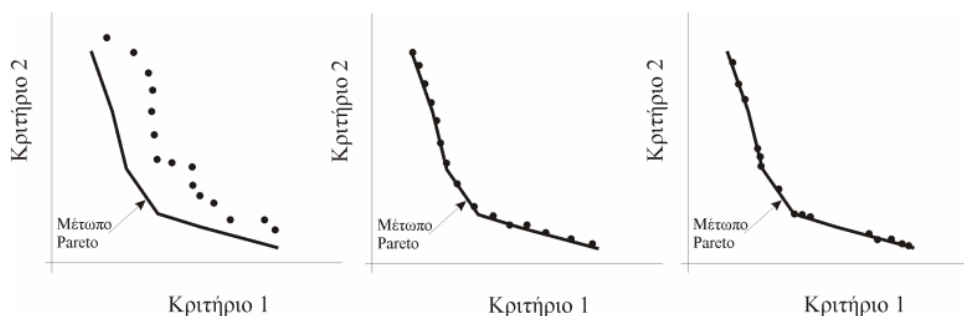
Οι μέθοδοι με έκφραση προτίμησης του αποφασίζοντα μετά το τέλος της διαδικασίας επίλυσης, γνωστές και ως εκ-των-υστέρων μέθοδοι (a posteriori), έχουν σχεδιαστεί για την παραγωγή ολόκληρου του συνόλου των μη κυριαρχούμενων λύσεων κατά Pareto, ή ενός μεγάλου υποσυνόλου αυτού, το οποίο αποτελεί ένα από τα σημαντικά τους πλεονεκτήματα. Στην κατηγορία αυτή, ανήκουν οι μέθοδοι παραγωγής των ικανών λύσεων (generation methods). Οι μέθοδοι παραγωγής, έχουν το πλεονέκτημα ότι δίνουν στον αποφασίζοντα τη

δυνατότητα να επιλέξει την τελική λύση ο ίδιος, αφού εξετάσει όλες τις δυνατές επιλογές, γεγονός που του προσδίδει μεγαλύτερη εμπιστοσύνη στην τελική του απόφαση.

Η διαδικασία επίλυσης της μεθόδου παραγωγής, μπορεί να διακριθεί σε δυο στάδια:

- Το πρώτο στάδιο, αφορά τον υπολογισμό/παραγωγή του συνόλου/μετώπου ή κάποιου αντιπροσωπευτικού υποσυνόλου των κατά Pareto βέλτιστων λύσεων (Pareto Front).
- Το δεύτερο στάδιο, απαιτεί την αξιολόγηση των παραπάνω παραγόμενων λύσεων από τον αποφασίζοντα, στοχεύοντας στην επιλογή της προτιμότερης.

Κατά την επιλογή μια μεθόδου a-posteriori, για την παραγωγή του συνόλου των λύσεων που ανήκουν στο μέτωπο Pareto, θα πρέπει να εξεταστεί αν η συγκεκριμένη μέθοδος μπορεί να δημιουργήσει ένα ομοιόμορφο σύνολο των σημείων στο χώρο, χωρίς να παραμελεί/εξαίρει κάποια περιοχή με σημεία του μετώπου. Το χαρακτηριστικό αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό, καθώς παρέχει τη διαβεβαίωση ότι όλες οι περιοχές του σχεδιαστικού χώρου αντιπροσωπεύουν επαρκώς τις παραγόμενες λύσεις. Επίσης, θα πρέπει να εξεταστεί, αν η μέθοδος έχει τη δυνατότητα να παράξει όλες τις διαθέσιμες λύσεις κατά Pareto και μόνο τις λύσεις αυτές. Τα παραπάνω συνοψίζονται σε δυο συγκεκριμένα χαρακτηριστικά τα οποία απεικονίζονται στο Σχήμα 2-11. Όπως γίνεται φανερό οι τελικές λύσεις πρέπει να συγκλίνουν στο πραγματικό μέτωπο Pareto και επιπλέον θα πρέπει να είναι ομοιόμορφα κατανεμημένες, έτσι ώστε να καλύπτεται όλη η περιοχή του μετώπου Pareto.



Σχήμα 2-11: Παραδείγματα μετώπου Pareto α) ο αλγόριθμος δεν συγκλίνει ομοιόμορφα στο πραγματικό μέτωπο Pareto β) ο αλγόριθμος συγκλίνει στο πραγματικό μέτωπο Pareto γ) ο αλγόριθμος συγκλίνει ανομοιόμορφα στο πραγματικό μέτωπο Pareto

Οι εκ-των-υστέρων (a-posteriori) μέθοδοι, έχουν το πλεονέκτημα ότι παράγουν πλήθος πληροφοριών, προκειμένου να αποδώσουν στον αποφασίζοντα τη συνολική εικόνα του συνόλου των βέλτιστων/ικανών λύσεων κατά Pareto και εκείνος με τη σειρά του, κάνει την καλύτερη δυνατή τελική επιλογή. Η συγκεκριμένη ιδιότητα, λειτουργεί ως ένα ακόμη πλεονέκτημα έναντι άλλων μεθόδων, όπως είναι οι μέθοδοι με έκφραση προτίμησης από την αρχή (a priori) ή ενδιάμεσα (interactive), διότι με αυτό τον τρόπο, παρέχεται μεγαλύτερη εμπιστοσύνη στον αποφασίζοντα σχετικά με την τελική του απόφαση, καθώς λαμβάνει υπόψη το σύνολο της αναγκαίας πληροφορίας πριν να οριστικοποιήσει την επιλογή του. Επίσης δεν απαιτούν την έντονη εμπλοκή του, με αποτέλεσμα να καθιστούν τη διαδικασία επίλυσης ευκολότερη για τον αποφασίζοντα συγκριτικά με άλλες κατηγορίες, όπως είναι οι αλληλεπιδραστικές, στις οποίες αρκετές φορές ο αποφασίζοντας έρχεται αντιμέτωπος με δυσκολία στην προσέγγιση της βέλτιστης για εκείνον λύσης.

Βέβαια την ίδια στιγμή το συγκεκριμένο πλεονέκτημα, μπορεί να λειτουργήσει και με αντίθετο τρόπο, διότι το πλήθος των ικανών παραγόμενων λύσεων θα είναι πολύ μεγάλο και ο αποφασίζων, στο τέλος της διαδικασίας που θα κληθεί να επιλέξει από αυτό το αρκετά ευρύ σύνολο εναλλακτικών λύσεων, θα του δημιουργήσει πρόσθετες δυσκολίες για την αποτελεσματική ανάλυση όλων των πληροφοριών και την τελική επιλογή της βέλτιστης λύσης. Παράλληλα, αν και σαν μεθοδολογία οι μέθοδοι με έκφραση προτίμησης μετά την επίλυση είναι πιο αντικειμενικές, υπάρχουν δυσκολίες που καθιστούν την εφαρμογή τους ιδιαίτερα δύσκολη, συγκριτικά με τις άλλες δυο κατηγορίες μεθόδων (a-priori και interactive). Αρχικά ένα μειονέκτημα των συγκεκριμένων a-posteriori μεθόδων πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης, είναι το ότι είναι περισσότερο πολύπλοκες και δυσνόητες αλγοριθμικά για τον αποφασίζοντα. Σε περιπτώσεις προβλημάτων δυο ή τριών κριτηρίων, ο υπολογισμός των λύσεων και η εκ των υστέρων επιλογή της βέλτιστης, είναι σχετικά μια εύκολη διαδικασία. Σε περιπτώσεις όμως ύπαρξης περισσότερων κριτηρίων, η γραφική απεικόνιση του επιπέδου Pareto, είναι αρκετά πολύπλοκη. Και η διαδικασία βελτιστοποίησης, αυξάνει εκθετικά όσο αυξάνει ο αριθμός των κριτηρίων (Μαυρωτάς, 2000). Για παράδειγμα, κατά την παραγωγή των ικανών λύσεων σε ένα πρόβλημα πολυκριτηριακού

προγραμματισμού, απαιτείται πολλαπλάσιος χρόνος επίλυσης και μνήμη, συγκριτικά με την αναζήτηση της άριστης λύσης σε ένα πρόβλημα γραμμικού προγραμματισμού αντίστοιχου μεγέθους. Επίσης, όταν το πρόβλημα περιλαμβάνει μεγάλο αριθμό κριτηρίων, εκατοντάδες περιορισμούς και μεταβλητές απόφασης, η συγκεκριμένη μέθοδος απαιτεί σε αρκετές περιπτώσεις υπερβολική ποσότητα υπολογιστικών πόρων, δηλαδή κυρίως αρκετό χρόνο επεξεργασίας (CPU) για τον υπολογισμό των αποτελεσματικών λύσεων. Οπότε, ως αποτέλεσμα, σε περιπτώσεις αντιμετώπισης μεγάλων προβλημάτων, με εκατοντάδες περιορισμούς και μεταβλητές απόφασης, οι *a posteriori* μέθοδοι ενδέχεται να αποδειχτούν και ανεπαρκείς για την επίλυση, διότι ο αριθμός των ικανών λύσεων είναι τόσο μεγάλος που ο υπολογισμός τους καθίσταται υπολογιστικά ανέφικτος. Η ραγδαία όμως αύξηση της υπολογιστικής ισχύος των σύγχρονων ηλεκτρονικών υπολογιστών, έχει συρρικνώσει σε κάποιες περιπτώσεις τους χρόνους επίλυσης, με αποτέλεσμα οι μέθοδοι να έχουν γίνει πρακτικά πιο εφαρμόσιμες από ότι παλαιότερα.

Οι εκ-των-υστέρων μέθοδοι, διακρίνονται σε δυο υποκατηγορίες:

- Στις μεθόδους που παράγουν το σύνολο των ακραίων ικανών λύσεων και
- Στις μεθόδους που παράγουν και τις ενδιάμεσες (μη-ακραίες) ικανές λύσεις, που βρίσκονται στο εσωτερικό των εδρών ή ακμών του ικανού συνόρου.

Απαραίτητη ωστόσο προϋπόθεση για την παραγωγή του συνόλου των ικανών λύσεων (ακραίων και ενδιάμεσων), είναι η παραγωγή του συνόλου των ακραίων ικανών λύσεων. Συνήθως, η τελική λύση αναζητείται ανάμεσα στις ακραίες ικανές λύσεις οι οποίες αρκούν για τη διαδικασία λήψης απόφασης. Ο αποφασίζων ωστόσο, μπορεί να εξετάσει και τις ενδιάμεσες ικανές λύσεις, οι οποίες προκύπτουν από την προτιμότερη ικανή ακραία λύση και τις γειτονικές της ακραίες ικανές λύσεις.

Η βασικότερη και απλούστερη μέθοδος παραγωγής των ακραίων ικανών λύσεων, είναι η μέθοδος των συντελεστών στάθμισης (*weighting method*) (Gass & Saaty, 1955), η οποία επιτυγχάνεται μέσω του σταθμισμένου αθροίσματος των αντικειμενικών συναρτήσεων. Ως βασική ιδέα έχει τη συσχέτιση κάθε

αντικειμενικής συνάρτησης με ένα συντελεστή στάθμισης (βάρος, w_i), που θεωρείται ότι είναι πραγματικός αριθμός και ≥ 0 και έπειτα την ελαχιστοποίηση του αθροίσματος των σταθμισμένων συναρτήσεων/κριτηρίων. Με αυτό τον τρόπο οι πολλαπλές αντικειμενικές, μετασχηματίζονται σε μια. Η συγκεκριμένη μέθοδος αποτελεί μια σχετικά απλή διαδικασία και χωρίς ιδιαίτερες απαιτήσεις σε λογισμικό. Πιο συγκεκριμένα, στη μέθοδο αυτή επιλύεται ένα πρόβλημα γραμμικού προγραμματισμού, μέσω της συστηματικής και παραμετρικής μεταβολής των συντελεστών στάθμισης. Ως αποτέλεσμα, σαρώνεται το σύνολο των ακραίων ικανών λύσεων και ο αποφασίζων καταλήγει στην ικανή κατά την κρίση του. Η λύση της μεθόδου των συντελεστών στάθμισης, ανήκει πάντα στο μέτωπο των ικανών/βέλτιστων κατά Pareto λύσεων, αν όλοι οι συντελεστές στάθμισης w_i , είναι θετικοί πραγματικοί αριθμοί, ή αν η λύση είναι μοναδική. Η αδυναμία της μεθόδου σε προβλήματα πολυκριτηριακού μη γραμμικού προγραμματισμού, έγκειται στο ότι δεν είναι εφικτή η εύρεση όλων των βέλτιστων κατά Pareto λύσεων, αν η σχηματιζόμενη επιφάνεια είναι μη κυρτή. Ωστόσο, το χαρακτηριστικό αυτό, μπορεί να αντιμετωπιστεί με κατάλληλες προσαρμογές, μετατρέποντας το μη κυρτό σύνολο των λύσεων κατά Pareto, σε κυρτό (Li & Li, 1996). Επίσης ένα ακόμη μειονέκτημα της μεθόδου αυτής, συναντάται σε προβλήματα με περισσότερες από δύο αντικειμενικές συναρτήσεις, διότι η συστηματική εξέταση των συνδυασμών των συντελεστών στάθμισης είναι χρονοβόρα.

Μια ακόμα βασική a-posteriori μέθοδος που χρησιμοποιείται σε προβλήματα πολυκριτηριακού γραμμικού προγραμματισμού είναι η μέθοδος Non Inferion Set Estimation (NISE) (Cohon, 1978). Η μέθοδος NISE προτείνει μια επαναληπτική τεχνική που χρησιμοποιεί τη μέθοδο των συντελεστών στάθμισης για την αυτόματη και ταυτόχρονη παραγωγή του μετώπου των αντιπροσωπευτικών λύσεων κατά Pareto και της αντίστοιχης καμπύλης χαλάρωσης, χρησιμοποιώντας μια γραμμική προσέγγιση. Η μέθοδος εφαρμόζεται κυρίως σε δυκριτηριακά προβλήματα. Σε κάποιες περιπτώσεις, δύναται να γενικευθεί και σε δυκριτηριακά προβλήματα μη γραμμικού προγραμματισμού, με κυρτές συναρτήσεις (Chankong & Haimes, 1983). Επίσης, το 1985, οι Balachandran and Cero, κατάφεραν να

επεκτείνουν τη συγκεκριμένη μέθοδο για την επίλυση προβλημάτων με τρεις αντικειμενικές συναρτήσεις (Balachandran & Gero, 1985).

Άλλες διαδεδομένες μέθοδοι που αποτέλεσαν την βάση των μεθόδων παραγωγής αποτελεσματικών και ομοιόμορφα κατανεμημένων μετώπων των ικανών λύσεων κατά Pareto είναι η μέθοδος της Λογικής Οριακής Διατομής (Normal Boundary Intersection - NBI) (Das & Dennis, 1998) και η μέθοδος της Λογικής Σύγκυσης (Normal Constraint - NC) (Messac, Ismail-Yahaya, & Mattson, 2003). Η μέθοδος της Λογικής Οριακής Διατομής αποδίδει μια καλή προσέγγιση της επιφάνειας Pareto, μέσω συνεχόμενης μεταβολής των μεταβλητών των περιορισμών, με την επίλυση κατά την επαναληπτική διαδικασία όσο το δυνατόν λιγότερων υποπροβλημάτων βελτιστοποίησης. Πιο συγκεκριμένα, η εν λόγω μέθοδος απεικονίζει μια αντιπροσωπευτική ομοιόμορφη κατανομή του συνόλου των βέλτιστων λύσεων κατά Pareto, συμπεριλαμβανομένων όλων των τμημάτων του, και χωρίς να εξαιρεί ορισμένα τμήματά του, ακόμα και αν η βέλτιστη επιφάνεια των σημείων κατά Pareto είναι μη κυρτή. Επίσης η συγκεκριμένη μέθοδος μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε προβλήματα με οποιοδήποτε πλήθος αντικειμενικών συναρτήσεων. Η μέθοδος της Λογικής Σύγκυσης βασίζεται στη συστηματική μεταβολή των αριθμητικών βαθμωτών βαρών της συνολικής αντικειμενικής συνάρτησης, δηλαδή του συνδυασμού όλων των αντικειμενικών συναρτήσεων σε μια μόνο συναρτησιακή μορφή, με την οποία κάθε σύνολο βαρών οδηγεί σε μια αντίστοιχη λύση Pareto. Πρόκειται ουσιαστικά για μια βελτιωμένη έκδοση της μεθόδου της Λογικής Οριακής Διατομής, η οποία όταν χρησιμοποιείται με κανονικοποιημένες αντικειμενικές συναρτήσεις και με ένα φίλτρο Pareto (Pareto Filter) το οποίο εξαλείφει το σύνολο των μη Pareto βέλτιστων λύσεων, παρέχει ένα σύνολο ομοιόμορφων κατανεμημένων στο χώρο βέλτιστων σημείων κατά Pareto. Στην πραγματικότητα, με αυτό τον τρόπο, η συγκεκριμένη μέθοδος υπολογίζει πάντα το σύνολο των Pareto λύσεων.

Σε πιο πρόσφατες εργασίες οι (Messac, Sukam, & Melachrinoudis, 2001) και (Messac & Mattson, 2002), προτείνουν τη μέθοδο του φυσικού προγραμματισμού, η οποία στην αρχική της μορφή ανήκει στην κατηγορία των a – priori μεθόδων. Η μέθοδος του φυσικού προγραμματισμού μπορεί να παράγει με ακρίβεια το σύνολο των βέλτιστων κατά Pareto λύσεων/σημείων και είναι ιδιαίτερα

αποτελεσματική, ακόμα και όταν η βέλτιστη επιφάνεια των σημείων κατά Pareto είναι μη κυρτή. Όταν ο φυσικός προγραμματισμός χρησιμοποιείται σαν προσέγγιση *a-priori*, ο αποφασίζων εκφράζει τις προτιμήσεις του πριν τη διαδικασία επίλυσης του προβλήματος, είτε καθορίζοντας από την αρχή τη σημαντικότητα των κριτηρίων, είτε θέτοντας στόχους ή βάρη για το κάθε κριτήριο - αντικειμενική συνάρτηση, οριοθετώντας τα αριθμητικά εύρη της αντικειμενικής συνάρτησης και των περιορισμών. Αυτά τα εύρη αντιστοιχούν σε διαφορετικούς βαθμούς προτίμησης (επιθυμητό, ανεκτό, ανεπιθύμητο κλπ). Για να χρησιμοποιηθεί ο φυσικός προγραμματισμός σαν μέθοδος *a-posteriori* και προκειμένου να εκπροσωπηθεί πλήρως το βέλτιστο σύνολο λύσεων κατά Pareto, θεωρείται ότι οι παράμετροι που αντιπροσωπεύουν τις προτιμήσεις του αποφασίζοντα τροποποιούνται συστηματικά μέσω κατάλληλου μαθηματικού εργαλείου.

Άλλες βασικές μέθοδοι παραγωγής των ικανών λύσεων, προτείνουν μια επαναληπτική κατασκευαστική διαδικασία επίλυσης με την οποία προστίθενται διαδοχικά νέες λύσεις στο σύνολο ή υποσύνολο των ικανών και μη-κυριαρχούμενων λύσεων. Τέτοιες μέθοδοι έχουν αναπτυχθεί από τους (Pasternak & Passy, 1973), (Bitran, 1977), (Bitran, 1979), (Klein & Hannan, 1982), (Bitran & Riviera, 1982), (Deckro & Winkofsky, 1983), (Kiziltan & Yucaoglu, 1983), (White, 1984), (Chalmet, Lemonidis, & Elzinga, 1986) και από τους (Sylva & Crema, 2004). Οι τελευταίοι προτείνουν διαφορετικές τεχνικές επέκτασης του αλγορίθμου των (Klein & Hannan, 1982). Άλλες μέθοδοι, βασίζονται στον υπολογισμό πιθανών μη-κυριαρχούμενων λύσεων στις ενδιάμεσες φάσεις της διαδικασίας επίλυσης και μόνο προς το τέλος της διαδικασίας παράγουν το πραγματικό σύνολο των μη-κυριαρχούμενων λύσεων κατά Pareto. Στην κατηγορία αυτή ανήκουν οι μέθοδοι που ανέπτυξαν οι (Villareal & Karwan, 1981), (Deckro & Winkofsky, 1983) και (Kiziltan & Yucaoglu, 1983).

Επίσης τα τελευταία χρόνια η έρευνα μελετά την παραγωγή του μετώπου των ικανών λύσεων χρησιμοποιώντας τεχνικές προσεγγιστικής επίλυσης, οι οποίες ανήκουν στον κλάδο της πολυκριτηριακής εξελικτικής βελτιστοποίησης. Η πολυκριτηριακή εξελικτική βελτιστοποίηση ως μέθοδος πολυκριτηριακού μαθηματικού προγραμματισμού ανήκει στο πεδίο του εξελικτικού υπολογισμού.

Σε αντίθεση με τις κλασικές προσεγγίσεις που παράγουν μεμονωμένες μη κατώτερες λύσεις, οι εξελικτικές μέθοδοι χρησιμοποιούν πληθυσμούς εφικτών σημείων για την αποτελεσματικότερη διερεύνηση πολύπλοκων, ακόμη και μη κυρτών, χώρων αναζήτησης. Η αρχική ιδέα των εξελικτικών τεχνικών παρουσιάστηκε για πρώτη φορά από τους (Holland, 1975) και (Goldberg, 1989). Οι εξελικτικοί αλγόριθμοι είναι μέθοδοι αναζήτησης ολικού βέλτιστου και βασίζονται στις αρχές της φυσικής επιλογής, σύμφωνα με τις οποίες μέσα από ένα πληθυσμό επιβιώνουν μόνο τα ισχυρότερα άτομα, τα οποία είναι καταλληλότερα για αναπαραγωγή. Οι σύγχρονες εξελικτικές προσεγγίσεις βασίζονται στις έννοιες της κυριαρχίας και της διασποράς. Δηλαδή η επιλογή των ατόμων – λύσεων τα οποία θα περάσουν στην επόμενη γενιά καθορίζεται από ένα μέτρο κυριαρχίας και ένα μέτρο διασποράς. Το μέτρο κυριαρχίας διακρίνει τα άτομα τα οποία θα προκριθούν στην επόμενη γενιά, ενώ το μέτρο διασποράς ευνοεί την επιλογή ατόμων με λιγότερα γειτονικά μέλη πληθυσμού. Σκοπός των εξελικτικών προσεγγίσεων είναι η αμερόληπτη και ομοιόμορφη κάλυψη του μετώπου Pareto, που προϋποθέτει τη χρήση ειδικών μαθηματικών κριτηρίων κατά την διαδικασία αξιολόγησης και επιλογής των μελών του πληθυσμού. Αφού εντοπιστούν οι βέλτιστες λύσεις Pareto, η επιλογή της καλύτερα συμβιβαστικής δεν αποτελεί, κατ' ανάγκη, ευθύνη του αναλυτή. Η διαδικασία εξασφαλίζει ένα αντιπροσωπευτικό φάσμα εναλλακτικών επιλογών, παρέχοντας έτσι στον αναλυτή την ευχέρεια της εκ των υστέρων επιλογής. Για αυτό και οι συγκεκριμένες μέθοδοι ανήκουν στις μεθόδους a – posteriori.

Ουσιαστικά, η πολυκριτηριακή εξελικτική βελτιστοποίηση ξεκίνησε με τη μέθοδο VEGA (Schaffer, 1984). Η μέθοδος VEGA, για αυτόν ακριβώς το λόγο, ανήκει στους αλγόριθμους πρώτης γενιάς και είναι ένας διανυσματικός γενετικός αλγόριθμος που αποσκοπεί στην ταυτόχρονη παραγωγή μη κατωτέρων λύσεων, χωρίς όμως να κάνει άμεση χρήση της έννοιας της κυριαρχίας για τη σύγκριση διανυσμάτων. Συνεπώς, κατά τη διαδικασία αξιολόγησης και επιλογής των εναλλακτικών λύσεων, δε χρησιμοποιούνται διανυσματικά, αλλά βαθμωτά κριτήρια καταλληλότητας, γεγονός που περιορίζει την αποτελεσματικότητα της συγκεκριμένης τεχνικής. Από τα μέσα της δεκαετίας του 1990, η πολυκριτηριακή εξελικτική βελτιστοποίηση γνώρισε μία αλματώδη μεθοδολογική ανάπτυξη η

οποία κορυφώθηκε στις αρχές της δεκαετίας του 2000 (Deb, Pratap, Agarwal, & Meyarivan, 2002), (Van Veldhuizen D. A., 1999). Οι επόμενες προσεγγίσεις, ανέπτυξαν την δεύτερη γενιά αλγορίθμων. Η δεύτερη γενιά, λάμβανε ως κύριο κριτήριο επιλογής, τη σχέση μεταξύ των εξεταζόμενων λύσεων, αντιστοιχώντας σε κάθε μέλος του πληθυσμού ένα βαθμωτό μέτρο κυριαρχίας. Η πρώτη τεχνική που αναπτύχθηκε με βάση την έννοια της κυριαρχίας, αναφέρεται ως μη-κυριαρχούμενη ταξινόμηση (NSGA) και προτάθηκε από τους (Srinivas & Deb, 1993). Άλλες τεχνικές που ανήκουν σε αυτή τη δεύτερη γενιά πολυκριτηριακών εξελικτικών μεθόδων, είναι ο γενετικός αλγόριθμος πολλαπλών στόχων (MOGA) (Fonseca & Fleming, 1993) και ο γενετικός αλγόριθμος με θύλακες Pareto (NPGA) (Horn & Nafpliotis, 1993).

Στα τέλη της δεκαετίας του 1990, άρχισαν να αναπτύσσονται οι αλγόριθμοι τρίτης γενιάς. Οι αλγόριθμοι αυτοί, εισήγαγαν την έννοια του εκλεκτικισμού (elitism). Ένα σοβαρό μειονέκτημα των αλγορίθμων δεύτερης γενιάς είναι η απώλεια ορισμένων σημαντικών λύσεων, εξαιτίας της στοχαστικής δομής των μηχανισμών επιλογής. Ενώ με τους αλγορίθμους τρίτης γενιάς, μέσω του εκλεκτικισμού, καθορίστηκε η χρήση μεθόδων ή κανόνων προστασίας των εν λόγω λύσεων. Οι πλέον σύγχρονες μεθοδολογικές προσεγγίσεις που βασίζονται άμεσα ή έμμεσα στην έννοια του εκλεκτικισμού είναι: ο εξελικτικός αλγόριθμος Pareto ισχύος (SPEA) (Zitzler & Thiele, 1998) και η βελτιωμένη εκδοχή του (SPEA-II) (Zitzler, Laumanns, & Thiele, 2001), η εξελικτική στρατηγική με αρχεία Pareto (PAES) (Knowles & Corne, 2000), ο αλγόριθμος επίλυσης Pareto λύσεων με βάση φακέλους (PESA) (Corne, Knowles, & Oates, 2000) και οι μικρο-γενετικοί αλγόριθμοι (micro-GA) (Coello Coello & Pulido, 2001). Για περαιτέρω μελέτη στο αντικείμενο των πολυκριτηριακών εξελικτικών μεθόδων ο αναγνώστης παραπέμπεται στα εγχειρίδια και άρθρα των (Cohon J. L., 1978), (Fonseca & Fleming, 1995), (Coello Coello & Pulido, 2001), (Deb K., 1999), (Van Veldhuizen & Lamont, 2000), (Zitzler, Deb, & Thiele, 2000) και (Knowles & Corne, 2005).

Τέλος πρέπει να επισημανθεί το ότι υπάρχουν μερικές μέθοδοι παραγωγής των λύσεων οι οποίες προτείνονται ειδικά για προβλήματα ακέραιου μαθηματικού προγραμματισμού και οι οποίες δίνονται αναλυτικά στη συνέχεια, καθώς αποτελούν το βασικό σημείο εστίασης της παρούσας διατριβής. Είναι γνωστό

πως τα προβλήματα πολυκριτηριακού μαθηματικού προγραμματισμού εκτός από συνεχείς μεταβλητές απόφασης, συχνά περιλαμβάνουν και διακριτές μεταβλητές όπως τα κλασσικά προβλήματα ακέραιου προγραμματισμού. Στην περίπτωση κατά την οποία υπάρχουν αποκλειστικά μόνο ακέραιες μεταβλητές, το πρόβλημα ανήκει στο λεγόμενο πολυκριτηριακό ακέραιο γραμμικό προγραμματισμό (Multiple Objective Integer Linear Programming, MOILP) και ειδικότερα εάν οι ακέραιες μεταβλητές περιορίζονται στις τιμές 0 ή 1 (δυναδικές μεταβλητές) τότε το πρόβλημα χαρακτηρίζεται ως πολυκριτηριακού ακέραιου δυαδικού προγραμματισμού (Multiple Objective 0-1 programming, MO0-1LP). Στις περισσότερες περιπτώσεις ενυπάρχουν τόσο συνεχείς όσο και ακέραιες ή δυαδικές μεταβλητές οπότε τα προβλήματα αναφέρονται ως προβλήματα πολυκριτηριακού μικτού ακέραιου γραμμικού προγραμματισμού (Multiple Objective Mixed Integer Linear Programming, MOMILP) και πολυκριτηριακού μικτού 0-1 γραμμικού προγραμματισμού (Multiple Objective Mixed 0-1 Linear Programming, MOM0-1LP) αντίστοιχα. Στην παρούσα διδακτορική διατριβή το ενδιαφέρον εστιάζεται στην προσέγγιση του πολυκριτηριακού γραμμικού προγραμματισμού με χρήση ακεραίων και 0-1 μεταβλητών.

Η δυνατότητα διαχείρισης ακεραίων μεταβλητών αποτελεί μία σχετικά νέα και ιδιαίτερα ενδιαφέρουσα περιοχή του μαθηματικού προγραμματισμού η οποία είναι ιδιαίτερα χρήσιμη σε πολλές πρακτικές εφαρμογές τις οποίες δε μπορεί να αντιμετωπίσει ο κλασικός πολυκριτηριακός γραμμικός προγραμματισμός. Ασχολείται με προβλήματα στα οποία υφίστανται διακριτά στοιχεία και μεγέθη τα οποία πρέπει να αποδοθούν ως ακέραιες μεταβλητές, όπως είναι τα προβλήματα διαχείρισης χαρτοφυλακίου (επιλογή επενδύσεων), η μοντελοποίηση του σταθερού κόστους και των οικονομιών κλίμακας, η ενσωμάτωση λογικών και διαζευκτικών συνθηκών κ.ά. (Mitra, Lucas, Moody, & Hadjiconstantinou, 1974); (Williams, 1999); (Hillier & Lieberman, 2005); (Alves & Climaco, 2007). Οι πολλαπλές αντικειμενικές συναρτήσεις μαζί με τη δυνατότητα εισαγωγής ακεραίων μεταβλητών προσφέρουν μια πιο ρεαλιστική απεικόνιση πολλών πραγματικών προβλημάτων και προσομοιώνουν καλύτερα τις συνθήκες λήψης απόφασης (Μαυρωτάς, 2000). Χαρακτηριστικά παραδείγματα είναι ο ενεργειακός σχεδιασμός, η χωροθέτηση δραστηριοτήτων,

η επιλογή δημόσιων επενδύσεων, η επέκταση της δυναμικότητας των παραγωγικών μονάδων, το πρόβλημα της σύντομης διαδρομής κ.ο.κ. (Rasmussen, 1986); (Μαυρωτάς, 2000). Επίσης ο πολυκριτηριακός μικτός ακέραιος γραμμικός προγραμματισμός χρησιμοποιείται σε περιπτώσεις όπου απαιτείται η ενσωμάτωση διακριτών μεγεθών (λογικές συνθήκες, σταθερά κόστη, οικονομίες κλίμακας, διαζευκτικούς περιορισμούς κλπ.) σε γραμμικά προβλήματα με πολλαπλές αντικειμενικές συναρτήσεις, οπότε ο απλός πολυκριτηριακός γραμμικός προγραμματισμός δεν επαρκεί (Mitra, Lucas, Moody, & Hadjiconstantinou, 1994). Επίσης, με τις ακέραιες μεταβλητές δίνεται η δυνατότητα μοντελοποίησης διαζευκτικών περιορισμών ή περιορισμών υπό συνθήκη στα μοντέλα (πολυκριτηριακού και μη) γραμμικού προγραμματισμού, κάτι που δεν μπορεί να γίνει με τις συνεχείς μεταβλητές και τους συμβατικούς περιορισμούς οι οποίοι πρέπει να εκπληρούνται στο σύνολό τους (Μαυρωτάς, 2000).

Γενικότερα η έρευνα σε μεθόδους πολυκριτηριακού ακέραιου προγραμματισμού είναι πιο περιορισμένη σε σχέση με την αντίστοιχη στον πολυκριτηριακό γραμμικό προγραμματισμό εξαιτίας της ιδιαιτερότητας την οποία προσδίδει η ύπαρξη ακεραίων μεταβλητών (Rasmussen, 1986); (Ulungu & Teghem, 1994); (Climaco, Ferreira, & Captivo, 1997). Η εισαγωγή διακριτών μεταβλητών απόφασης καθιστά πιο πολύπλοκη την αντιμετώπιση των προβλημάτων και πιο δύσκολη την επίλυση των παραγόμενων μοντέλων ακόμα και στην αναφερόμενη περίπτωση του γραμμικού μαθηματικού προγραμματισμού (γραμμικές σχέσεις) (Alves & Climaco, 2007). Αυτό συμβαίνει καθώς το εφικτό χωρίο των λύσεων δεν είναι πλέον κυρτό και επιπλέον εμπεριέχονται περισσότερες δυσκολίες πέραν εκείνων του απλού ακέραιου γραμμικού προγραμματισμού (Alves & Climaco, 2007). Οι περιορισμοί τους οποίους επιφέρουν οι ακέραιες μεταβλητές είναι ακόμα πιο έντονοι καθώς το θεώρημα του Geoffrion (Geoffrion, 1968) το οποίο ορίζει ότι οι ικανές λύσεις ενός προβλήματος πολυκριτηριακού γραμμικού προγραμματισμού μπορούν να προκύψουν ως άριστες λύσεις του σταθμισμένου άθροισματος των αντικειμενικών συναρτήσεων, παύει να ισχύει. Στα συγκεκριμένα προβλήματα, οι ικανές λύσεις οι οποίες μπορεί να προκύψουν από το σταθμισμένο άθροισμα των αντικειμενικών συναρτήσεων λέγονται

υποστηριζόμενες ικανές λύσεις (supported efficient solutions), ενώ αυτές οι οποίες δε μπορούν να προκύψουν με τον τρόπο αυτό, ονομάζονται μη υποστηριζόμενες (non-supported efficient solutions) ικανές λύσεις (Ehr Gott & Ryan, 2002). Ο εντοπισμός των μη υποστηριζόμενων ικανών λύσεων είναι η βασικότερη αιτία για την επιπλέον δυσκολία επίλυσης στα προβλήματα πολυκριτηριακού μικτού ακέραιου γραμμικού προγραμματισμού (Alves & Climaco, 1999); (Μαυρωτάς, 2000). Ο προσδιορισμός των μη υποστηριζόμενων ικανών λύσεων είναι πολύ σημαντικός καθώς σε πολλές περιπτώσεις υπερτερούν σε αριθμό από τις προκύπτουσες υποστηριζόμενες ικανές λύσεις. Σε αυτό το σημείο αξίζει να αναφερθεί ότι σε ορισμένους τύπους προβλημάτων, όπως στην περίπτωση του προβλήματος του σακιδίου, ο αριθμός των υποστηριζόμενων ικανών λύσεων αυξάνει γραμμικά ανάλογα με το μέγεθος του προβλήματος ενώ αντίθετα το σύνολο των μη υποστηριζόμενων ικανών λύσεων ακολουθεί εκθετική πρόοδο (Ehr Gott & Gandibleux, 2000). Η παρουσία των ακεραίων μεταβλητών μετατρέπει ένα πρόβλημα πολυκριτηριακού γραμμικού προγραμματισμού όπως και εκείνου του γραμμικού προγραμματισμού, σε συνδυαστικό καθώς απαιτείται ο υπολογισμός ενός πεπερασμένου αλλά πολύ μεγάλου αριθμού δυνατών συνδυασμών των τιμών τις οποίες μπορούν να λάβουν οι ακεραίες μεταβλητές (Γεωργίου, 2010). Για αυτό και τα προβλήματα αυτά χαρακτηρίζονται και ως προβλήματα πολυκριτηριακής συνδυαστικής βελτιστοποίησης (Multiple Objective Combinatorial Optimization, MOCO) (Ehr Gott & Gandibleux, 2000); (Μαυρωτάς, 2000); (Ehr Gott, 2005). Χαρακτηριστικά παραδείγματα συνδυαστικής βελτιστοποίησης με δυαδικές μεταβλητές είναι το πρόβλημα του περιοδεύοντος πωλητή (traveling salesman problem) και το πρόβλημα του σακιδίου (knapsack problem). Μερικές αρκετά διαδεδομένες μέθοδοι αυτού του τύπου, οι περισσότερες από τις οποίες αφορούν γραμμικά προβλήματα είναι:

- (Pasternak & Passy, 1973), (Bitran G. , 1977), (Bitran G. , 1979), (Deckro & Winkofski, 1986), (Bitran & Riviera, 1982), (Kiziltan & Yucaoglu, 1983) και (White, 1984) – για προβλήματα πολυκριτηριακού ακέραιου δυαδικού προγραμματισμού

- (Klein & Hannan, 1982), (Villareal & Karwan, 1981), (Chalmet, Lemonidis, & Elzinga, 1986), (Sylva & Crema, 2004) και (Ignizio & Thomas, 1984)– για προβλήματα πολυκριτηριακού ακέραιου προγραμματισμού.
- (Mavrotas & Diakoulaki, 1998)– για προβλήματα πολυκριτηριακού μικτού-ακέραιου προγραμματισμού.

Από τα παραπάνω παρατηρείται πως οι περισσότερες από τις προαναφερόμενες μεθόδους αφορούν προβλήματα με ακέραιες μεταβλητές και ειδικότερα σε προβλήματα δυαδικού ακέραιου προγραμματισμού. Αυτό είναι κατανοητό, δεδομένου ότι οι αλγόριθμοι επίλυσης προβλημάτων με δυαδικές μεταβλητές, είναι πολύ πιο αποτελεσματικοί από αυτούς που προορίζονται για προβλήματα ακέραιου προγραμματισμού και γι' αυτό προτιμώνται όπου αυτό είναι εφικτό. Ένα τέτοιο χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η μέθοδος των Mavrotas and Diakoulaki (1998). Η μέθοδος στηρίζεται στη δημιουργία και αποθήκευση δυνητικά μη κυριαρχούμενων λύσεων, που συγκρίνονται διμερώς ώστε να εξαλειφθούν οι κυριαρχούμενες. Έτσι στο τέλος της διαδικασίας οι μοναδικές που παραμένουν είναι οι μη-κυριαρχούμενες λύσεις.

Σε αυτό το σημείο είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι στον πολυκριτηριακό ακέραιο μαθηματικό προγραμματισμό, υπάρχουν μερικές προσεγγίσεις μεθόδων *a-posteriori*, που προσπαθούν να εντοπίσουν ένα αντιπροσωπευτικό υποσύνολο του μη κυριαρχούμενου (non dominated) συνόλου και θα μπορούσαν εύκολα να ενσωματωθούν σε ένα πλαίσιο ώστε να λειτουργούν σαν αλληλεπιδραστικές μέθοδοι (interactive methods). Μια τέτοια προσέγγιση, είναι η βιο-αντικειμενική μέθοδος (biobjective method) που προτάθηκε από τον (Solanki, 1991). Ως εκ τούτου, το όριο μεταξύ μιας μεθόδου παραγωγής και μιας αλληλεπιδραστικής, μπορεί μερικές φορές να είναι μικρό. Για παράδειγμα, μια μέθοδος παραγωγής μπορεί να χρησιμοποιηθεί, για τον υπολογισμό ενός συνόλου μη κυριαρχούμενων λύσεων που θα παρουσιαστούν στο τέλος στον αποφασίζοντα. Στη συνέχεια, ο αποφασίζων μπορεί να επιλέξει όρια για τις αντικειμενικές συναρτήσεις και το πρόβλημα να επιλυθεί από την αρχή, σαν ένα νέο πρόβλημα *a-posteriori*. Αυτή η διαδικασία μπορεί να επαναλαμβάνεται περιορίζοντας ή «χαλαρώνοντας» διαρκώς τα όρια. Αυτός είναι ένας απλός τρόπος μετατροπής μιας μεθόδου παραγωγής σε μια αλληλεπιδραστική προκειμένου να ξεπεραστούν τα μειονεκτήματα της τελευταίας.

Οι (Ramesh, Karwan, & Zionts, 1990), παρουσίασαν μια αλληλεπιδραστική μέθοδο, βασισμένη σε βιοαντικειμενικό ακέραιο γραμμικό προγραμματισμό (Biobjective integer linear programming (BILP)). Οι (Shin & Allen, 1994), παρουσίασαν μια αλληλεπιδραστική μέθοδο γραμμικών και μη γραμμικών ακέραιων προβλημάτων, χρησιμοποιώντας κοίλη αντικειμενική συνάρτηση και κυρτή περιοχή των εφικτών λύσεων. Ο (Aksoy, 1990) ανέπτυξε μια αλληλεπιδραστική μέθοδο μικτού-ακέραιου προγραμματισμού, χρησιμοποιώντας την Πολυκριτηριακή Μέθοδο Διαδοχικών Ορίων - ΠΚΜΔΟ (Multi-Criteria Branch and Bound, MCBB). Η Πολυκριτηριακή Μέθοδος Διαδοχικών Ορίων (τεχνική Branch and Bound) χρησιμοποιήθηκε από τον White, ο οποίος πρότεινε μία αλληλεπιδραστική μέθοδο που χρησιμοποιεί την μέθοδο Branch and Bound σε συνδυασμό με την τεχνική ακέραιο γραμμικού προγραμματισμού που βασίζεται στη «χαλάρωση» κατά Lagrange (White, 1984). Μια νέα αλληλεπιδραστική μέθοδος ακέραιου πολυκριτήριου γραμμικού προγραμματισμού, η οποία συνδυάζει την μέθοδο Interval weight coefficients του Steuer με μία ευρεστική (heuristic) τεχνική επίλυσης προβλημάτων ακεραίου γραμμικού προγραμματισμού αναπτύχθηκε στη συνέχεια από τους Gabbani και Magazine (Gabbani & Magazine, 1986). Οι Gonzalez, Reeves και Franz πρότειναν μια αλληλεπιδραστική διαδικασία για προβλήματα ακέραιου πολυκριτήριου γραμμικού προγραμματισμού στην οποία καινοτομία αποτελεί ο προσδιορισμός ,παράλληλα με την καλύτερη, και της χειρότερης λύσης από το δείγμα των ικανών λύσεων που έχει στη διάθεσή του σε κάθε επανάληψη ο αποφασίζων (Gonzalez, Reeves, & Franz, 1985). Σε αυτή τη μέθοδο η διαδικασία επίλυσης εξελίσσεται αποκλείοντας λύσεις με την εις άτοπον απαγωγή. Επεκτείνοντας τη μέθοδο Branch and Bound, οι Marcotte και Soland κατασκεύασαν μια αλληλεπιδραστική διαδικασία που μπορεί να εφαρμοστεί τόσο σε προβλήματα πολυκριτήριου γραμμικού προγραμματισμού όσο και σε ακέραιου πολυκριτήριου γραμμικού προγραμματισμού (Marcotte & Soland, 1986). Οι Ramesh, Zionts και Karwan επίσης στηρίχθηκαν στην τεχνική branch and bound για τη δημιουργία της δικής τους αλληλεπιδραστικής μεθόδου (Ramesh, Zionts, & Karwan, 1986). Οι Karaivanova, Narula και Vassilev βασιζόμενοι στην αλληλεπιδραστική μέθοδο Tcebycheff του Steuer πρότειναν μια νέα μέθοδο η οποία χρησιμοποιεί έναν ευρετικό αλγόριθμο για την επίλυση των επιμέρους προβλημάτων ακέραιου

γραμμικού προγραμματισμού κάθε επανάληψης (Karaivanova et al, 1993). Τέλος, ο (Solanki, 1991), χρησιμοποίησε την τεχνική NISE που ανέπτυξε ο Cohon (1978) για την αναζήτηση ενός αντιπροσωπευτικού υποσυνόλου των μη-κυριαρχούμενων λύσεων. Σε αυτό το σημείο πρέπει αναφερθεί πως τα τελευταία χρόνια ιδιαίτερα δημοφιλείς είναι οι μέθοδοι πολυκριτηριακής εξελικτικής βελτιστοποίησης. Ένα βασικό χαρακτηριστικό των εν λόγω μεθόδων είναι ότι προτείνουν κατάλληλους προσεγγιστικούς αλγόριθμους για την επίλυση προβλημάτων πολυκριτήριας ανάλυσης, ωστόσο η αξιολόγηση της προσέγγισης που επιτυγχάνεται στη λύση του προβλήματος πολυκριτήριας ανάλυσης είναι δυσχερής, ειδικά απουσία της ακριβούς λύσης. Παρόλα αυτά η εφαρμογή των μεθόδων της οικογένειας της πολυκριτηριακής εξελικτικής βελτιστοποίησης παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον σε προβλήματα πολυκριτήριας ανάλυσης με περιορισμούς, συνεχείς και ακέραιες μεταβλητές και γενικά σε προβλήματα της μηχανικής και των επιστημών, όπου η μοντελοποίηση είναι δυσχερής ή αδύνατη. Επίσης, ενδιαφέρουσα είναι η χρήση εξελικτικών αλγορίθμων σε προβλήματα πολυκριτήριου ακέραιου προγραμματισμού τα οποία δεν μπορούν να αντιμετωπιστούν λόγω μεγέθους του υποδείγματος και για τα οποία αρκεί η εύρεση μια προσεγγιστικής λύσης.

Κεφάλαιο 3

3 Μέθοδοι της οικογένειας της μεθόδου των περιορισμών

3.1 Η μέθοδος ϵ -constraint (Μέθοδος των περιορισμών)

Η μέθοδος των περιορισμών πρωτοπαρουσιάστηκε από τους Haimes et al. το 1971. Η βασική ιδέα της μεθόδου είναι η επιλογή μιας αντικειμενικής συνάρτησης προς βελτιστοποίηση με ταυτόχρονη μετατροπή όλων των υπόλοιπων αντικειμενικών συναρτήσεων σε περιορισμούς του προβλήματος, θέτοντας στον καθένα ένα κατώτατο (σε περίπτωση μεγιστοποίησης) ή ανώτατο (σε περίπτωση ελαχιστοποίησης) όριο ϵ_j . Από τη συγκεκριμένη λογική προκύπτει και η ονομασία της μεθόδου ως μέθοδος των περιορισμών. Η μέθοδος των περιορισμών επιλέχθηκε προς μελέτη στη συγκεκριμένη διατριβή λόγω της δυνατότητας χρησιμοποίησής της για την απόκτηση των κατά Pareto βέλτιστων λύσεων σε προβλήματα MOMP με ακέραιες μεταβλητές απόφασης.

Η επίλυση στηρίζεται στην επαναληπτική, συστηματική, μεταβολή του δεξιού σκέλους των περιορισμών των αντικειμενικών συναρτήσεων, Right Hand Side - RHS, προκειμένου να διερευνηθεί - «σαρωθεί»- το σύνολο των πιθανών κατά Pareto βέλτιστων λύσεων. Η άριστη λύση του προκύπτοντος προβλήματος, αποτελεί κατά Pareto βέλτιστη λύση, μόνο εάν όλοι οι περιορισμοί που προκύπτουν από τις υπόλοιπες αντικειμενικές συναρτήσεις ικανοποιούνται ως ισότητες (binding constraints). Εάν δε συμβαίνει αυτό και υπάρχουν εναλλακτικά άριστα, τότε η άριστη λύση που θα βρεθεί μπορεί να μην αποτελεί κατά Pareto βέλτιστη λύση του προβλήματος πολυκριτηριακού γραμμικού προγραμματισμού, αλλά ασθενώς κυριαρχούμενη λύση (Cohon, 1978, Giocoechea et al, 1982, Steuer, 1989). Για την παραγωγή του συνόλου των ικανών λύσεων, το βήμα της συστηματικής μεταβολής του δεξιού σκέλους των περιορισμών των

αντικειμενικών συναρτήσεων πρέπει να είναι αρκετά μικρό. Όσο μεγαλύτερο είναι το εν λόγω βήμα τόσο συντομότερη είναι η διαδικασία επίλυσης, αλλά είναι και «αραιότερο» το αντιπροσωπευτικό υποσύνολο των ικανών λύσεων. Αξίζει επίσης να σημειωθεί ότι λαμβάνονται και ικανές λύσεις που είναι μη-ακραίες ως προς το αρχικό πρόβλημα πολυκριτηριακού προγραμματισμού.

Για να γίνει κατανοητό πως λειτουργεί η συγκεκριμένη μέθοδος εξετάζεται το ακόλουθο πρόβλημα πολυκριτηριακού προγραμματισμού (έστω $\Pi 1$).

$$\begin{aligned} \max\{f_1(\mathbf{x}), f_2(\mathbf{x}), \dots, f_p(\mathbf{x})\}, \\ \text{s. t. } \mathbf{x} \in S \end{aligned} \tag{\Pi 1}$$

Όπου \mathbf{x} το διάνυσμα των μεταβλητών απόφασης, f_1, \dots, f_p οι p το πλήθος αντικειμενικές συναρτήσεις και S το χωρίο των εφικτών λύσεων.

Σύμφωνα με την κεντρική ιδέα της μεθόδου των περιορισμών, βελτιστοποιείται η μια από τις p αντικειμενικές συναρτήσεις (επιλέγεται εδώ ενδεικτικά η f_p) ενώ οι υπόλοιπες $p - 1$ τίθενται ως περιορισμοί, ώστε το πρόβλημα ($\Pi 1$) να διατυπώνεται μαθηματικά ως εξής:

$$\begin{aligned} \text{Max}\{f_p(\mathbf{x})\} \\ \text{s. t.} \\ f_i(\mathbf{x}) \geq e_i, \quad i = 1, \dots, p - 1 \\ \mathbf{x} \in S \end{aligned} \tag{\Pi 2}$$

Η βελτιστοποίηση του προβλήματος ($\Pi 2$) επέρχεται μέσα από διαδοχικές επαναλήψεις, σε κάθε μία από τις οποίες προστίθεται στο δεξιό κάτω όριο (e_i) των αντικειμενικών συναρτήσεων που τέθηκαν ως περιορισμοί ένα αντιπροσωπευτικό βήμα $step_i$. Το πρόβλημα τελικά επιλύεται πάνω σε ένα πλέγμα (grid) μεγέθους $N_2 * N_3 * \dots * N_p$, όπου N_i είναι το εύρος της αντικειμενικής συνάρτησης f_i , δηλαδή η διαφορά μεταξύ μέγιστης και ελάχιστης τιμής.

Έτσι η όλη διαδικασία πραγματοποιείται ως εξής:

Αρχικά επιλύεται το πρόβλημα (P2) χρησιμοποιώντας ως κάτω όρια των περιορισμών των αντικειμενικών συναρτήσεων τις ελάχιστες τιμές της μονοκριτηριακής τους ελαχιστοποίησης στο $x \in S$. Έτσι προκύπτει μια πρώτη άριστη λύση. Εν συνεχεία αυξάνεται το όριο μίας εκ των αντικειμενικών συναρτήσεων που έχουν τεθεί ως περιορισμοί, έστω το όριο e_2 της f_2 , κατά μια ποσότητα βήματος $step_2$, οπότε προκύπτει η νέα τιμή του κατώτατου ορίου της αντικειμενικής συνάρτησης f_2 , έστω e'_2 . Το πρόβλημα (P2) επιλύεται με τη νέα τιμή e'_2 , λαμβάνοντας μια δεύτερη άριστη λύση. Εν συνεχεία αυξάνεται το όριο e'_2 κατά την ίδια ποσότητα $step_2$. Οι τιμές των ορίων των υπολοίπων αντικειμενικών συναρτήσεων f_3, \dots, f_{p-1} , παραμένουν σταθερές στις αρχικές τους τιμές e_3, \dots, e_{p-1} , αντίστοιχα. Η επίλυση του (P2) επαναλαμβάνεται διαδοχικά, αυξάνοντας βηματικά την τιμή του e_2 μέχρι να ληφθεί η μέγιστη τιμή της f_2 (όπως προκύπτει από την μονοκριτηριακή της μεγιστοποίηση), οπότε τότε το δεξί σκέλος του περιορισμού της συνάρτησης f_2 γίνεται πάλι ίσο με την αρχική τιμή e_2 . Οι επιλύσεις του (P2) επαναλαμβάνονται αυξάνοντας κατά βήμα $step_3$ την εκάστοτε τιμή του δεξιού σκέλους της συνάρτησης f_3 , θεωρώντας τα δεξιά μέρη των υπολοίπων περιορισμών σταθερά στις αρχικές τους τιμές. Οι επαναλήψεις ξεκινούν από την τιμή e_3 , η οποία αυξάνεται διαδοχικά στη μορφή $e'_3 = e_3 + step_3$, και ακολουθούν την ήδη περιγραφείσα πορεία μέχρι το σημείο που αντιστοιχεί στην ανώτατη μέγιστη τιμή της μονοκριτηριακής βελτιστοποίησης της f_3 . Όταν το δεξί σκέλος του περιορισμού της f_3 φτάσει στο άνω όριο τότε γίνεται πάλι ίσο με το αρχικό και τώρα αυξάνεται κατά $step_4$ το όριο e_4 κ.ο.κ. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται για τους περιορισμούς όλων των αντικειμενικών συναρτήσεων μέχρι να καλυφθεί όλο το πλέγμα. Έτσι λαμβάνονται οι λύσεις του προβλήματος βελτιστοποίησης οι οποίες είναι p -αδες.

Γίνεται φανερό πως μέσα από τις διαδοχικές επαναλήψεις, σαρώνεται το σύνολο του πεδίου τιμών των περιορισμών/αντικειμενικών συναρτήσεων και σχηματίζεται, απουσία εναλλακτικών βελτίστων, το αποτελεσματικό μέτωπο των ικανών λύσεων κατά Pareto. Οι περιορισμοί, δηλαδή, οριοθετούν το πεδίο αναζήτησης λύσεων, αποκλείοντας με αυτό τον τρόπο την αναζήτηση σε περιοχές που δεν περιλαμβάνουν την εφικτή περιοχή των ικανών λύσεων. Θεωρητικά, κάθε μέτωπο των ικανών κατά Pareto λύσεων, οποιουδήποτε πολυκριτηριακού

προβλήματος βελτιστοποίησης, μπορεί να υπολογιστεί με την μέθοδο των περιορισμών, μεταβάλλοντας τα κάτω όρια των περιορισμών. Ένα πλεονέκτημα της μεθόδου των περιορισμών είναι η δυνατότητα ελέγχου του πλήθους των παραγόμενων κατά Pareto βέλτιστων λύσεων, προσαρμόζοντας κατάλληλα το πλήθος των σημείων πλέγματος (grid points), δηλαδή των σημείων του πλέγματος πάνω στα οποία θα γίνεται η εκάστοτε βελτιστοποίηση, στα εύρη των αντικειμενικών συναρτήσεων. Ωστόσο, υπολογιστικά, η συγκεκριμένη μέθοδος δεν είναι ιδιαίτερα πρακτική λόγω της απαίτησης αυξημένου αριθμού επαναλήψεων που καθιστά την επίλυση μεγάλων προβλημάτων πρακτικά αδύνατη.

Συγκεκριμένα η μέθοδος των περιορισμών μειονεκτεί όσον αφορά τα παρακάτω (Manrotas, 2009):

- Ο απαιτούμενος υπολογιστικός χρόνος επίλυσης του προβλήματος για περισσότερες των δύο αντικειμενικών συναρτήσεων είναι τεράστιος, ειδικά για συναρτήσεις με μεγάλα εύρη τιμών, όπου η εξαντλητική διερεύνηση του συνόλου των σημείων του πλέγματος προς την ανίχνευση του συνόλου των βέλτιστων λύσεων απαιτεί πληθώρα επαναληπτικών επιλύσεων. Η επιβάρυνση στον υπολογιστικό χρόνο εξαρτάται, και ως εκ τούτου ελέγχεται, από την επιλογή του βήματος $step_i$ στο δεξιό μέλος των περιορισμών. Ωστόσο, για να οδηγήσει σε αντιπροσωπευτικό σύνολο ικανών λύσεων το βήμα πρέπει να είναι αρκετά μικρό και ο αριθμός επαναλήψεων μεγάλος, κάτι που καθιστά πρακτικά την επίλυση υπολογιστικά ανέφικτη.
- Επιπλέον ο υπολογισμός του εύρους της κάθε αντικειμενικής συνάρτησης, που χρησιμοποιείται για τον καθορισμό του μεγέθους του πλέγματος πάνω στο οποίο γίνεται η επίλυση, εμφανίζει στη γενική περίπτωση ιδιαίτερη δυσκολία. Παράλληλα η σωστή εκτίμηση των ανώτατων και κατώτατων ορίων των αντικειμενικών συναρτήσεων που τίθενται ως περιορισμοί επηρεάζει τόσο την ταχύτητα της επίλυσης, όσο και την αποτελεσματικότητα των προκυπτουσών λύσεων.
- Τέλος, ιδιαίτερα σημαντικό είναι το γεγονός ότι λόγω της παρουσίας εναλλακτικών βέλτιστων δεν εξασφαλίζεται με βεβαιότητα ότι οι παραγόμενες λύσεις ανήκουν στο σύνολο των κατά Pareto βέλτιστων λύσεων. Είναι πιθανό οι λύσεις της μεθόδου των περιορισμών να ανήκουν στο μέτωπο Pareto ασθενώς μη κυριαρχούμενων λύσεων, το οποίο καθίσταται μη αποτελεσματικό.

3.2 Η μέθοδος AUGMECON (Augmented ϵ -constraint)

Η επαυξημένη μέθοδος των περιορισμών (augmented ϵ -constraint, AUGMECON), (Mavrotas, 2009) αποτελεί μία βελτιωμένη εκδοχή της μεθόδου των περιορισμών. Η μέθοδος AUGMECON πλεονεκτεί της μεθόδου των περιορισμών σε τρία βασικά σημεία τα οποία επιχειρούν να επιλύσουν τα τρία κύρια μειονεκτήματα της μεθόδου των περιορισμών, όπως αναλύθηκαν στην ακριβώς παραπάνω παράγραφο. Το πρώτο σημείο βελτίωσης που εισάγει η AUGMECON αφορά τη δυνατότητα να εφαρμοστεί αποτελεσματικότερα σε προβλήματα με περισσότερες από δυο αντικειμενικές συναρτήσεις, μειώνοντας τον χρόνο επίλυσης ο οποίος, όπως έχει επεξηγηθεί, στην περίπτωση της μεθόδου των περιορισμών είναι τεράστιος και ως εκ τούτου δεν επιτρέπει την εφαρμογή της σε παρόμοια προβλήματα (Mavrotas and Florios, 2013). Επιπλέον η μέθοδος AUGMECON προτείνει έναν αποτελεσματικό τρόπο προσδιορισμού του εύρους των αντικειμενικών συναρτήσεων που τίθενται ως περιορισμοί, ειδικά όσον αφορά την εκτίμηση των μέγιστων/ελαχίστων τιμών των συναρτήσεων στις περιπτώσεις ελαχιστοποίησης/ μεγιστοποίησης αντιστοίχως. Οι εν λόγω τιμές προσδιορίζονται, όπως θα εξηγηθεί αναλυτικά στη συνέχεια, με χρήση λεξικογραφικής βελτιστοποίησης. Το τρίτο σημείο υπεροχής της μεθόδου AUGMECON έναντι της μεθόδου των περιορισμών είναι ότι εξαναγκάζει τον αλγόριθμο να παράγει μόνο λύσεις που ανήκουν στο σύνολο των βέλτιστων κατά Pareto, αποφεύγοντας λύσεις που ανήκουν στο μέτωπο των ασθενώς μη κυριαρχούμενων λύσεων.

Έτσι, το πρόβλημα (P2) της μεθόδου των περιορισμών μετασχηματίζεται σύμφωνα με τη μέθοδο AUGMECON στην ακόλουθη μορφή:

$$\begin{aligned} & \max\{f_1(\mathbf{x}) + \epsilon * (s_2/r_2 + s_3/r_3 + \dots + s_p/r_p)\} \\ & \text{s. t.} \\ & f_2(\mathbf{x}) - s_2 = e_2 \\ & f_3(\mathbf{x}) - s_3 = e_3 \end{aligned} \tag{P3}$$

...

$$f_p(\mathbf{x}) - s_p = e_p$$

$$\mathbf{x} \in S$$

$$s_i \in R^+, i = 2, \dots, p$$

όπου s_i είναι οι μεταβλητές απόκλισης που θεωρείται ότι παίρνουν θετικές τιμές, r_i το εύρος της αντικειμενικής i και eps είναι ένας πολύ μικρός αριθμός συνήθως στο διάστημα $(10^{-6}, 10^{-3})$. Κάθε μεταβλητή απόκλισης της προς βελτιστοποίηση συνάρτησης διαιρείται με το εύρος της αντίστοιχης αντικειμενικής r_i προκειμένου να αποφευχθεί πιθανή δυσανάλογη επιρροή των μεταβλητών στην βελτιστοποίηση, στην περίπτωση διαφορετικού μεγέθους αντίστοιχων αντικειμενικών συναρτήσεων.

Παρατηρείται ότι η σημαντικότερη διαφορά ανάμεσα στη μαθηματική διατύπωση της AUGMECON και της μεθόδου των περιορισμών έγκειται στον μετασχηματισμό των ανισοτικών περιορισμών των αντικειμενικών συναρτήσεων τους οποίους προτείνει η μέθοδος των περιορισμών, σε ισότητες. Η μετατροπή σε ισότητες γίνεται ενσωματώνοντας τις κατάλληλες μεταβλητές απόκλισης s , surplus ή slack variables (ανάλογα με το αν έχουν μεγιστοποίηση ή ελαχιστοποίηση αντίστοιχα). Η συγκεκριμένη προσθήκη διασφαλίζει τη δημιουργία αποκλειστικά ικανών λύσεων από την AUGMECON, όπως αποδεικνύει η Πρόταση 1. Την ίδια στιγμή οι μεταβλητές απόκλισης χρησιμοποιούνται ως δεύτερος όρος με μειωμένη προτεραιότητα βελτιστοποίησης (με λεξικογραφικό τρόπο) στην ελεύθερη αντικειμενική που βελτιστοποιείται.

ΠΡΟΤΑΣΗ 1: Η παραπάνω μαθηματική διατύπωση (P3) της μεθόδου των περιορισμών παράγει μόνο ικανές λύσεις.

ΑΠΟΔΕΙΞΗ (Mavrotas, 2009): Έστω ότι το πρόβλημα P2 έχει εναλλακτικά βέλτιστα και ένα από αυτά, έστω \mathbf{x}' , κυριαρχεί επί μιας βέλτιστης λύσης \mathbf{x} που παράγεται από τη μαθηματική διατύπωση (P3). Αυτό σημαίνει ότι το διάνυσμα $(z_1, e_2 + s_2, e_3 + s_3, \dots, e_p + s_p)$ κυριαρχείται από το διάνυσμα $(z_1, e_2 + s_2', e_3 + s_3', \dots, e_p + s_p')$ ή αλλιώς:

$$e_2 + s_2 \leq e_2 + s'_2$$

$$e_3 + s_3 \leq e_3 + s'_3$$

...

$$e_p + s_p \leq e_p + s'_p$$

με τουλάχιστον μία από τις παραπάνω ανισότητες να είναι γνήσια. Να σημειωθεί ότι $z_1 = \max\{f_1(x)\} = \max\{f_1(x')\}$ δεδομένου ότι έχουν υποτεθεί δύο εναλλακτικά βέλτιστα για το πρόβλημα Π2. Λαμβάνοντας το άθροισμα κατά μέλη των παραπάνω ανισοτήτων και δεδομένου ότι τουλάχιστον μια ανισότητα είναι γνήσια, προκύπτει η σχέση:

$$\sum_{i=2}^p s_i < \sum_{i=2}^p s'_i$$

Ωστόσο η παραπάνω ανισότητα αντικρούει την αρχική υπόθεση ότι η βέλτιστη λύση του προβλήματος Π3 μεγιστοποιεί το άθροισμα των s_i (σε αυτό το σημείο υπενθυμίζεται η προσθήκη του δεύτερου όρου $-eps * (s_2 + s_3 + \dots + s_p)$ – στην προς βελτιστοποίηση συνάρτηση του Π3). Επομένως η υπόθεση για κυριαρχία του διανύσματος $(z_1, e_2 + s_2, e_3 + s_3, \dots, e_p + s_p)$ από το $(z_1, e_2 + s'_2, e_3 + s'_3, \dots, e_p + s'_p)$ καταλήγει σε άτοπο και άρα οι λύσεις που λαμβάνονται είναι κατά κανόνα ικανές λύσεις του προβλήματος βελτιστοποίησης Π3.

Πέρα από τη διασφάλιση παραγωγής αποκλειστικά ικανών λύσεων, μια ακόμα σημαντική συμβολή της μεθόδου AUGMECON είναι η χρήση του πίνακα πληρωμών και της λεξικογραφικής βελτιστοποίησης για την εύρεση των ορίων των αντικειμενικών συναρτήσεων. Όπως προκύπτει από την περιγραφή της, η εφαρμογή της μεθόδου των περιορισμών προϋποθέτει τον εκ των προτέρων προσδιορισμό του εύρους κάθε αντικειμενικής συνάρτησης, ειδικά και κατ'ελάχιστο του συνόλου των αντικειμενικών συναρτήσεων που πρόκειται να τεθούν ως περιορισμοί (δηλαδή σε σύνολο p αντικειμενικών συναρτήσεων απαιτείται, σύμφωνα με τη μέθοδο των περιορισμών, η γνώση του εύρους των $p - 1$ αντικειμενικών συναρτήσεων οι οποίες θα χρησιμοποιηθούν ως περιορισμοί). Ο υπολογισμός του εύρους των αντικειμενικών συναρτήσεων στο

σύνολο του εφικτού πεδίου τιμών δεν είναι μια τετριμμένη διαδικασία. Στην περίπτωση μεγιστοποίησης, ο υπολογισμός της μέγιστης τιμής μιας αντικειμενικής συνάρτησης είναι εύκολος αφού αυτή αποκτάται αν βελτιστοποιήσουμε την κάθε αντικειμενική μεμονωμένα, αγνοώντας ουσιαστικά την ύπαρξη των υπολοίπων. Ωστόσο ο υπολογισμός της ελάχιστης τιμής κάθε αντικειμενικής συνάρτησης είναι στην προκειμένη αρκετά πολυπλοκότερη και για τον υπολογισμό αυτών των ελάχιστων τιμών (nadir points) χρησιμοποιείται από την μέθοδο AUGMECON ο πίνακας πληρωμών (payoff table) και η λεξικογραφική βελτιστοποίηση.

Ο πίνακας πληρωμών είναι ο πίνακας τιμών της ανεξάρτητης βελτιστοποίησης των αντικειμενικών συναρτήσεων. Πρόκειται ουσιαστικά για έναν τετραγωνικό πίνακα που αποτελείται από τόσες γραμμές και στήλες όσες και οι αντικειμενικές συναρτήσεις του προβλήματος ΠΚΓΠ. Κάθε στήλη αντιστοιχεί σε μία αντικειμενική συνάρτηση. Σε κάθε γραμμή του πίνακα θεωρείται ότι βελτιστοποιείται μεμονωμένα μια αντικειμενική συνάρτηση (έστω i) και λαμβάνεται η άριστη λύση x_i . Οι τιμές των αντικειμενικών συναρτήσεων που προκύπτουν από την άριστη λύση x_i . (τόσο αυτής που βελτιστοποιήθηκε όσο και των υπολοίπων) τοποθετούνται στη δεδομένη γραμμή του πίνακα. Δηλαδή αν θεωρηθεί ότι υφίσταται μόνο η προς βελτιστοποίηση αντικειμενική συνάρτηση f_1 , η οποία λαμβάνει την μέγιστη τιμή της για ένα διάνυσμα μεταβλητών απόφασης x_1 , η πρώτη γραμμή του πίνακα συμπληρώνεται με τις τιμές $f_1(x_1)$, $f_2(x_1), \dots, f_p(x_1)$. Για τη δεύτερη γραμμή θεωρείται βελτιστοποίηση της αντικειμενικής συνάρτησης f_2 κ.ο.κ. Στη διαγώνιο του πίνακα τιμών προκύπτουν οι συντεταγμένες του ιδεώδους σημείου.

Στον Πίνακα 3-1 φαίνεται η μορφή του πίνακα τιμών ενός προβλήματος ΠΚΓΠ με k αντικειμενικές συναρτήσεις. Με z_i^* απεικονίζεται η άριστη τιμή της i αντικειμενικής συνάρτησης και με $z_{i,j}$ η τιμή της j αντικειμενικής συνάρτησης όπως προκύπτει από την άριστη λύση της i αντικειμενικής συνάρτησης. Έτσι η ελάχιστη τιμή (nadir value) μιας αντικειμενικής συνάρτησης θεωρείται η ελάχιστη τιμή από την εκάστοτε στήλη.

Πίνακας 3-1: Πίνακας πληρωμών προβλήματος ΠΚΓΠ με k αντικειμενικές συναρτήσεις

| | f_1 | f_2 | ... | f_k |
|------------|-----------|-----------|-----|-----------|
| $\max f_1$ | z_1^* | $z_{1,2}$ | ... | $z_{1,k}$ |
| $\max f_2$ | $z_{2,1}$ | z_2^* | ... | $z_{2,k}$ |
| ... | ... | ... | ... | ... |
| $\max f_k$ | $z_{k,1}$ | $z_{k,2}$ | ... | z_k^* |

Η πληροφορία του πίνακα είναι πολύ χρήσιμη γιατί προσφέρει στον χρήστη μια εκτίμηση για το εύρος των τιμών των αντικειμενικών συναρτήσεων. Ωστόσο πρέπει να επισημανθεί πως η ελάχιστη τιμή κάθε αντικειμενικής συνάρτησης όπως προκύπτει από τον πίνακα πληρωμών, ενδέχεται να μην ταυτίζεται με την ελάχιστη τιμή της ως προς το σύνολο των ικανών λύσεων (Isserman and Streuer, 1987, Reeves and Reid, 1988), δηλαδή δεν είναι απαραίτητο ότι οι λύσεις της ανεξάρτητης βελτιστοποίησης θα είναι ταυτόχρονα και κατά Pareto βέλτιστες (ή ικανές) λύσεις. Αυτό γιατί παρουσία εναλλακτικών βέλτιστων η λύση που παράγεται από ένα εμπορικό λογισμικό δεν είναι εγγυημένα μια κατά Pareto βέλτιστη λύση. Προκειμένου η κάθε μία από τις βελτιστοποιήσεις να οδηγεί σε ικανή λύση του προβλήματος ΠΚΓΠ, η μέθοδος AUGMECON προτείνει την εφαρμογή λεξικογραφικής βελτιστοποίησης ώστε να αντιμετωπίζεται και η περίπτωση των εναλλακτικών άριστων λύσεων και τελικά να κατασκευαστεί ο πίνακας πληρωμών με μόνο κατά Pareto βέλτιστες λύσεις.

Πέρα από την κατασκευή του πίνακα πληρωμών η λογική της επίλυσης της μεθόδου AUGMECON είναι παρόμοια με τη μέθοδο των περιορισμών. Αρχικά υπολογίζεται το εύρος κάθε αντικειμενικής που πρόκειται να τεθεί ως περιορισμός από τον πίνακα πληρωμών. Στη συνέχεια διαιρείται το εύρος της i -οστής αντικειμενικής σε q_i ίσα διαστήματα χρησιμοποιώντας $q_i - 1$ εσωτερικά σημεία. Επομένως προκύπτουν $q_i + 1$ συνολικά σημεία πλέγματος τα οποία χρησιμοποιούνται για να μεταβληθεί παραμετρικά το δεξί μέλος (e_i) των περιορισμένων αντικειμενικών συναρτήσεων. Ο μέγιστος συνολικός αριθμός βελτιστοποιήσεων διαμορφώνεται σε $(q_1 + 1) \times (q_2 + 1) \times \dots \times (q_p + 1)$. Κατά την επίλυση μπορεί να καθοριστεί κατάλληλα η πυκνότητα του συνόλου των ικανών λύσεων με το να προσδιοριστεί το κατάλληλο πλήθος των q_i . Όσο

μεγαλύτερο είναι το πλήθος των q_i τόσο πιο πυκνό θα είναι το σύνολο των προκυπτουσών λύσεων αλλά τόσο μεγαλύτερος θα είναι και ο υπολογιστικός χρόνος. Συνεπώς συνίσταται μια αντιστάθμιση μεταξύ χρόνου και πυκνότητας λύσεων.

Παρακάτω γίνεται μια προσπάθεια παρουσίασης της μεθόδου AUGMECON μέσω ενός παραδείγματος έτσι ώστε να εξηγηθεί καλύτερα η επιπρόσθετη αξία που προσφέρει σε σχέση με την κλασική μέθοδο των περιορισμών. Το παράδειγμα περιλαμβάνει δύο μεταβλητές απόφασης και δύο αντικειμενικές συναρτήσεις για να μπορεί να παρασταθεί γραφικά.

Έστω το παρακάτω πρόβλημα, που στο εξής θα συμβολίζεται ως Π4:

$$\max\{f_1(x_1, x_2)\} = x_1$$

$$\max\{f_2(x_1, x_2)\} = 3x_1 + 4x_2$$

s. t.

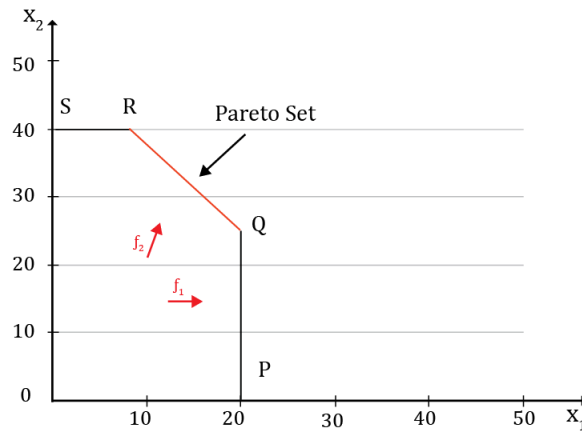
$$x_1 \leq 20$$

$$x_2 = 40$$

$$5x_1 + 4x_2 \leq 200$$

(Π4)

Στο Σχήμα 3-1, είναι διακριτό το σύνολο των ικανών κατά Pareto λύσεων, το οποίο απεικονίζεται με την γραμμή RQ , αλλά και το σύνολο των ασθενώς μη κυριαρχούμενων λύσεων (Weakly Pareto Set), το οποίο βρίσκεται πάνω στη γραμμή QP .



Σχήμα 3-1: Σύνολο των ικανών λύσεων για το πρόβλημα P

Επίσης στο σχήμα φαίνεται η κατεύθυνση των δύο αντικειμενικών συναρτήσεων. Παρατηρείται ότι η αντικειμενική συνάρτηση f_1 είναι παράλληλη με το ευθύγραμμο τμήμα QP που αντιστοιχεί στον περιορισμό $x_1 \leq 20$ κάτι που οδηγεί σε δυο εναλλακτικές άριστες ακραίες λύσεις για την f_1 . Αυτές είναι οι λύσεις Q και P . Επομένως, σύμφωνα με τη μέθοδο AUGMECON, λόγω της παρουσίας εναλλακτικών άριστων λύσεων προκύπτει η ανάγκη εφαρμογής λεξικογραφικής βελτιστοποίησης, ώστε να εντοπιστεί στον πίνακα πληρωμών η κατά Pareto βέλτιστη λύση (Q) και να αποφευχθούν ασθενώς κυριαρχούμενες λύσεις (P).

Ο πίνακας πληρωμών που προκύπτει χωρίς λεξικογραφική βελτιστοποίηση είναι:

Πίνακας 3-2: Πίνακας πληρωμών του προβλήματος P χωρίς λεξικογραφική βελτιστοποίηση

| | f_1 | f_2 |
|------------|-------|-------|
| $\max f_1$ | 20 | 60 |
| $\max f_2$ | 8 | 184 |

Παρατηρείται ότι η βέλτιστη λύση για την f_1 ($f_1 = 20$, με $f_2 = 60$), η οποία αντιστοιχεί στο σημείο P του σχήματος Σχήμα 3-1 είναι κυριαρχούμενη λύση εξαιτίας του εναλλακτικού βέλτιστου (σημείο Q). Δηλαδή και για το P και για το Q η f_1 λαμβάνει την ίδια τιμή (εναλλακτικά βέλτιστα), όμως η f_2 λαμβάνει μεγαλύτερη τιμή στο Q , οπότε το P δεν περιλαμβάνεται στο βέλτιστο μέτωπο Pareto, αφού κυριαρχείται ασθενώς από τη λύση Q . Ωστόσο είναι σχεδόν σίγουρο ότι ένα λογισμικό βελτιστοποίησης για γραμμικό προγραμματισμό θα υπολογίσει την λύση του σημείου P πρώτα και θα σταματήσει το ψάξιμο για εναλλακτικά βέλτιστα δίνοντας αυτή ως έξοδο. Για να αντιμετωπιστεί αυτό το πρόβλημα

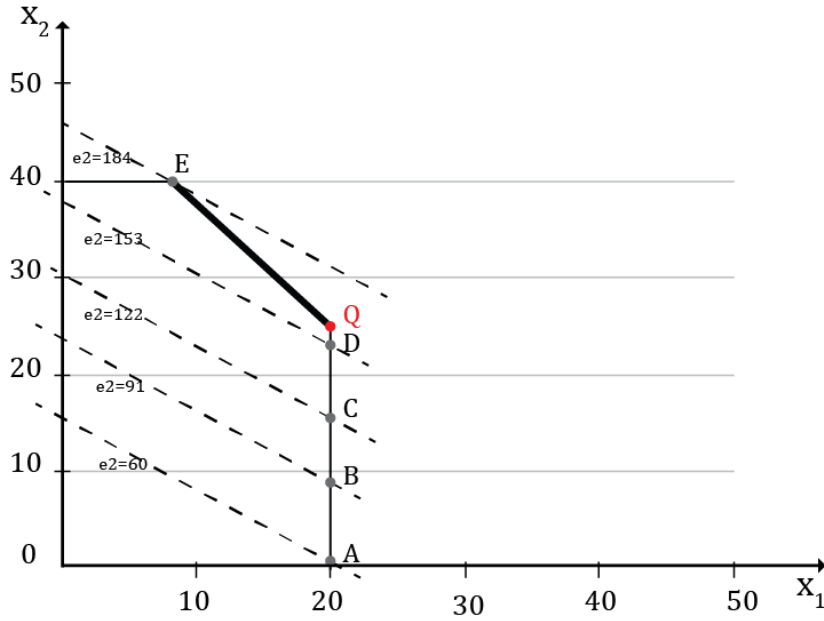
χρησιμοποιείται η λεξικογραφική βελτιστοποίηση των αντικειμενικών συναρτήσεων, τα αποτελέσματα της οποίας φαίνονται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 3-3: Πίνακας πληρωμών του προβλήματος P με λεξικογραφική βελτιστοποίηση

| | f_1 | f_2 |
|------------|-------|-------|
| $\max f_1$ | 20 | 160 |
| $\max f_2$ | 8 | 184 |

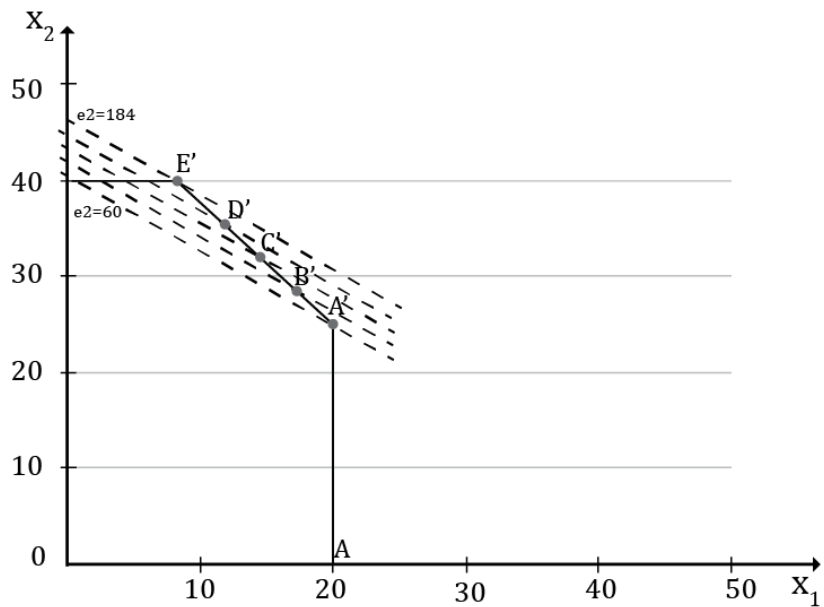
Με τη λεξικογραφική βελτιστοποίηση προκύπτει ως λύση που μεγιστοποιεί την f_1 , η λύση που αντιστοιχεί στο σημείο Q , η οποία οδηγεί σε καλύτερη τιμή για τη συνάρτηση f_2 και είναι κατά Pareto βέλτιστη.

Η εύρεση των ορίων των συναρτήσεων με λεξικογραφική βελτιστοποίηση έχει ιδιαίτερη αξία στα επόμενα βήματα επίλυσης. Προκειμένου να γίνει αυτό κατανοητό, έχοντας βρει τα εύρη κάθε αντικειμενικής συνάρτησης, ακολουθεί η επίλυση του προβλήματος $P4$ ακολουθώντας δυο προσεγγίσεις. Στην πρώτη περίπτωση εφαρμόζεται η συμβατική μέθοδος των περιορισμών, με τα όρια των συναρτήσεων να προκύπτουν χωρίς να ληφθεί υπόψη η εφαρμογή της λεξικογραφικής βελτιστοποίησης. Στη δεύτερη περίπτωση εξετάζονται τα αποτελέσματα της μεθόδου των περιορισμών αν εφαρμοστούν τα αποτελέσματα της λεξικογραφικής βελτιστοποίησης. Και στις δυο προσεγγίσεις θεωρείται προς βελτιστοποίηση η αντικειμενική συνάρτηση f_1 , ενώ η συνάρτηση f_2 μετατρέπεται σε περιορισμό. Το εύρος της αντικειμενικής συνάρτησης f_2 χωρίζεται σε τέσσερα διαστήματα οπότε προκύπτουν πέντε τιμές για το ανώτατο όριο (e_2) της f_2 και άρα πέντε σημεία πλέγματος για κάθε ένα από τα οποία θα γίνει μια επίλυση του προβλήματος βελτιστοποίησης.



Σχήμα 3-2: Αποτελέσματα συμβατικής μεθόδου περιορισμών για το πρόβλημα Π4

Οι λύσεις που αντιστοιχούν στα σημεία A, B, C, D, E είναι τα αποτελέσματα της συμβατικής μεθόδου περιορισμών. Στην πραγματικότητα μόνο το σημείο E αντιστοιχεί σε ικανή λύση ενώ τα άλλα τέσσερα σημεία κυριαρχούνται από το σημείο Q .



Σχήμα 3-3: Αποτελέσματα μεθόδου περιορισμών για το πρόβλημα P με χρήση λεξικογραφικής βελτιστοποίησης στον πίνακα πληρωμών

Από την άλλη πλευρά, εάν χρησιμοποιηθεί ο πίνακας πληρωμών από την λεξικογραφική βελτιστοποίηση, τα αποτελέσματα της μεθόδου

αντιπροσωπεύουν μια πιο πυκνή και ικανοποιητική αναπαράσταση του συνόλου των ικανών λύσεων. Παρατηρείται ότι τα σημεία A', B', C', D' και E' είναι όλα βέλτιστα σημεία και περιγράφουν ικανοποιητικά το σύνολο των ικανών λύσεων.

Μετά τον υπολογισμό του πίνακα πληρωμών το δεύτερο σημείο που απαιτεί προσοχή είναι η εξασφάλιση ότι οι λύσεις που παράγονται από τον αλγόριθμο είναι κατά Pareto βέλτιστες και όχι ασθενώς Pareto βέλτιστες, όπως εντοπίζονται στην περίπτωση που υπάρχουν εναλλακτικά βέλτιστα.

Αξίζει να σημειωθεί ότι στο παράδειγμα που χρησιμοποιήθηκε (πρόβλημα Π4) ακόμα και αν δεν γίνει εφαρμογή της λεξικογραφικής βελτιστοποίησης στον πίνακα πληρωμών, η εφαρμογή της AUGMECON θα παρείχε μόνο λύσεις μεταξύ των σημείων E και Q (Σχήμα 3-3) αποφεύγοντας τις ασθενώς κυριαρχούμενες λύσεις A, B, C, D . Αυτό σημαίνει ότι παρόλο που υπήρχε μια κυριαρχούμενη λύση στον πίνακα πληρωμών η AUGMECON παράγει τα σωστά αποτελέσματα εξαιτίας των διορθωτικών όρων -δηλαδή των surplus variables- που μεγιστοποιούνται (σε δευτερεύουσα φάση) κατά τη μεγιστοποίηση της επεκτεταμένης αντικειμενικής.

3.2.1 Αλγοριθμική υλοποίηση της μεθόδου AUGMECON

Ένα καινοτόμο στοιχείο του αλγόριθμου της μεθόδου AUGMECON είναι η πρόωρη έξοδος από βρόγχους όπου το προς επίλυση πρόβλημα είναι αδύνατο (infeasible). Η συγκεκριμένη υλοποίηση επιταχύνει σημαντικά τον αλγόριθμο σε περιπτώσεις πολλαπλών -περισσότερων από τριών- αντικειμενικών συναρτήσεων. Ο αλγόριθμος ξεκινά με τις περιορισμένες αντικειμενικές να φράσσονται από κάτω όρια (σε περίπτωση μεγιστοποίησης) τα οποία σταδιακά κατά τη διάρκεια του αλγόριθμου γίνονται πιο αυστηρά. Αυτό σημαίνει ότι για μεγιστοποίηση αντικειμενικών συναρτήσεων και για ένα δεδομένο περιορισμό, το σημείο εκκίνησης στο δεξί σκέλος του αντίστοιχου περιορισμού είναι το ελάχιστο, το οποίο σταδιακά αυξάνεται. Το αντίθετο εφαρμόζεται στην περίπτωση ελαχιστοποίησης. Κατά την διάρκεια της διαδικασίας αυτής εάν προκύψει ότι το πρόβλημα είναι αδύνατο συμπεραίνεται ότι δεν χρειάζεται να αυξηθεί περαιτέρω το δεξί σκέλος της αντίστοιχης αντικειμενικής αφού θα οδηγήσει πάλι σε μια κατάσταση στην οποία το πρόβλημα είναι αδύνατο. Με άλλα

λόγια, εάν το πρόβλημα είναι αδύνατο για συγκεκριμένο κατώτατο όριο αντικειμενικών συναρτήσεων, τότε όσο αυστηρότεροι γίνονται οι περιορισμοί, που σημαίνει ότι αυξάνονται τα κατώτατα όρια, τόσο μεγαλύτερη είναι η βεβαιότητα ότι το πρόβλημα θα παραμείνει αδύνατο. Συνεπώς ο αλγόριθμος εξέρχεται από τον πιο εμφωλευμένο βρόχο και η όλη διαδικασία συνεχίζεται από το επόμενο σημείο πλέγματος της αντικειμενικής που αντιστοιχεί στον αμέσως εξωτερικότερο βρόχο από αυτόν που εξήλθε ο αλγόριθμος. Η παραπάνω διαδικασία περιγράφεται παραστατικά με το ακόλουθο παράδειγμα όπου επιλύεται ένα απλό πολυκριτηριακό πρόβλημα τριών αντικειμενικών συναρτήσεων.

Έστω το πολυκριτηριακό πρόβλημα Π5:

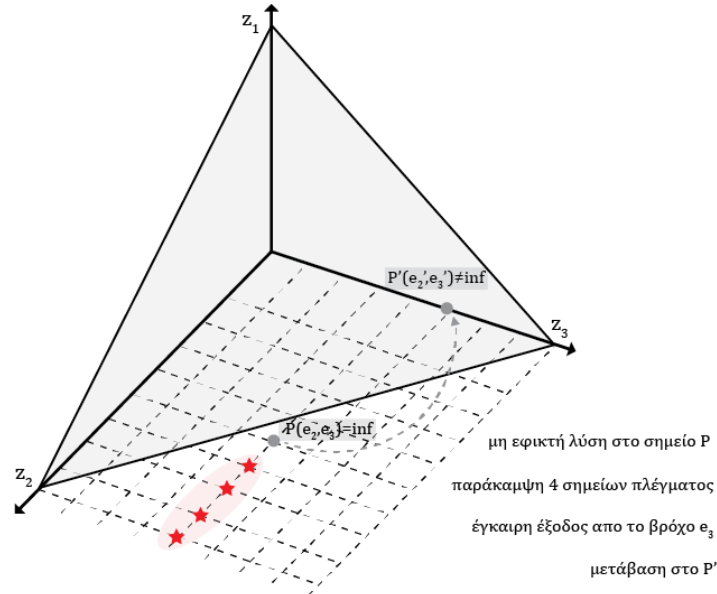
$$\begin{aligned}
 \max z_1 &= x_1 \\
 \max z_2 &= x_2 \\
 \max z_3 &= x_3 \\
 & \text{s. t.} \\
 x_1 + x_2 + x_3 &\leq 1 \\
 x_1, x_2, x_3 &\in R^+
 \end{aligned}
 \tag{Π5}$$

Το πρόβλημα Π5 μετασχηματίζεται σύμφωνα με τις αρχές της μεθόδου των περιορισμών στο ακόλουθο ισοδύναμο Π6, το οποίο είναι ένα παραμετρικό πρόβλημα ως προς τα e_2, e_3 :

$$\begin{aligned}
 \max z_1 &= x_1 \\
 & \text{s. t.} \\
 x_2 &\geq e_2 \\
 x_3 &\geq e_3 \\
 x_1 + x_2 + x_3 &\leq 1
 \end{aligned}
 \tag{Π6}$$

$$x_1, x_2, x_3 \in R^+$$

Στο Σχήμα 3-4 απεικονίζονται το μέτωπο Pareto καθώς και τα βήματα πάνω στο πλέγμα τα οποία ακολουθεί η μέθοδος των περιορισμών.



Σχήμα 3-4: Γραφική αναπαράσταση του μετώπου Pareto του μοντέλου (*) και η πρόωρη έξοδος της AUGMECON από τους εμφωλευμένους βρόχους (Προσαρμογή από Manrotas, 2009).**

Από την εύρεση του πίνακα πληρωμών του προβλήματος προκύπτει ότι κάθε μία από τις αντικειμενικές συναρτήσεις παίρνει τιμές στο διάστημα $[0,1]$. Επομένως το εύρος της κάθε μιας από τις δυο περιορισμένες αντικειμενικές ισούται με ένα (1) και έχει διαιρεθεί σε δέκα διαστήματα, από τα οποία προκύπτουν έντεκα σημεία πλέγματος ($10+1=11$). Κατά την εκτέλεση του αλγορίθμου όταν $e_2 = 0.5$ και $e_3 = 0.6$ όπως φαίνεται και στο Σχήμα 3-4 το πρόβλημα γίνεται αδύνατο αφού πλέον οι λύσεις που προκύπτουν από την επίλυση είναι εκτός του εφικτού χώρου δεδομένου ότι ο περιορισμός $x_1 + x_2 + x_3 \leq 1$ δεν ικανοποιείται. Στην περίπτωση αυτή δε χρειάζεται να γίνει επιπλέον έλεγχος για εύρεση ικανών λύσεων για τα σημεία που προκύπτουν για τις τιμές $(e_2 = 0.5, e_3 = 0.7)$, $(e_2 = 0.5, e_3 = 0.8)$, $(e_2 = 0.5, e_3 = 0.9)$ κτλ. αφού και αυτά θα οδηγούν και πάλι σε λύσεις εκτός του εφικτού χώρου -όπως φαίνεται και στο Σχήμα 3-4 όπου τα σημεία αυτά έχουν σημειωθεί με αστεράκι-. Οπότε μετά την επανάληψη για $(e_2 = 0.5, e_3 = 0.7)$ ο αλγόριθμος θα εξέλθει από τον πιο εμφωλευμένο βρόχο (innermost loop) που αντιστοιχεί στην z_3 και η όλη διαδικασία θα συνεχιστεί

αφού αυξηθεί κατά ένα βήμα «0.1» το δεξί σκέλος του περιορισμού της αντικειμενικής η οποία αντιστοιχεί στον αμέσως εξωτερικότερο βρόχο (outer loop) από αυτόν από τον οποίο εξήλθε η επίλυση. Στην συγκεκριμένο πρόβλημα, όπου υφίστανται μόνο δύο αντικειμενικές συναρτήσεις ως περιορισμοί, ο εξωτερικός βρόγχος αντιστοιχεί στην z_2 οπότε το επόμενο σημείο πάνω στο πλέγμα το οποίο θα ελεγχθεί είναι το $(e_2 = 0.5 + 0.1 = 0.6, e_3 = 0)$.

Η πρόωρη έξοδος από τους εμφωλευμένους βρόχους, σε περιπτώσεις όπου το πρόβλημα οδηγεί σε λύσεις εκτός του εφικτού χώρου, οδηγεί σε σημαντική εξοικονόμηση υπολογιστικού χρόνου για προβλήματα με παραπάνω από τρεις αντικειμενικές συναρτήσεις. Προς αυτή την κατεύθυνση έχουν επιλυθεί ορισμένες μελέτες περίπτωσης προκειμένου να επιβεβαιωθεί η αναμενόμενη εξοικονόμηση υπολογιστικού χρόνου. Για παράδειγμα διαπιστώθηκε πως σε ένα πρόβλημα με έξι (6) αντικειμενικές, διακόσιες τριάντα έξι (236) δυαδικές μεταβλητές απόφασης και ενενήντα δύο (92) περιορισμούς η πρόωρη έξοδος από τους βρόχους μειώνει τον υπολογιστικό χρόνο κατά σαράντα πέντε τα εκατό (45%). Συγκεκριμένα ενώ κατά την αρχική επίλυση, χωρίς να χρησιμοποιηθεί η υλοποίηση με πρόωρη έξοδο από τους εμφωλευμένους βρόχους, ο υπολογιστικός χρόνος για πέντε σημεία πλέγματος ανά αντικειμενική ($5^5 = 3125$ βελτιστοποιήσεις) ήταν περίπου είκοσι ένα (21) λεπτά σε έναν επεξεργαστή Pentium M 1.7 Ghz, ο αντίστοιχος υπολογιστικός χρόνος όταν εφαρμόζεται η τεχνική της πρόωρης εξόδου από τις επαναλήψεις μειώθηκε σε έντεκα (11) λεπτά και τριάντα (30) δευτερόλεπτα. Στη δεύτερη περίπτωση επιλύθηκαν μόνο χίλια εφτακόσια πέντε (1705) προβλήματα βελτιστοποίησης, αντί των αρχικών τριών χιλιάδων εκατόν είκοσι πέντε (3125). Οι υπόλοιπες χίλιες τετρακόσιες είκοσι επαναλήψεις ($3125 - 1705 = 1420$) της αρχικής επίλυσης κατέληξαν σε μη εφικτές λύσεις και επομένως αποφεύχθηκε η επίλυσή τους.

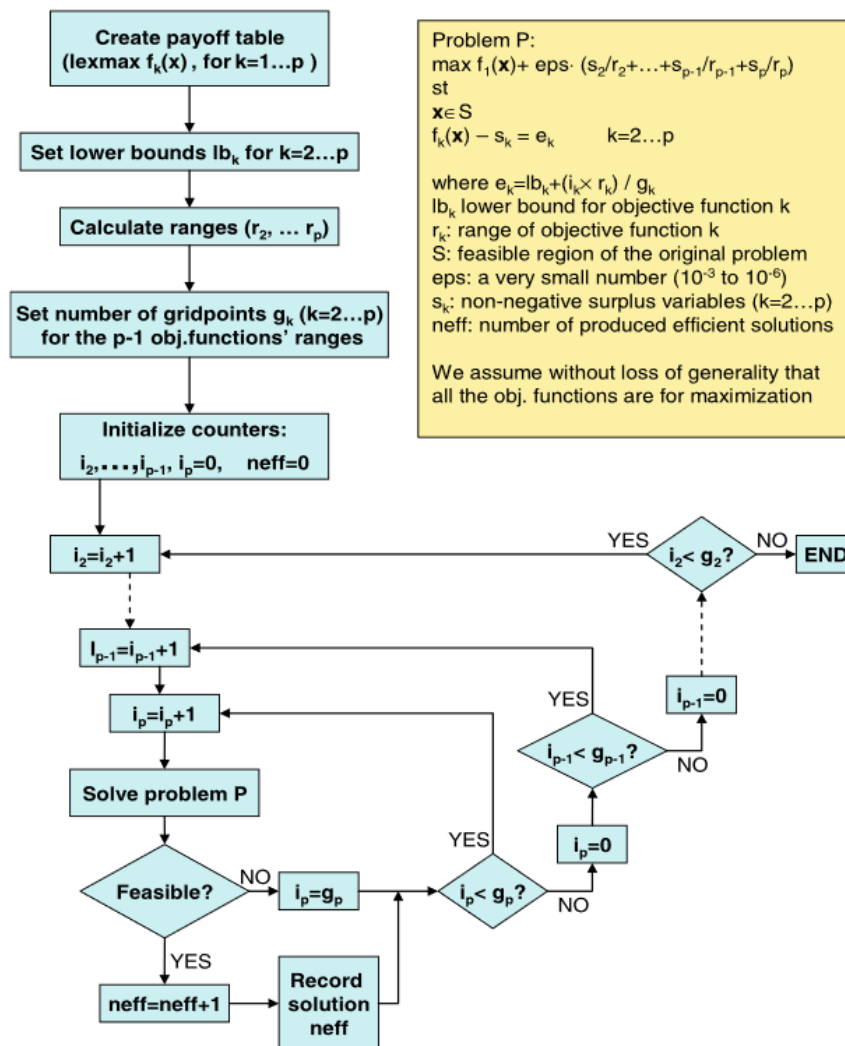
Συμπερασματικά, η βελτίωση της μεθόδου των περιορισμών από την AUGMECON συνίσταται στις εξής τροποποιήσεις:

1. Οι περιορισμοί που εμπλέκουν μέσα τις $p - 1$ το πλήθος αντικειμενικές μετατρέπονται από ανισότητες σε ισότητες.

2. Εισάγονται οι μεταβλητές απόκλισης τόσο στους περιορισμούς όσο και στην κυρίως αντικειμενική -με τη μορφή αθροίσματος πολλαπλασιασμένο με την κατάλληλη σταθερά ϵ ps.
3. Γίνεται πρόωρη έξοδος από εμφωλευμένους βρόγχους με στόχο την εξοικονόμηση χρόνου σε περίπτωση οπού το πρόβλημα είναι αδύνατο.

Τα σημεία «1» και «2» αποσκοπούν στην απόκτηση του συνόλου των κατά Pareto βέλτιστων λύσεων κατ' αποκλειστικότητα, αποφεύγοντας ασθενώς κυριαρχούμενες λύσεις, ενώ το σημείο «3» συμβάλλει στην ταχύτερη απόκριση του αλγορίθμου. Η φιλοσοφία ωστόσο των δύο μεθόδων είναι η ίδια.

Στο Σχήμα 3-5 παρουσιάζεται το διάγραμμα ροής (flowchart) της AUGMECON, όπως προτάθηκε από τον Manrotas (2009).



Σχήμα 3-5: Διάγραμμα ροής AUGMECON

Η AUGMECON έχει υλοποιηθεί στο λογισμικό GAMS -μια ευρέως χρησιμοποιούμενη γλώσσα μοντελοποίησης προβλημάτων μαθηματικού προγραμματισμού-. Ο κώδικας είναι διαθέσιμος στη βιβλιοθήκη του λογισμικού. Η AUGMECON μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε πληθώρα προβλημάτων αφού πρώτα τροποποιηθεί το κομμάτι του κώδικα το οποίο αφορά το πλήθος των αντικειμενικών, των περιορισμών, των μεταβλητών απόφασης, καθώς και των παραμέτρων (πλήθος σημείων πλέγματος ανά αντικειμενική κτλ.). Η υλοποιημένη σε GAMS έκδοση της AUGMECON μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε πολυκριτηριακά (multi-objective) προβλήματα γραμμικού προγραμματισμού (linear programming LP), μεικτού ακέραιου προγραμματισμού (mixed integer programming MIP), ή ακόμα και μη γραμμικού προγραμματισμού (non linear programming NLP).

3.3 Η μέθοδος AUGMECON 2

Η AUGMECON 2 (Mavrotas and Florios, 2013) είναι μια βελτιωμένη έκδοση της AUGMECON και παρ'όλο που θεωρείται μια μέθοδος γενικού σκοπού είναι ιδιαίτερα χρήσιμη για την επίλυση προβλημάτων MOIP (Multi-Objective Integer Programming), δηλαδή πολυκριτηριακών προβλημάτων ακέραιου προγραμματισμού -όπου οι μεταβλητές απόφασης είναι αποκλειστικά ακέραιοι-. Ειδικότερα η AUGMECON 2 είναι ικανή να παράγει το ακριβές μέτωπο Pareto σε προβλήματα MOIP.

Η μαθηματική διατύπωση της μεθόδου AUGMECON 2 έχει ως εξής:

$$\begin{aligned}
 & \text{Max}\{f_1(\mathbf{x}) + eps * (s_2/r_2 + 10^{-1} * s_3/r_3 + \dots + 10^{-(p-2)} \\
 & \quad * s_p/r_p)\} \\
 & \quad \quad \quad s. t. \\
 & \quad \quad \quad f_2(\mathbf{x}) - s_2 = e_2 \\
 & \quad \quad \quad f_3(\mathbf{x}) - s_3 = e_3 \\
 & \quad \quad \quad \dots
 \end{aligned}
 \tag{Π7}$$

$$f_p(\mathbf{x}) - s_p = e_p$$

$$\mathbf{x} \in S$$

$$s_i \in R^+, i = 2, \dots, p$$

Συγκριτικά με την AUGMECON, η διαφορά στην μαθηματική έκφραση της AUGMECON 2 έγκειται στην μικρή τροποποίηση της αντικειμενικής συνάρτησης. Η τροποποίηση αφορά στο τρόπο υλοποίησης της λεξικογραφικής βελτιστοποίησης στις αντικειμενικές συναρτήσεις που τίθενται ως περιορισμοί, στην περίπτωση όπου υπάρχουν εναλλακτικά βέλτιστα. Με τη μοντελοποίηση που προτείνεται από την AUGMECON 2 το λογισμικό επίλυσης αναζητά το βέλτιστο για την f_1 και στη συνέχεια γίνεται βελτιστοποίηση της f_2 , έπειτα της f_3 κ.ο.κ. Ο νέος αλγόριθμος πραγματοποιεί σειριακή βελτιστοποίηση των περιορισμένων αντικειμενικών (στην περίπτωση εναλλακτικών βέλτιστων), αντίθετα με την περίπτωση της AUGMECON όπου δεν λαμβάνεται υπόψη η σειρά βελτιστοποίησης των αντικειμενικών συναρτήσεων $f_2 \dots f_p$.

Ωστόσο η σημαντικότερη προσθήκη της AUGMECON 2 σε σχέση με τη μέθοδο AUGMECON είναι ο υπολογισμός ενός επιπλέον συντελεστή b , ο οποίος ονομάζεται *συντελεστής παράκαμψης (bypass coefficient)*. Η χρησιμότητά του γίνεται εμφανής στα επόμενα.

Όπως και στην περίπτωση της AUGMECON, έτσι και στη μέθοδο AUGMECON 2, η διαδικασία επίλυσης ξεκινά με υπολογισμό του εύρους της κάθε αντικειμενικής συνάρτησης f_i με $i = 2, \dots, p$ από τον πίνακα πληρωμών. Εν συνεχεία διαιρείται το εύρος της k -οστής αντικειμενικής σε q_k το πλήθος ίσα διαστήματα χρησιμοποιώντας $q_k - 1$ ισαπέχοντα εσωτερικά σημεία. Επομένως προκύπτουν συνολικά $q_k + 1$ σημεία πλέγματος που χρησιμοποιούνται για να μεταβάλλουν παραμετρικά το δεξί σκέλος του εκάστοτε περιορισμού (e_k) της k -οστής αντικειμενικής. Ο μέγιστος συνολικός αριθμός των βελτιστοποιήσεων θα είναι και πάλι $(q_1 + 1) \times (q_2 + 1) \times \dots \times (q_p + 1)$. Έστω λοιπόν r_k το εύρος της k -οστής αντικειμενικής με $k = 2, \dots, p$. Τότε το διακριτό βήμα μετά του οποίου θα μεταβάλλεται το RHS είναι:

$$step_k = r_k/q_k$$

Το δεξί σκέλος του αντίστοιχου περιορισμού γίνεται στην t -οστή επανάληψη:

$$e_{kt} = f_{min,k} + step_k$$

όπου $f_{min,k}$ είναι το ελάχιστο της f_k όπως προκύπτει από τον πίνακα πληρωμών και t είναι ο μετρητής των επαναλήψεων που διατρέχει τα σημεία του πλέγματος ($t = 1 \dots q_k + 1$).

Από το παραπάνω διαμορφώνεται η έκφραση για την k αντικειμενική συνάρτηση και το t - οστό σημείο του πλέγματος ως εξής:

$$f_{k,t}(\mathbf{x}) - s_{k,t} = f_{min,k} + t * step_k \quad (E1)$$

Σε κάθε επανάληψη ελέγχεται η μεταβλητή απόκλισης που αντιστοιχεί στην αντικειμενική συνάρτηση του πιο εσωτερικού βρόγχου. Με την υπόθεση ότι ο πιο εσωτερικός βρόγχος αντιστοιχεί στην αντικειμενική συνάρτηση p τότε υπολογίζεται ο συντελεστής παράκαμψης (bypass coefficient) b ως εξής:

$$b = int(s_{p,t}/step_p)$$

όπου $int()$ είναι η συνάρτηση που επιστρέφει το ακέραιο μέρος ενός πραγματικού αριθμού, $s_{p,t}$ είναι η μεταβλητή απόκλισης που προκύπτει για το t - οστό σημείο του πλέγματος και $step_p$ το βήμα μεταβολής του δεξιού σκέλους που αντιστοιχεί στην p -αντικειμενική συνάρτηση.

Στην περίπτωση που η μεταβλητή απόκλισης $s_{p,t}$ είναι μεγαλύτερη (έστω M φορές, $M < q_k + 1 - t$) από το βήμα μεταβολής $step_p$ τότε προκύπτει ότι οι επόμενες $t + M$ επαναλήψεις θα δώσουν σύμφωνα με την (E1) την ίδια κατά Pareto βέλτιστη λύση, με διαφορετικό μόνο τιμή στη μεταβλητή απόκλισης s . Δηλαδή η μόνη διαφορά έγκειται στο γεγονός ότι για την m - οστή επόμενη επανάληψη ($m = 1 \dots M$) θα έχει μειωθεί η μεταβλητή $s_{p,t+m}$ κατά m φορές την τιμή του βήματος $step_p$, οπότε η νέα τιμή της μεταβλητής $s_{p,t+m}$ θα είναι:

$$s_{p,t+m} = s_{p,t} - m * step_p \quad (E2)$$

Αυτό καθιστά τις M επόμενες επαναλήψεις περιττές, και συνεπώς μπορούν να αποφευχθούν αφού δεν συνεισφέρουν με νέα λύση στο σύνολο των κατά Pareto βέλτιστων λύσεων. Στην ουσία ο συντελεστής παράκαμψης υποδεικνύει πόσες

διαδοχικές επαναλήψεις είναι δυνατό να αποφευχθούν, ακριβώς επειδή οδηγούν στην ίδια ικανή λύση.

Η περιγραφόμενη διαδικασία γίνεται περισσότερο κατανοητή με το παρακάτω παράδειγμα.

Έστω πρόβλημα με τρεις αντικειμενικές συναρτήσεις και τον πίνακα πληρωμών που παρουσιάζεται στον Πίνακα 3-4:

Πίνακας 3-4: Πίνακας πληρωμών προβλήματος με τρεις αντικειμενικές συναρτήσεις

| | f_1 | f_2 | f_3 |
|------------|-------|-------|-------|
| $\max f_1$ | 980 | 796 | 803 |
| $\max f_2$ | 836 | 876 | 765 |
| $\max f_3$ | 809 | 821 | 905 |

Από τον Πίνακα 3-4 προκύπτουν οι ελάχιστες τιμές ($f_{min,2} = 796, f_{min,3} = 765$) και τα εύρη των αντικειμενικών f_2 και f_3 ίσα με $r_2 = 80$ και $r_3 = 140$ αντίστοιχα. Διαιρώντας τα παραπάνω εύρη σε δέκα (10) ίσα διαστήματα, τότε τα αντίστοιχα βήματα μεταβολής για τις συναρτήσεις f_2 και f_3 ισούται με $step_2 = 8$ και $step_3 = 14$. Η AUGMECON 2 εφαρμόζεται ως ακολούθως:

For $i = 0$ to 10

$$e_3 = 765 + i * 14$$

For $j = 0$ to 10

$$e_2 = 796 + j * 8 \tag{Π8}$$

solve ()

next j

next i

Η αντικειμενική f_2 αντιστοιχεί στον εσωτερικό βρόγχο (innermost loop, μετρητής j). Έστω ότι η επίλυση βρίσκεται σε σημείο που αντιστοιχεί στην πέμπτη επανάληψη για τον εσωτερικό βρόγχο ($j = 4$) και στην δεύτερη ($i = 1$) για τον εξωτερικό βρόγχο (outer loop). Τότε από τις εκφράσεις των e_2 και e_3 του (Π8)

προκύπτει $e_2 = 828$ και $e_3 = 779$. Η βελτιστοποίηση δίνει $s_2 = 18$, $s_3 = 9$, από την οποία προκύπτουν για την τρέχουσα επανάληψη οι παρακάτω τιμές αντικειμενικών συναρτήσεων:

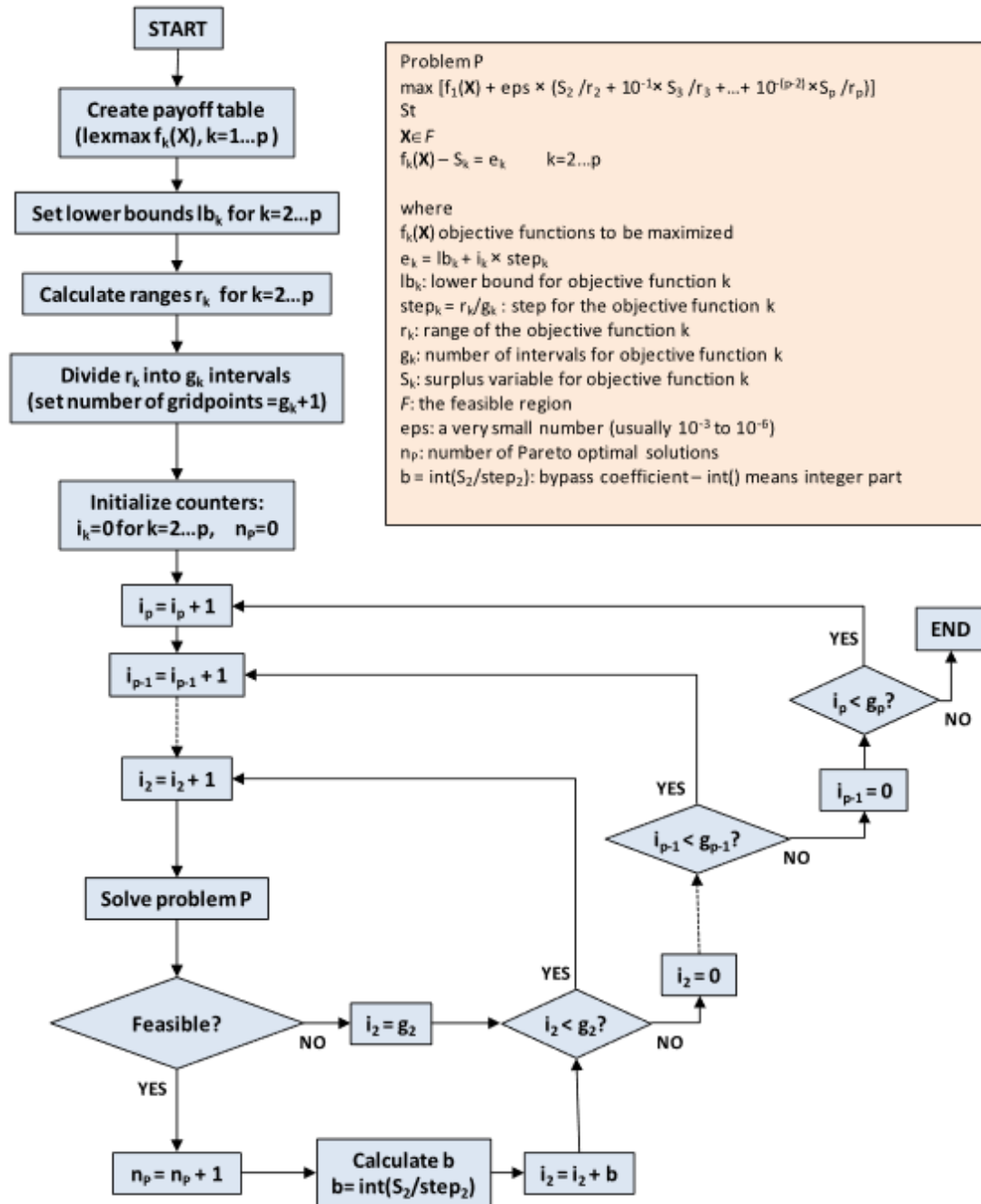
$$f_2 = e_2 + s_2 = 828 + 18 = 846$$

$$f_3 = e_3 + s_3 = 779 + 9 = 788$$

Για $s_2 = 18$ και δεδομένου ότι $step_2 = 8$, ο συντελεστής παράκαμψης $b = \text{int}(18/8) = 2$ φανερώνει πως μπορούν να παραληφθούν δύο επαναλήψεις j . Οι βελτιστοποιήσεις για $j = 5$ και $j = 6$ είναι περιττές διότι δίνουν ως αποτέλεσμα την ίδια κατά Pareto βέλτιστη λύση. Η μοναδική διαφορά μεταξύ των επαναλήψεων έγκειται στο ότι για $j = 5$ η μεταβλητή $s_{2,5}$ ισούται σύμφωνα με την (E2) με $s_{2,5} = s_{2,4} - 1 * step_2 = 18 - 1 * 8 = 10$ και για $j = 6$, με $s_{2,6} = 18 - 2 * 8 = 2$. Συνεπώς ο αλγόριθμος μπορεί ασφαλώς να παρακάμψει τις εν λόγω δύο επαναλήψεις, και να οδηγήσει την επίλυση απευθείας από την επανάληψη $j = 4$ στην $j = 7$ ($e_2 = 852$).

Επομένως ο χρόνος εκτέλεσης της AUGMECON 2 επιταχύνεται κάνοντας χρήση της πληροφορίας που δίνουν οι μεταβλητές απόκλισης των περιορισμένων αντικειμενικών και του συντελεστή παράκαμψης και αποφεύγοντας ως εκ τούτου περιττές-αχρειαστές επαναλήψεις. Όπως θα διαπιστωθεί στα επόμενα, οι συγκεκριμένες περιπτώσεις όπου παρακάμπτονται βελτιστοποιήσεις προχωρώντας σε επόμενα σημεία του πλέγματος, διαδικασία η οποία περιγράφεται στην προκειμένη με τον αγγλικό όρο jump, είναι ιδιαίτερα σημαντικές για μικρές τιμές βήματος. Αυτό γιατί μειώνοντας την τιμή του βήματος, οι συντελεστές e_k λαμβάνουν περισσότερες τιμές και επομένως εξετάζονται περισσότερα σημεία πάνω στο πλέγμα. Η επίλυση με πλέγμα μεγάλης πυκνότητας μπορεί να οδηγήσει στο ακριβές μέτωπο Pareto, αυξάνει όμως ταυτόχρονα κατά πολύ τον υπολογιστικό χρόνο. Η σημαντικότητα των jumps με χρήση του συντελεστή b έγκειται στο γεγονός ότι αξιοποιώντας την ιδιότητα αυτή είναι δυνατόν να εξαχθεί το ακριβές μέτωπο Pareto (exact Pareto Front) - για προβλήματα MOIP- σε εύλογο χρονικό διάστημα.

Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζεται συνοπτικά το διάγραμμα του αλγόριθμου της AUGMECON 2, ο οποίος υπάρχει υλοποιημένος στην βιβλιοθήκη του GAMS (Mavrotas and Florios, 2013).



Σχήμα 3-6: Διάγραμμα ροής της AUGMECON 2

3.4 Η AUGMECON 2 στον ακέραιο πολυκριτηριακό προγραμματισμό

Όπως έχει ήδη αναφερθεί στις περιπτώσεις προβλημάτων MOIP και 0-1 MOIP η μέθοδος AUGMECON 2 δίνει το ακριβές μέτωπο Pareto, δηλαδή το σύνολο όλων των κατά Pareto βέλτιστων λύσεων ανεξαιρέτως. Για προβλήματα MOIP το μέτωπο Pareto είναι ένα πεπερασμένο σύνολο λύσεων. Για την απόκτηση του ακριβούς μετώπου Pareto με εφαρμογή της AUGMECON 2, πρέπει να ικανοποιούνται οι παρακάτω συνθήκες:

1. Ως απαίτηση των προβλημάτων MOIP, οι συντελεστές των αντικειμενικών συναρτήσεων πρέπει να είναι ακέραιοι αριθμοί.
2. Πρέπει να είναι γνωστές οι ελάχιστες/ μέγιστες τιμές των αντικειμενικών μέσα στο Pareto Set (για μεγιστοποίηση/ ελαχιστοποίηση συναρτήσεων αντίστοιχα).
3. Το βήμα μεταβολής του δεξιού μέρους των περιορισμών των αντικειμενικών συναρτήσεων πρέπει να είναι μοναδιαίο.

Στην περίπτωση όπου οι συντελεστές των αντικειμενικών συναρτήσεων δεν είναι ακέραιοι αριθμοί, τότε η συνθήκη 1) μπορεί να ικανοποιηθεί μετασχηματίζοντας κατάλληλα το πρόβλημα, πολλαπλασιάζοντας κατάλληλα με δυνάμεις του 10. Αυτό σημαίνει πως για συντελεστές των αντικειμενικών συναρτήσεων με ένα δεκαδικό ψηφίο αρκεί ο πολλαπλασιασμός με τον αριθμό δέκα (10), για δύο δεκαδικά ψηφία απαιτείται πολλαπλασιασμός με τον αριθμό εκατό (100) κ.ο.κ. Ωστόσο αξίζει να σημειωθεί ότι η ύπαρξη πολλών δεκαδικών ψηφίων, επειδή ακριβώς απαιτεί τον πολλαπλασιασμό με όλο και μεγαλύτερη δύναμη του δέκα (10), οδηγεί σε όλο και μεγαλύτερο μέγεθος αντικειμενικής συνάρτησης, γεγονός που με τη σειρά του αυξάνει το εύρος της αντικειμενικής και άρα το μέγεθος του πλέγματος με αποτέλεσμα ο χρόνος επίλυσης σε κάποια προβλήματα να αυξάνεται σε επίπεδα μη αποδεκτά.

Σχετικά με τη δεύτερη συνθήκη, αυτό που απαιτείται δεν είναι απαραίτητα η ακριβής ελάχιστη τιμή των συναρτήσεων, αλλά αρκεί μια υποεκτίμησή τους (underestimation) ή ένα κάτω όριο (lower bound). Επισημαίνεται εδώ πως ο πίνακας πληρωμών δεν εξασφαλίζει στην γενική περίπτωση τον υπολογισμό της ελάχιστης τιμής των συναρτήσεων (Isermann and Steuer), παρά μόνο σε

προβλήματα με δύο αντικειμενικές συναρτήσεις. Σε προβλήματα με τρεις ή περισσότερες αντικειμενικές το ελάχιστο από τις στήλες του πίνακα πληρωμών δεν συμπίπτει απαραίτητα με την ελάχιστη τιμή των συναρτήσεων. Προτείνεται, έτσι, είτε η χρήση κάποιων από τις μεθόδους που υπάρχουν στη βιβλιογραφία για τον ακριβή υπολογισμό των ελαχίστων τιμών των συναρτήσεων –οι οποίες όμως είναι αρκετά περίπλοκες-, είτε, προτιμότερα, ο υπολογισμός κατώτατων ορίων για τις αντικειμενικές συναρτήσεις, τεχνική που ωστόσο αυξάνει τον υπολογιστικό χρόνο της επίλυσης της βελτιστοποίησης. Όσο πιο κοντά είναι το κατώτατο όριο σε σχέση με την πραγματική ελάχιστη τιμή της συνάρτησης, με τόσο λιγότερο υπολογιστικό χρόνο επιβαρύνεται το πρόβλημα, αφού το εύρος της εκάστοτε αντικειμενικής γίνεται πιο στενό.

Η τρίτη συνθήκη προκύπτει από την φύση του προβλήματος ως ακεραίου και επεξηγείται με το ακόλουθο παράδειγμα. Έστω ένα πρόβλημα MOIP και μια αντικειμενική συνάρτηση για την οποία επιλέγεται ως κατώτατο όριο το τριακόσια πενήντα (350), ενώ παράλληλα θεωρείται ως πραγματική ελάχιστη τιμή το τετρακόσια (400) και ως μέγιστη τιμή το πεντακόσια (500). Επιλέγοντας μοναδιαίο βήμα εξετάζονται όλες οι τιμές της αντικειμενικής, αφού εξετάζεται κάθε ακέραιος αριθμός στο διάστημα [350, 500], με αποτέλεσμα, επειδή και η πραγματική ελάχιστη τιμή είναι εντός του διαστήματος, να ελέγχεται κάθε πιθανή ακέραια τιμή ως μέρος του μετώπου Pareto. Προφανώς επειδή το πρόβλημα είναι MOIP το ενδεχόμενο ύπαρξης λύσης μεταξύ δύο ακεραίων αποκλείεται, οπότε κανένα σημείο του πλέγματος δεν μένει ανεξερεύνητο και άρα προκύπτει το ακριβές μέτωπο Pareto.

Ως αποτέλεσμα των ανωτέρω η διαδικασία για τον υπολογισμό του ακριβούς μετώπου Pareto σε προβλήματα MOIP μέσω της μεθόδου AUGMECON 2 αποτελείται από τα εξής βήματα, υποθέτοντας ότι όλες οι αντικειμενικές είναι προς μεγιστοποίηση:

1. Υπολογίζονται τα εύρη των $p - 1$ το πλήθος αντικειμενικών που τίθενται ως περιορισμοί. Αυτό σημαίνει ότι πρέπει να υπολογιστούν τα κατώτατα όριά τους (είτε, όποτε αυτό είναι εφικτό, οι πραγματικές ελάχιστες τιμές τους).

2. Έστω ότι το εύρος για την k -οστή αντικειμενική είναι r_k (ακέραιος). Επιλέγεται για κάθε αντικειμενική μοναδιαίο βήμα, έτσι ώστε για κάθε μια από αυτές το πλήθος των σημείων του πλέγματος να είναι ακριβώς $r_k + 1$.
3. Εφαρμόζεται η μέθοδος AUGMECON 2 και προκύπτει το ακριβές μέτωπο Pareto. Το μοναδιαίο βήμα και ο υπολογισμός των κατώτατων ορίων των αντικειμενικών εξασφαλίζει ότι καμία βέλτιστη λύση δεν μένει ανεξερεύνητη.

3.5 Συγκριτική ανάλυση μεταξύ των AUGMECON και AUGMECON 2

Στην συνέχεια παρουσιάζεται μια συγκριτική ανάλυση ανάμεσα στις επιδόσεις της AUGMECON και της AUGMECON 2. Για τους σκοπούς της σύγκρισης χρησιμοποιούνται προβλήματα $XkpY$, όπου ως kp νοείται ο συμβολισμός του προβλήματος του σακιδίου (knapsack problem). Το X αναφέρεται στο πλήθος των αντικειμενικών και των περιορισμών και το Y στο πλήθος των μεταβλητών απόφασης. Έτσι, για παράδειγμα με $3kp100$ συμβολίζεται ένα πρόβλημα σακιδίου με τρεις (3) αντικειμενικές, τρεις (3) περιορισμούς και εκατό (100) μεταβλητές απόφασης.

Στη βιβλιογραφία υπάρχουν δύο βασικοί τύποι προβλημάτων $XkpY$, οι οποίοι διαχωρίζονται με βάση τη συχέτιση των στοιχείων των μητρών C, A , των συντελεστών των αντικειμενικών και των συντελεστών των περιορισμών αντίστοιχα:

1. Προβλήματα τύπου U
2. Προβλήματα τύπου W

Στα προβλήματα τύπου U δεν υπάρχει καμία συσχέτιση ανάμεσα στα στοιχεία της μήτρας C των συντελεστών των αντικειμενικών και σε αυτά της μήτρας A των συντελεστών των περιορισμών, εξ ου και ο συμβολισμός U από τον αγγλικό όρο Uncorrelated που σημαίνει μη συσχετισμένα. Τα προβλήματα W τύπου είναι προβλήματα στα οποία υπάρχει μια ασθενής συσχέτιση ανάμεσα στα στοιχεία των δύο μητρών C και A εξ ου και ο συμβολισμός W από τον αγγλικό όρο Weakly correlated που σημαίνει ασθενώς συσχετισμένα. Αυτή η συσχέτιση των μεταξύ των μητρών C, A έχει ρεαλιστική υπόσταση σε αρκετές περιπτώσεις. Για

παράδειγμα σε ένα πρόβλημα επιλογής έργου είναι πιθανό ότι τα υποψήφια έργα με υψηλότερο κόστος θα παρουσιάζουν υψηλότερη απόδοση σε κάποιο κριτήριο που αφορά την ποιότητα, δημιουργώντας επομένως μια συσχέτιση μεταξύ των αντίστοιχων συντελεστών. Γενικά έχει παρατηρηθεί ότι τα προβλήματα τύπου W επιλύονται δυσκολότερα σε σχέση με τα U .

Ένας άλλος διαχωρισμός των προβλημάτων $XkpY$ αφορά το πλήθος των ψηφίων των συντελεστών των αντικειμενικών. Στην βιβλιογραφία εξετάζονται συχνότερα προβλήματα με δύο ή τρία ψηφία. Όπως είναι αναμενόμενο σε προβλήματα με τρία ψηφία η απόκτηση του ακριβούς μετώπου Pareto γίνεται αρκετά δυσκολότερη από άποψη υπολογιστικού χρόνου συγκριτικά με τα προβλήματα δύο ψηφίων, δεδομένου ότι το εύρος των αντικειμενικών συναρτήσεων αυξάνεται και επίσης καθώς δημιουργείται μεγαλύτερη απόκλιση ανάμεσα στα πραγματικά ελάχιστα και σε αυτά που λαμβάνονται από τον πίνακα πληρωμών.

Στα προβλήματα αναφοράς που παρουσιάζονται στη συνέχεια θεωρείται ότι οι συντελεστές $c_{i,j}$ και $\alpha_{i,j}$ των μητρών C και A λαμβάνουν τυχαίες τιμές μέσω ομοιόμορφης κατανομής, η οποία για προβλήματα U και δύο ψηφία έχει τη μορφή $U[10,100]$ και για τρία ψηφία τη μορφή $U[100,1000]$. Σε προβλήματα τύπου W τα στοιχεία του πίνακα A ($\alpha_{i,j}$) λαμβάνονται πάλι τυχαία μέσω ομοιόμορφης κατανομής, $\alpha_{i,j} \in U[10,100]$ ή $\alpha_{i,j} \in U[100,1000]$ ανάλογα με τον επιθυμητό αριθμό ψηφίων, ενώ τα στοιχεία της μήτρας C ($c_{i,j}$) δημιουργούνται τυχαία από την ομοιόμορφη κατανομή $U[\alpha_{i,j} - 10, \alpha_{i,j} + 10]$ ή $U[\alpha_{i,j} - 100, \alpha_{i,j} + 100]$ για δύο και τρία ψηφία αντίστοιχα, ώστε να υπάρχει συσχέτιση ανάμεσα στα στοιχεία των δύο μητρών A, C .

Τα προβλήματα επιλύθηκαν στο περιβάλλον GAMS 23.5 με solver CPLEX 12.2. Το λειτουργικό σύστημα ήταν Windows 7 32-bit και ο επεξεργαστής i3 notebook 2.13 Ghz με 4GB RAM για προβλήματα $2kpY$ και i5 notebook 2.4 Ghz με 4GB RAM για προβλήματα τριών αντικειμενικών $3kpY$.

Τα αποτελέσματα για προβλήματα δύο αντικειμενικών ($2kpY$) παρουσιάζονται στην Εικόνα 7 όπου ως «Σημεία Πλέγματος» συμβολίζεται ο αριθμός των σημείων πλέγματος, ο οποίος ουσιαστικά ισούται με το εύρος της αντικειμενικής που

χρησιμοποιείται ως περιορισμός αυξημένο κατά ένα, ως «Βελτιστοποιήσεις» θεωρείται το πλήθος προβλημάτων βελτιστοποίησης ακέραιου προγραμματισμού που επιλύθηκαν για κάθε περίπτωση, ως «|PF*|» παριστάνεται το πλήθος των κατά Pareto βέλτιστων λύσεων που εμπεριέχονται στο ακριβές μέτωπο Pareto, ενώ ο χρόνος που χρειάζεται ο επεξεργαστής για την επίλυση του προβλήματος γράφεται ως «Χρόνος επίλυσης». Ο αστερίσκος υποδεικνύει ότι χρησιμοποιήθηκαν τέσσερα threads στον επιλυτή CPLEX, αντί για ένα που χρησιμοποιήθηκε στη γενική περίπτωση, ενώ οι παύλες συμβολίζουν ότι στην προκειμένη περίπτωση η επίλυση του προγράμματος είχε διάρκεια μεγαλύτερη των σαράντα οχτώ (48) ωρών.

| Problem type | Problem dimensions | Grid points | PF* | Models solved | | CPU time sec | |
|-------------------|--------------------|-------------|------|---------------|-----------|--------------|-----------|
| U Type [10,100] | 2kp100 | 823 | 121 | AUGMECON | AUGMECON2 | AUGMECON | AUGMECON2 |
| | 2kp250 | 2534 | 568 | 823 | 144 | 227 | 40 |
| | 2kp500 | 4176 | 1416 | 2534 | 594 | 2781 | 932 |
| | 2kp750 | 7232 | 3030 | 4176 | 1654 | 15,290 | 9601 |
| U Type [100,1000] | 2kp100b | 8225 | 135 | 7232 | 3699 | 55,483 | 43,355 |
| | 2kp250b | 25,341 | 732 | 8225 | 136 | 2457 | 48 |
| | 2kp500b | 41,774 | 2332 | 25,341 | 746 | 30,621 | 1914 |
| | 2kp750b | 71,966 | 5868 | 41,774 | 2396 | 145,686 | 17,132 |
| W Type [10,100] | 2kp-W-100 | 278 | 111 | – | 6143 | – | 92,913 |
| | 2kp-W-250 | 666 | 375 | 278 | 111 | 568 | 309 |
| | 2kp-W5-00 | 1944 | 834 | 666 | 375 | 4593 | 4251 |
| | 2kp-W-750 | 1914 | 1251 | 1944 | 968 | 9052* | 7514* |
| W Type [100,1000] | 2kp-W-100b | 2803 | 197 | 1556 | 205 | 13,562* | 12,579* |
| | 2kp-W-250b | 7267 | 967 | 2803 | 1678 | 6765 | 816 |
| | 2kp-W-500b | 19,527 | 2980 | 7267 | 3256 | 59,831 | 24,032 |
| | 2kp-W-750b | 19,619 | 4960 | 19,527 | – | 130,022* | 46,569* |
| | | | | – | 5529 | – | 128,454* |

Εικόνα 3-1: Στατιστικά αποτελέσματα AUGMECON και AUGMECON 2 για προβλήματα MOMKP με 2 αντικειμενικές συναρτήσεις. (Πηγή: Mavrotas and Florios, 2013)

Από τον πίνακα διακρίνεται ότι η μέθοδος AUGMECON 2 επιτυγχάνει σημαντική μείωση στο πλήθος των επιμέρους βελτιστοποιήσεων που επιλύονται συγκριτικά με την AUGMECON, το οποίο ως εκ τούτου οδηγεί σε σημαντικά λιγότερο χρόνο επίλυσης του συνολικού προβλήματος από τον επεξεργαστή. Αυτή η μείωση οφείλεται στην αποφυγή της επαναληπτικής επίλυσης για σημεία πλέγματος που δίνουν λύσεις οι οποίες έχουν ήδη προσδιοριστεί. Επίσης, όπως παρατηρείται από τον πίνακα, όσο μεγαλύτερο είναι το μέγεθος του προβλήματος, δηλαδή όσες περισσότερες οι μεταβλητές απόφασης και όσο περισσότερα τα αντίστοιχα ψηφία τους, τόσο αυξάνεται η υπεροχή της νέας έκδοσης του αλγορίθμου (AUGMECON 2) έναντι της προηγούμενης (AUGMECON). Για παράδειγμα στο πρόβλημα τύπου $U[10,100] 2kp500$, όπου υποτίθενται πεντακόσιες (500)

μεταβλητές απόφασης των δύο ψηφίων, ο λόγος των αριθμών των βελτιστοποιήσεων που επιλύονται και των αντίστοιχων χρόνων επίλυσης του συνολικού προβλήματος είναι:

$$\frac{\text{Βελτιστοποιήσεις}_{augmecon}}{\text{Βελτιστοποιήσεις}_{augmecon2}} = \frac{4176}{1654} = 2,525$$

Και

$$\frac{\text{Χρόνος Επίλυσης}_{augmecon}}{\text{Χρόνος Επίλυσης}_{augmecon2}} = \frac{15290}{9601} = 1,593$$

ενώ οι αντίστοιχοι λόγοι για ένα πρόβλημα μεγαλύτερων διαστάσεων, όπως το $U[100,1000] 2kr500$, στο οποίο τα στοιχεία της μήτρας C υπάρχουν τρία ψηφία, είναι:

$$\frac{\text{Βελτιστοποιήσεις}_{augmecon}}{\text{Βελτιστοποιήσεις}_{augmecon2}} = \frac{41774}{2396} = 17,435$$

Και

$$\frac{\text{Χρόνος Επίλυσης}_{augmecon}}{\text{Χρόνος Επίλυσης}_{augmecon2}} = \frac{145686}{17132} = 8,5$$

Σημαντική παρατήρηση επίσης αποτελεί ότι στην απλή AUGMECON το πλήθος των σημείων του πλέγματος είναι ακριβώς ίσο με τον αριθμό των βελτιστοποιήσεων που εκτελούνται, κάτι που είναι αναμενόμενο δεδομένου ότι κατά την επίλυση δεν παραλείπεται κανένα σημείο του πλέγματος αλλά εξετάζονται όλα σειριακά. Συγκρίνοντας όμως τον αριθμό βελτιστοποιήσεων με τον αριθμό των κατά Pareto βέλτιστων λύσεων που δημιουργούνται παρατηρείτε αυξημένος αριθμός περιττών επαναλήψεων. Αντίθετα στην περίπτωση της AUGMECON 2 το πλήθος των προβλημάτων βελτιστοποίησης που επιλύονται οδηγεί πολύ συχνότερα, και σχεδόν κατά κανόνα, σε κατά Pareto βέλτιστες λύσεις (όπως διαφαίνεται από τη σύγκριση των στηλών «Βελτιστοποιήσεις» και «|PF*|»), αποφεύγοντας περιττές επαναλήψεις στο πλέγμα. Η ιδιότητα αυτή της AUGMECON 2 είναι ιδιαίτερα επιθυμητή για λόγους υπολογιστικού χρόνου ειδικά σε προβλήματα όπου το μέγεθος του πλέγματος είναι μεγάλο, όπου η μέθοδος AUGMECON 2 υπερέχει έναντι πολλών μεθόδων

3.6 Συγκριτική ανάλυση AUGMECON 2 και άλλων αλγορίθμων

Στον Πίνακας 3-5 παρουσιάζονται οι επιδόσεις της AUGMECON 2 και η σύγκρισή της με τις μεθόδους AUGMECON, ADECON και MCBB για την περίπτωση προβλημάτων τύπου U 3kpY με συντελεστές δύο ψηφίων. Όπως καταδείχθηκε πρωτίτερα, τα αποτελέσματα αποδεικνύουν ότι η μέθοδος AUGMECON 2 υπερέρχει έναντι των υπολοίπων μεθόδων όσο μεγαλώνει το μέγεθος του προβλήματος. Ειδικά στη σύγκριση μεταξύ AUGMECON και AUGMECON 2 οι λόγοι των χρόνων επίλυσης και του αριθμού των βελτιστοποιήσεων, όπως υπολογίστηκαν για την περίπτωση προβλημάτων μεγέθους 2kpY, λαμβάνουν για τα 3kpY προβλήματα αρκετά μεγαλύτερες τιμές, εκφράζοντας τη μεγαλύτερη υπεροχή της AUGMECON 2 έναντι της AUGMECON. Για παράδειγμα για πρόβλημα μεγέθους 3kp50, ο λόγος των χρόνων επίλυσης προκύπτει:

$$\frac{\text{Χρόνος Επίλυσης}_{augmecon}}{\text{Χρόνος Επίλυσης}_{augmecon2}} = \frac{42 * 3600}{159 * 60} = 15,472$$

Το παραπάνω νούμερο καταδεικνύει πως, για τη συγκεκριμένη επίλυση, η μέθοδος AUGMECON 2 είναι κατά δεκαπέντε (15) φορές πιο γρήγορη συγκριτικά με την AUGMECON.

Παράλληλα, από τον Πίνακας 3-5 επιβεβαιώνεται ότι η μέθοδος AUGMECON 2 παράγει το σύνολο των κατά Pareto βέλτιστων λύσεων, στήλη «|PF*|» (η μια παραπάνω λύση που δίνει η επίλυση της ADECON στο πρόβλημα 3kp100 αποδεικνύεται ότι είναι κυριαρχούμενη). Οι παύλες συμβολίζουν ότι στην προκειμένη περίπτωση η επίλυση του προγράμματος είχε διάρκεια μεγαλύτερη των σαράντα οχτώ (48) ωρών. Με «N/A» συμβολίζεται η έλλειψη δεδομένων για τη συγκεκριμένη μέθοδο.

Πίνακας 3-5: Συγκριτικά αποτελέσματα της AUGMECON 2 με τις AUGMECON, ADECON και MCBB. (Πηγή: Mavrotas and Florios, 2013)

| $U[10,100]$ | Χρόνος επίλυσης | Βελτιστοποιήσεις | PF* |
|------------------|-----------------|------------------|------|
| AUGMECON2 | | | |
| 3kp40 | 37 min | 7,802 | 389 |
| 3kp50 | 159 min | 24,903 | 1048 |
| 3kp100 | 33h | 103,049 | 6500 |
| AUGMECON | | | |
| 3kp40 | 15h | 242,386 | 389 |
| 3kp50 | 41h | 489,746 | 1048 |

| | | | |
|---------------|---------|---------|------|
| 3kp100 | - | - | - |
| <i>ADECON</i> | | | |
| 3kp40 | 29 min | 26,846 | 389 |
| 3kp50 | 209 min | 128,695 | 1048 |
| 3kp100 | 120 h | 644,689 | 6501 |
| <i>MCBB</i> | | | |
| 3kp40 | 6.5 min | N/A | 389 |
| 3kp50 | 164 min | N/A | 1048 |
| 3kp100 | - | N/A | - |

Επιπρόσθετα επισημαίνεται ότι η μέθοδος AUGMECON 2 είναι εξίσου αποτελεσματική στον υπολογισμό μιας προσέγγισης του Pareto Front των βέλτιστων λύσεων, δηλαδή στον υπολογισμό μερικών αντιπροσωπευτικών κατά Pareto βέλτιστων λύσεων αντί του ακριβούς συνόλου των κατά Pareto βέλτιστων λύσεων. Η συγκεκριμένη προσέγγιση οδηγεί σε πιο αραιό Pareto Front, είναι ωστόσο ιδιαίτερα διαδεδομένη στην πράξη, καθώς ο χρόνος υπολογισμού του κατά προσέγγιση Pareto Front είναι κατά πολύ μικρότερος σε σχέση με τον χρόνο που απαιτεί ο υπολογισμός του ακριβούς συνόλου των κατά Pareto βέλτιστων λύσεων. Συγκεκριμένα όσο μικρότερος είναι ο απαιτούμενος βαθμός ακρίβειας, τόσο γρηγορότερα αποκτάται η προσέγγιση του μετώπου Pareto σε σχέση με το ακριβές μέτωπο Pareto. Στην AUGMECON 2, η παράμετρος που μεταβάλλεται όταν ζητείται ο κατά προσέγγιση προσδιορισμός του μετώπου Pareto είναι το μέγεθος του πλέγματος δηλαδή ο αριθμός των σημείων του πλέγματος πάνω στο οποίο γίνονται οι βελτιστοποιήσεις. Μεγαλύτερος αριθμός σημείων πλέγματος οδηγεί σε μεγαλύτερη αποκτούμενη ακρίβεια.

Για να ελεγχθεί η επίδοση της AUGMECON 2 στον κατά προσέγγιση προσδιορισμό των κατά Pareto βέλτιστων λύσεων παρουσιάζεται η σύγκριση της μεθόδου με τον εξελικτικό αλγόριθμο Pareto ισχύος, SPEA 2, όπως δημοσιεύτηκε από τους Manrotas and Florios (2013). Ο αλγόριθμος SPEA 2 είναι από τις πιο αποδοτικές σύγχρονες μεθοδολογικές προσεγγίσεις της οικογένειας μεθόδων Πολυκριτηριακής Εξελικτικής Βελτιστοποίησης και έχει αποδειχθεί αποδοτικότερος σε προβλήματα αντίστοιχα αυτών του παρόντος Κεφαλαίου συγκριτικά με άλλους κατάλληλους προσεγγιστικούς αλγόριθμους, όπως αυτός της μη-κυριαρχούμενη ταξινόμηση, NSGAI. Η σύγκριση μεταξύ AUGMECON 2 και SPEA 2 αφορά το πρόβλημα αναφοράς 3kp100 που χρησιμοποιήθηκε και πρωτύτερα. Ως μέτρο σύγκρισης των αλγορίθμων χρησιμοποιείται ο δείκτης F

που υποδηλώνει το ποσοστό των μη κυριαρχούμενων κατά Pareto βέλτιστων λύσεων που δημιουργήθηκαν από τους προσεγγιστικούς αλγόριθμους σε σχέση με τον συνολικό αριθμό των κατά Pareto βέλτιστων λύσεων του προβλήματος. Από τη σύγκριση προκύπτει ότι ο αλγόριθμος SPEA 2 παράγει κατά Pareto βέλτιστες, μη κυριαρχούμενες λύσεις σε ποσοστό $F = 5\%$ του συνόλου των κατά Pareto βέλτιστων λύσεων σε χρόνο 42,840 δευτερολέπτων. Αντίθετα το ίδιο πρόβλημα, με το ίδιο λογισμικό, επιλύεται από την μέθοδο AUGMECON 2 σε χρόνο 383 δευτερολέπτων και μάλιστα με καλύτερη επίδοση στην κάλυψη των κατά Pareto βέλτιστων λύσεων ($F = 6.9\%$). Η υπεροχή της AUGMECON 2 έναντι του SPEA 2 αποδεικνύεται στο Manrotas and Florios (2013) και στην περίπτωση δύο αντικειμενικών συναρτήσεων καθώς και για διαφορετικό αριθμό μεταβλητών απόφασης (συγκεκριμένα εξετάζονται προβλήματα με εκατό (100) έως εκατόσις πενήντα (750) μεταβλητές απόφασης των δύο ψηφίων). Σε κάθε περίπτωση προκύπτει ότι στον ίδιο υπολογιστικό χρόνο-δηλαδή για την ίδια πολυπλοκότητα προβλήματος -η μετρική F είναι πολύ πιο κοντά στο 1 για την AUGMECON 2 σε σχέση με τους εξελικτικούς αλγορίθμους. Ιδιαίτερα αποδεικνύεται ότι οι εξελικτικοί αλγόριθμοι αδυνατούν, για τα συγκεκριμένα προβλήματα αναφοράς του παρόντος Κεφαλαίου, να προσδιορίσουν τις λύσεις που αντιστοιχούν στα δύο άκρα του μετώπου Pareto.

3.7 Βιβλιογραφική επισκόπηση εφαρμογών και εργασιών βελτίωσης της μεθόδου AUGMECON

Οι μέθοδοι της οικογένειας των περιορισμών και πιο συγκεκριμένα οι μέθοδοι που βασίζονται στην AUGMECON έχουν μελετηθεί αρκετά από την υπάρχουσα βιβλιογραφία, με τις μελέτες να αφορούν τόσο εφαρμογές των συγκεκριμένων μεθόδων σε διαφορετικά επιστημονικά πεδία, όσο και προσεγγίσεις επέκτασής τους.

Από τις εργασίες που μελετήθηκαν, ορισμένες χρησιμοποιούν τη μέθοδο AUGMECON αυτοτελώς, χωρίς παρεμβάσεις επί του αλγορίθμου ή της μεθοδολογίας. Σε αυτή την κατηγορία εργασιών ανήκουν: η εργασία των Shekarian et al. (2019), όπου η AUGMECON χρησιμοποιήθηκε σε ένα πρόβλημα τριών αντικειμενικών συναρτήσεων για την βέλτιστη διαχείριση προβλημάτων

λειτουργίας στην εφοδιαστική αλυσίδα (Shekarian et al., 2019), η εφαρμογή της AUGMECON από τους Xin et al. (2019) για τον διεπίπεδο σχεδιασμό βέλτιστης διοχέτευσης προϊόντων, από τους Vieira et al. (2017) σε πρόβλημα πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης παραγωγής και σχεδιασμού συντήρησης σε βιοφαρμακευτική διαδικασία και από τους Vafaeenezhad et al. (2019) σε ένα πολυκριτηριακό μοντέλο διαχείρισης εφοδιαστικής αλυσίδας στην βιομηχανία χαρτιού, η εργασία των Yu et al. (2018) για την επίλυση του προβλήματος βέλτιστης κατανομής πόρων για φιλανθρωπικούς σκοπούς σε σύγκριση με τα επίπεδα φτώχειας των δικαιούχων, η εργασία των Khalili-Damghani et al. (2012) με χρησιμοποίηση της AUGMECON σε μια ολοκληρωμένη μέθοδο επίλυσης προβλημάτων επιλογής έργων όταν ο σχεδιασμός γίνεται σε πολλές διαφορετικές περιόδους, η εργασία των Zhang et al. (2019) για την βελτιστοποίηση πολυκριτηριακής μεθόδου σύνθεσης Fischer-Tropsch σε αντιδραστική απόσταξη, η εργασία των Xidonas et al. (2011) ως μέρος ενός ολοκληρωμένου συστήματος υποστήριξης αποφάσεων για την κατασκευή και επιλογή μετοχικού χαρτοφυλακίου, η μελέτη των Behmanesh and Zandieh (2019) για την βελτιστοποίηση δικριτηριακού προβλήματος σχεδιασμού προγράμματος και διαθεσιμότητας χειρουργείων με στόχο την βέλτιστη εκμετάλλευση αυτών ανάλογα με τις εκάστοτε ανάγκες ώστε να ελαχιστοποιούνται οι άεργοι χρόνοι, η χρησιμοποίηση της AUGMECON από τους Arancibia et al. (2016), σε συνδυασμό με δυναμικό προγραμματισμό για την διαχείριση διαφορετικών σεναρίων, για τον βέλτιστο σχεδιασμό επέκτασης της εγκατεστημένης ισχύος ενός συστήματος, η εφαρμογή από τους Aras and Yurdakul (2016) για την βελτιστοποίηση πολυκριτηριακού μοντέλου σύνθεσης υψηλού επιπέδου ολοκληρωμένων κυκλωμάτων, η μελέτη των Tartibu et al. (2015) για την πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση της στοίβας μιας θερμοακουστικής μηχανής και, τέλος, η αξιοποίηση της AUGMECON για τον βελτιστοποιημένο σχεδιασμό και λειτουργία διατροφικού δικτύου μεταφορών στην περιοχή του Μαρμαρά στην Μικρά Ασία από τους Resat and Turkay (2015).

Αντίστοιχα, η μέθοδος AUGMECON 2 έχει χρησιμοποιηθεί: από τους Roshan et al. (2019) σε ένα πρόβλημα διαχείρισης της φαρμακευτικής εφοδιαστικής αλυσίδας με υποκαταστασιμότητα προϊόντων σε περιόδους κρίσης, από τους Rahimi et al.

(2019) σε ένα εύρωστο πιθανοτικό μοντέλο με ελαστική ζήτηση, από τους Saedinia et al. (2019) για την βελτιστοποίηση εφοδιαστικής αλυσίδας βενζίνης κλειστού βρόχου, από τους Bal and Satoglu (2018) σε ένα πρόβλημα πολυστοχικού προγραμματισμού για τον σχεδιασμό βιώσιμης αντίστροφης εφοδιαστικής αλυσίδας, από τους Mousazadeh et al. (2018) για την βελτιστοποίηση του ανασχεδιασμού ενός προσβάσιμου, σταθερού και εύρωστου δικτύου υπηρεσιών υγείας, από τους Gavraniis and Kozanidis (2017) για την επίλυση προβλήματος δικριτηριακού μεικτού αέριου τετραγωνικού προγραμματισμού για τη μεγιστοποίηση της τιμής και την ελαχιστοποίηση της διακύμανσης της διαθεσιμότητας του στόλου μιας μονάδας με αεροσκάφη αποστολών και από τους Arratia et al. (2016) για την επιλογή βέλτιστου χαρτοφυλακίου έργων έρευνας και ανάπτυξης για δημόσιους οργανισμούς.

Συγκεκριμένα στον τομέα της ενέργειας και της βιώσιμης ανάπτυξης τοποθετούνται οι παρακάτω εφαρμογές:

1. Η εργασία των Qiu et al. (2019) για την επίλυση πολυκριτηριακού προβλήματος με πολλά σενάρια για τον βελτιστοποιημένο σχεδιασμό εφοδιαστικής αλυσίδας σχετικά με ένα σύστημα διοχέτευσης υγροποιημένων ελαφρών υδρογονανθράκων στην Κίνα.
2. Η εργασία των Mohammadkhani et al. (2018) όπου η AUGMECON χρησιμοποιείται σε ένα πρόβλημα πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης που αφορά μονάδες συνδυασμένου κύκλου.
3. Η εργασία των Rabbani et al. (2018) για την βελτιστοποίηση μιας βιώσιμης εφοδιαστικής αλυσίδας σχετικά με παραγωγή από βιομάζα, όπου η AUGMECON χρησιμοποιήθηκε σε συνδυασμό με τη μέθοδο TOPSIS.
4. Η εργασία των Sedighizadeh et al. (2018) για την επίλυση ενός πολυκριτηριακού στοχαστικού προβλήματος ενεργειακού προγραμματισμού σε τοπικά οικιακά μικροδίκτυα με μονάδες παραγωγής ενέργειας, μπαταρίες, μονάδες αποθήκευσης και υβριδικά οχήματα.
5. Η εργασία των Cambero and Sowlati (2016) για την επίλυση ενός προβλήματος ενσωμάτωσης κοινωνικών επιπτώσεων στην ανάλυση πολυκριτήριας βελτιστοποίησης εφοδιαστικής αλυσίδας βιοενέργειας-βιοκαυσίμων.

6. Η εργασία των Inghels et al. (2016) για την βελτιστοποίηση ενός μοντέλου βιώσιμης διαχείρισης απορριμμάτων.
7. Η εργασία των Hombach and Walther (2015) για την βελτιστοποίηση δικριτηριακού μοντέλου για την αγορά βιοκαυσίμων.
8. Η εργασία των Cambero et al. (2016) όπου γίνεται χρησιμοποίηση της AUGMECON σε προβλήματα οικονομικής και περιβαλλοντικής βελτιστοποίησης εφοδιαστικής αλυσίδας σε βιομηχανία παραγωγής βιοενέργειας και βιοκαυσίμων από δάση.
9. Η εργασία των Attia et al. (2019) για την βελτιστοποίηση πολυκριτηριακού μοντέλου σχεδιασμού εφοδιαστικής αλυσίδας πετρελαίου και αερίου.
10. Η εργασία των Razm et al. (2019) για την βελτιστοποίηση πολυκριτηριακού μαθηματικού μοντέλου για τον ανασχεδιασμό ενός παγκόσμιου βιώσιμου δικτύου προμήθειας βιοενέργειας.
11. Η εργασία των Manrotas et al. (2015c) για την πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση προβλήματος διαχείρισης αστικών αποβλήτων και παραγωγής ενέργειας.
12. Η εργασία των Manrotas et al. (2013) με την χρησιμοποίηση της AUGMECON σε ένα μοντέλο πολυκριτηριακού προγραμματισμού για την εκτίμηση των επιπτώσεων της διαχείρισης αστικών αποβλήτων ως προς τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου.
13. Η εργασία των Sazvar et al. (2018) για τη βελτιστοποίηση μιας βιώσιμης εφοδιαστικής αλυσίδας αγροτικών προϊόντων και την διερεύνηση των επιπτώσεων της υποκατάστασης της ζήτησης στην κλιματική αλλαγή και στην δημόσια υγεία.

Από τις εργασίες που μελετήθηκαν παραπάνω γίνεται φανερό πως τα πεδία εφαρμογής των μεθόδων AUGMECON και AUGMECON - 2 ποικίλουν, καταδεικνύοντας τη σημαντικότητά της σε διαφορετικούς επιστημονικούς κλάδους. Πέραν των εφαρμογών, οι μέθοδοι της οικογένειας AUGMECON έχουν μελετηθεί εκτενώς στη βιβλιογραφία ως προς το μεθοδολογικό και το αλγοριθμικό τους κομμάτι, με πολλές μελέτες να επιχειρούν τη σύγκριση με άλλους αλγορίθμους και το συνδυασμό με άλλες δημοφιλείς μεθόδους.

Συγκεκριμένα, στον χώρο των εξελικτικών αλγορίθμων, οι Bootaki et al. (2014), χρησιμοποίησαν την βασική ιδέα της AUGMECON σε μια υβριδική μέθοδο, συνδυάζοντάς την με έναν γενετικό αλγόριθμο για την επίλυση δικριτηριακού προβλήματος κυψελοειδούς κατασκευής, όπου σκοπός ήταν η μεγιστοποίηση μιας αντικειμενικής, ποιότητας μερών, και η ελαχιστοποίηση των διακυτταρικών κινήσεων (ως κύτταρο ορίζεται μια δομή εργασίας αποτελούμενη από εργάτες, διαδικασίες και μηχανές). Ο συνδυασμός της AUGMECON με έναν εξελικτικό αλγόριθμο επιχειρήθηκε και σε επόμενη έρευνα από τους Bootaki et al. (2016), οι οποίοι χρησιμοποίησαν την AUGMECON σε συνδυασμό με την μέθοδο NSGA2, προκειμένου να βελτιωθεί ο χρόνος εκτέλεσης της πρώτης βρίσκοντας όμως σχεδόν βέλτιστες λύσεις -near optimal solutions-, δηλαδή προσεγγίσεις αυτών, μέσω της NSGA2. Η εφαρμογή έγινε σε πρόβλημα κυψελοειδούς κατασκευής προϊόντων, όπου παρατηρείται διακύμανση στο μίγμα προϊόντων. Οι δύο αντικειμενικές που βελτιστοποιήθηκαν ήταν οι σχέσεις μεταξύ των εργατών και η εξειδίκευση των εμπλεκόμενων εργατών. Στον ίδιο χώρο, Οι Khalili-Damghani et al. (2013), χρησιμοποίησαν την AUGMECON σε συνδυασμό με γενετικούς και εξελικτικούς αλγορίθμους, όπως τον αλγόριθμο Πολυκριτηριακής Βελτιστοποίησης Σμήνους Σωματιδίων (MOPSO - Multi-Objective Particle Swarm Optimization) για την επίλυση Πολυκριτηριακών Προβλημάτων Άριστης Κατανομής του Πλεονασμού (MORAP - Multi-objective Reliability Redundancy Allocation Problems). Συνδυασμός με έναν ευρετικό αλγόριθμο έγινε και στην εφαρμογή των Florios and Mavrotas (2014), όπου χρησιμοποιήθηκε η AUGMECON 2 σε συνδυασμό με τον αλγόριθμο Ευρετικής Διακλάδωσης και Αποκοπής (Branch-and-Cut-and-Heuristic) για την προσεγγιστική επίλυση του προβλήματος του περιοδεύοντος πωλητή.

Σε ευρύτερο μεθοδολογικό πλαίσιο, οι Bababeik et al. (2018), χρησιμοποίησαν την AUGMECON σε συνδυασμό με μια μέθοδο ασαφούς λογικής για την επιλογή των καλύτερων λύσεων από το διαθέσιμο σύνολο που προέκυψε από την AUGMECON. Η συνδυαστική μέθοδος εφαρμόστηκε σε πρόβλημα για την αύξηση της ελαστικότητας σε μη εύρωστα σιδηροδρομικά δίκτυα με στόχο την καλύτερη κατανομή τρένων έκτακτης ανάγκης που μεταφέρουν υποστηρικτικό υλικό και προσωπικό σε περιπτώσεις ατυχημάτων με πολλά θύματα και τραυματίες. Οι

Resat and Unsal (2019), χρησιμοποίησαν την AUGMECON 2 σε συνδυασμό με την αναλυτική ιεραρχική μέθοδο (Analytic Hierarchy Process - AHP) σε πρόβλημα βελτιστοποίησης εφοδιαστικής αλυσίδας βιομηχανίας τυποποίησης. Οι Oke and Siddiqui (2015), χρησιμοποίησαν την AUGMECON 2 για την βελτιστοποίηση ενός μοντέλου μεικτού δυαδικού γραμμικού προγραμματισμού σχετικά με την αυτόματη σχηματική χαρτογράφηση για οπτικοποίηση δικτύων και πλοήγηση, ενώ, τέλος, οι Manrotas et al. (2015), χρησιμοποίησαν την AUGMECON 2 σε πολυκριτηριακό συνδυαστικό πρόβλημα βελτιστοποίησης για την επιλογή έργου σε συνδυασμό με μεθοδολογία ανάλυσης ευρωστίας.

Στο πλαίσιο συγκρίσεων με άλλες μεθόδους, οι Dabiri et al. (2017), χρησιμοποίησαν την AUGMECON σε ένα δικριτηριακό πρόβλημα δρομολόγησης διαχείρισης αποθεμάτων και συνέκριναν την επίδοσή της με εκείνη ενός αλγόριθμου Πολυκριτηριακής Βελτιστοποίησης Πολλαπλών και Ανταγωνιστικών Στόχων Σμήνους Σωματιδίων (Multiobjective Discrete Competitive Particle Swarm Optimization – MODCPSO). Οι Habibi et al. (2019), χρησιμοποίησαν την AUGMECON 2 και την συνέκριναν με τον αλγόριθμο MOPSO καθώς και με τον NSGA2 σε ένα μαθηματικό μοντέλο σχεδιασμού και παραγγελίας πρώτων υλών δίνοντας έμφαση στη βιωσιμότητα. Οι Torabi et al. (2013), χρησιμοποίησαν την AUGMECON σε αντιδιαστολή με την MOPSO σε εφαρμογή βελτιστοποίησης τοποθέτησης μηχανών και κατανομής υλικών. Οι Khalili-Damghani and Amiri (2012), χρησιμοποίησαν AUGMECON ως μέτρο σύγκρισης επίδοσης για την εύρεση του ακριβούς μετώπου Pareto σε πολυκριτηριακό πρόβλημα κατανομής αξιοπιστίας (Multi-objective Reliability Allocation series-parallel problem - MORAP) καθώς και με άλλους αλγορίθμους, όπως ο αλγόριθμος πολλαπλών εκκινήσεων μερικής απαρίθμησης (multi-start partial bound enumeration) και με τεχνικές Περιβάλλουσας Ανάλυσης Δεδομένων (Data Envelopment Analysis - DEA). Οι Rayat et al. (2017), χρησιμοποίησαν την AUGMECON καθώς και τους αλγορίθμους NSGA2, MOPSO και τον αλγόριθμο πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης με προσομοίωση ανόπτησης AMOSA (Archived Multi-Objective Simulated Annealing), για την βελτιστοποίηση σε δικριτηριακό πρόβλημα εφοδιαστικής αλυσίδας με ρίσκο έκτακτων διακοπών. Οι Musavi and Bozorgi-Amiri (2017), χρησιμοποίησαν την AUGMECON σε αντιδιαστολή με την NSGA2 –

για σύγκριση επιδόσεων- σε πολυκριτηριακό πρόβλημα βιώσιμου σχεδιασμού εφοδιαστικής αλυσίδας τροφίμων. Οι Mohammadi et al. (2019), χρησιμοποίησαν την AUGMECON, και την συνέκριναν με έναν υβριδικό μετα-ευρετικό αλγόριθμο που κατασκεύασαν για τους σκοπούς της εργασίας τους, ο οποίος βασίζεται στον NGS2 και τον αλγόριθμο μεταβλητής γειτονιάς αναζήτησης (Variable Neighborhood Search – VNS) Η εφαρμογή έγινε σε πρόβλημα σχεδιασμού δικτύου για βιομηχανίες. Οι Dächert et al. (2012), ανέλυσαν μια μέθοδο βασισμένη στην Weighted Tchebycheff, την «Augmented Adaptive Weighted Tchebycheff», και την συνέκριναν με διάφορες παραλλαγές που σχετίζονταν με τροποποιήσεις στην κλιμακοποίηση και κάποιους συντελεστές, ορισμένοι από τους οποίους τέθηκαν σε τιμές παρόμοιες με αυτές που χρησιμοποιεί η AUGMECON. Τέλος, οι Mohammed and Duffuaa (2020) χρησιμοποίησαν τον εξελικτικό αλγόριθμο Αναζήτησης με Απαγορευμένες Καταστάσεις (Tabu Search Algorithm - TSA) και τον συνέκριναν με την AUGMECON 2 για το βέλτιστο πολυκριτηριακό σχεδιασμό εφοδιαστικής αλυσίδας.

Ως προς τις προσεγγίσεις επέκτασης της AUGMECON, οι Ehrenstein et al. (2019) επέκτειναν την AUGMECON και συμπεριέλαβαν στην προς βελτιστοποίηση αντικειμενική έναν ακόμα όρο μη γραμμικό πιθανοτικής φύσης. Η εφαρμογή έγινε σε πρόβλημα στρατηγικού σχεδιασμού εφοδιαστικής αλυσίδας προσομοιώνοντας ακραία γεγονότα. Μια διαφορετική προσέγγιση στην εξερεύνηση των βέλτιστων λύσεων δίνεται από την μέθοδο Anytime AUGMECON (Domínguez-Ríos et al., 2019). Εδώ ο προτεινόμενος αλγόριθμος βασίζεται στον ορισμό συγκεκριμένων περιοχών του χώρου, υπό την μορφή «κουτιών». Επίσης εφαρμόζεται και εδώ η τεχνική της λεξικογραφικής βελτιστοποίησης. Τα «κουτιά» εξετάζονται διαδοχικά με σκοπό την εύρεση ισχυρών λύσεων. Σε περίπτωση που κάποιο «κουτί» περιέχει μια ισχυρή λύση, ο έλεγχος προχωρά σε δυο νέα «κουτιά» που είναι το αποτέλεσμα του διαχωρισμού του αρχικού κουτιού σε τέσσερα μέρη, από τα οποία αφαιρούνται εκείνο που είναι άδειο και εκείνο που περιέχει κυριαρχούμενες λύσεις. Ο αλγόριθμος σταματά όταν έχει εξεταστεί το σύνολο των «κουτιών». Στις σημαντικότερες, και πιο συναφείς με την παρούσα διατριβή, εργασίες βελτίωσης της μεθόδου AUGMECON τοποθετείται η μέθοδος SAUGMECON των Zhang and Reimann (2014). Πιο συγκεκριμένα, οι Zhang and

Reimann (2014), πρότειναν μια βελτιωμένη έκδοση της AUGMECON, την απλή επαυξημένη μέθοδο των περιορισμών (simple augmented -constraint -), η οποία έχει καθιερωθεί με την ονομασία και στο εξής θα αναφέρεται ως «SAUGMECON». Το έρεισμα πίσω από την ανάπτυξη της μεθόδου «SAUGMECON» είναι όμοιο με αυτό που προτείνει η παρούσα διατριβή και αφορά τη βελτίωση της υπολογιστικής αποτελεσματικότητας της AUGMECON με την αποφυγή επίλυσης μοντέλων που οδηγούν είτε σε αδύνατες λύσεις είτε σε λύσεις οι οποίες έχουν ήδη προκύψει από προηγούμενες επιλύσεις. Για αυτό και η συγκεκριμένη μέθοδος επιλέγεται να αναλυθεί σε λεπτομέρεια. Το μαθηματικό μοντέλο της SAUGMECON είναι το παρακάτω:

$$\text{Max}\{f_p(\mathbf{x}) + \delta * (f_1(\mathbf{x})/r_1 + f_2(\mathbf{x})/r_2 + \dots + f_{p-1}(\mathbf{x})/r_{p-1})\}$$

s. t.

$$f_1(\mathbf{x}) \geq e_1$$

$$f_2(\mathbf{x}) \geq e_2$$

...

$$f_{p-1}(\mathbf{x}) \geq e_{p-1}$$

$$\mathbf{x} \in S$$

Η μέθοδος SAUGMECON δανείζεται στοιχεία τόσο από την παραδοσιακή μέθοδο των περιορισμών, όσο και από την μέθοδο AUGMECON. Παρατηρείται ότι η συνάρτηση που βελτιστοποιείται αποτελείται από ένα σταθμισμένο άθροισμα των αντικειμενικών συναρτήσεων που στη συνέχεια τίθενται ως περιορισμοί -με κατάλληλες παραμέτρους κλίμακας, όπως και στην AUGMECON. Ωστόσο, μια βασική διαφορά της παραπάνω μοντελοποίησης σε σχέση με την AUGMECON, είναι η μη χρήση μεταβλητών απόκλισης και ως εκ τούτου το γεγονός ότι οι περιορισμένες αντικειμενικές τίθενται ως ανισότητες και όχι ως ισότητες. Υπενθυμίζεται πως οι ανισοτικές σχέσεις στους περιορισμούς αποτελούν χαρακτηριστικό της μεθόδου των περιορισμών. Η μη χρήση μεταβλητών απόκλισης οδηγεί σε μια πολύ διαφορετική προσέγγιση της επίλυσης, η οποία βασίζεται στις μεταβλητές ελέγχου βρόγχων ef_i . Στα βασικά σημεία της διαδικασίας επίλυσης που προτείνει η μέθοδος SAUGMECON είναι η

αρχικοποίηση των μεταβλητών ελέγχου βρόγχων κάνοντας χρήση των αρχικών ελάχιστων τιμών που προκύπτουν από την μονοκριτηριακή βελτιστοποίηση των αντικειμενικών συναρτήσεων. Ένα δεύτερο σημείο που παρουσιάζει ιδιαιτερότητα είναι η καταγραφή των λύσεων $[f_1^*, f_2^*, \dots, f_p^*, x^*]$ έπειτα από κάθε επίλυση του μοντέλου. Η καταγραφή γίνεται προκειμένου να γίνει εφικτή η διαδικασία σύγκρισης των τελευταίων, ελαχίστων, τιμών των αντικειμενικών συναρτήσεων. Η σύγκριση επιτυγχάνεται ελέγχοντας σε κάθε επαναληπτική επίλυση τις προηγούμενες λύσεις και επιλέγοντας από κάθε πλειάδα λύσεων την ελάχιστη τιμή. Η επιτάχυνση του αλγορίθμου επιτυγχάνεται μέσω διαδοχικών ελέγχων που προηγούνται των βελτιστοποιήσεων με στόχο να προσδιοριστεί αν θα πρέπει να λυθεί το αντίστοιχο μοντέλο ή αν μπορεί να παραληφθεί η επίλυσή του, δεδομένων προηγούμενων βελτιστοποιήσεων σύμφωνα με τα αποτελέσματα των οποίων η τρέχουσα βελτιστοποίηση κρίνεται περιττή. Συγκεκριμένα ελέγχεται εάν υπάρχει κάποιο υποπρόβλημα με τιμές ef_i μικρότερες ή ίσες των τρεχουσών, δηλαδή αν υφίσταται υποπρόβλημα με πιο χαλαρούς περιορισμούς, τέτοιο ώστε η λύση του υποπροβλήματος αυτού να ικανοποιεί και τους τρέχοντες περιορισμούς. Σε αυτή την περίπτωση απλά ανανεώνονται οι τιμές των μεταβλητών ελέγχου βρόγχων χωρίς να επιλυθεί το μοντέλο και η επίλυση προχωρά στο επόμενο βήμα. Από τα παραπάνω εξάγεται το συμπέρασμα ότι η μέθοδος SAUGMECON είναι εμφανώς δαιδαλώδης και απαιτεί αρκετούς και περίπλοκους ελέγχους, σε αντίθεση με την μέθοδο που προτείνει η παρούσα διατριβή, η οποία είναι πιο εύχρηστη, ως πιο κατανοητή, και απαιτεί λιγότερους ελέγχους αφού η πληροφορία που βρίσκεται ενσωματωμένη στις μεταβλητές απόφασης γίνεται άμεσα εκμεταλλεύσιμη.

Κεφάλαιο 4

4 Προτεινόμενος αλγόριθμος πολυστοχικής βελτιστοποίησης

4.1 Αδυναμίες της AUGMECON 2

Η AUGMECON 2 αποτελεί έναν ισχυρό αλγόριθμο για την επίλυση προβλημάτων MOIP και την εύρεση του συνόλου των κατά Pareto βέλτιστων λύσεων. Ωστόσο υπάρχουν ορισμένα σημεία της μεθόδου η βελτίωση των οποίων μπορεί να οδηγήσει σε ακόμα καλύτερες επιδόσεις, ειδικά για την επίλυση προβλημάτων ακέραιου προγραμματισμού και πιο συγκεκριμένα στην περίπτωση προβλημάτων μεγάλου μεγέθους.

Το πρώτο και βασικότερο σημείο της μεθόδου AUGMECON 2 που χρήζει βελτίωσης είναι ο υψηλός χρόνος επίλυσης προβλημάτων με πολλές αντικειμενικές, ειδικότερα από τρεις αντικειμενικές και πάνω, και συγκεκριμένα στις περιπτώσεις μεγάλων προβλημάτων, δηλαδή σε προβλήματα όπου το εύρος των αντικειμενικών είναι μεγάλο.

Αυτό συμβαίνει αρχικά διότι η AUGMECON 2 εκμεταλλεύεται μόνο τις μεταβλητές απόκλισης που αντιστοιχούν στην αντικειμενική του πιο εμφωλευμένου βρόγχου, με αποτέλεσμα, ακόμα και αν ο υπολογιστικός χρόνος μειώνεται σε σχέση με την απλή AUGMECON, να παραμένει αρκετά υψηλός λόγω του μεγάλου αριθμού των εμφωλευμένων βρόχων. Με βάση την περιγραφή του αλγορίθμου της AUGMECON 2 στο προηγούμενο κεφάλαιο, καθίσταται σαφές ότι ο αλγόριθμος μεταχειρίζεται τις αντικειμενικές που τίθενται ως περιορισμοί σαν εμφωλευμένους βρόγχους. Προσεγγίζοντας το πρόβλημα προγραμματιστικά, είναι γνωστό πως ένας αλγόριθμος με m το πλήθος αντικειμενικές και n το μέσο εύρος των αντικειμενικών έχει πολυπλοκότητα $O(n^{m-1})$ τιμή η οποία είναι

αρκετά μεγάλη για προγράμματα που τρέχουν σε περιβάλλοντα όπως το GAMS. Για παράδειγμα ένα πρόβλημα 6krY όπου η κάθε αντικειμενική έχει ένα εύρος περίπου χίλια (1000) θα έχει πολυπλοκότητα $O(1000^5)$ δηλαδή το πλήθος των προβλημάτων βελτιστοποίησης που θα επιλυθούν θα είναι της τάξης του $1000^5 = 10^{15}$ το οποίο βέβαια είναι ένα πολύ μεγάλο, σχεδόν απαγορευτικό για την επίλυση, νούμερο -στην πραγματικότητα θα είναι λίγο μικρότερο αφού κάποιες βελτιστοποιήσεις λόγω του συντελεστή παράκαμψης του πιο εμφωλευμένου βρόγχου θα έχουν παραληφθεί. Επομένως γίνεται κατανοητό ότι όσες περισσότερες αντικειμενικές έχει ένα πρόβλημα, τόσο πιο ασύμφορη γίνεται η χρήση της AUGMECON 2 για την επίλυσή του.

Ένα δεύτερο στοιχείο που οδηγεί σε αύξηση του υπολογιστικού χρόνου της AUGMECON 2 αφορά την απαίτηση οι συντελεστές των αντικειμενικών συναρτήσεων να είναι ακέραιοι. Όπως έχει ήδη αναφερθεί, η λύση στην περίπτωση αυτή είναι ο πολλαπλασιασμός με την κατάλληλη δύναμη του δέκα (10) ώστε οι συντελεστές να γίνουν ακέραιοι. Για παράδειγμα έστω ότι μια από τις αντικειμενικές είναι η παρακάτω:

$$f_i = 0,05 * x_1 + 0,05489 * x_2 + 0,3874 * x_3 + 0,2347 * x_4 + 0,034 * x_5 + 0,126 * x_6$$

και έστω ότι το εύρος της είναι $r_i = 250$

τότε για να μετατραπούν όλοι οι συντελεστές σε ακέραιους, εντοπίζεται αρχικά ο συντελεστής με τα περισσότερα δεκαδικά ψηφία -εδώ το 0,05489- και πολλαπλασιάζονται οι συντελεστές της f_i με την αντίστοιχη κατάλληλη δύναμη του δέκα (10) που καθορίζεται από τον συντελεστή με το μέγιστο πλήθος δεκαδικών -εδώ απαιτείται πολλαπλασιασμός με 10^5 διότι το 0,05489 έχει πέντε (5) δεκαδικά ψηφία-.

Οπότε η νέα αντικειμενική γίνεται:

$$f'_i = 5000 * x_1 + 5489 * x_2 + 38740 * x_3 + 23470 * x_4 + 3400 * x_5 + 12600 * x_6$$

Η παραπάνω μετατροπή ταυτόχρονα συνεπάγεται ότι το εύρος της αντικειμενικής δεν θα είναι πλέον διακόσια πενήντα ($r_i = 250$) αλλά $r'_i = 250 * 10^5$

10^5 , το οποίο οδηγεί και πάλι σε ένα πολύ μεγάλο, σχεδόν απαγορευτικό για την επίλυση, νούμερο.

Υποθέτοντας τώρα ένα μεγαλύτερο πρόβλημα, το οποίο έστω ότι έχει τέσσερις (4) αντικειμενικές, οι τρεις από τις οποίες τίθενται ως περιορισμοί, και έστω ότι το εύρος της κάθε μιας είναι περίπου διακόσια πενήντα (250). Στην περίπτωση που σε ένα τέτοιο πρόβλημα εντοπίζονται μη ακέραιοι συντελεστές, αντίστοιχα με την περίπτωση που καταδείχθηκε προηγουμένως, αλλά με τη διαφορά ότι και τώρα η απαίτηση για μετατροπή σε ακέραιο υφίσταται και στις τρεις αντικειμενικές των περιορισμών, τότε κάθε αντικειμενική θα πολλαπλασιαστεί με 10^5 και τα νέα εύρη των αντικειμενικών θα είναι $250 * 10^5$ για την κάθε μία. Αυτό οδηγεί στην αύξηση της πολυπλοκότητας του νέου προβλήματος, από την τιμή $O(250^3)$ του προηγούμενου προβλήματος σε $O(250^3 * 10^{15})$, το αντιστοιχεί σε πρόβλημα φαινομενικά αδύνατο να επιλυθεί σε λογικούς χρόνους.

Σύμφωνα με τα παραπάνω παραδείγματα, στην γενική περίπτωση προβλημάτων με m το πλήθος αντικειμενικές συναρτήσεις, μέσο εύρος για την κάθε αντικειμενική $r_{average}$ και μέσο αριθμό δεκαδικών ψηφίων για τους συντελεστές της κάθε συνάρτησης k , η πολυπλοκότητα του προβλήματος δεν είναι πλέον $O(r_{average}^{m-1})$, αλλά $O((r_{average}^{m-1}) * 10^{k*(m-1)})$ το οποίο ακόμα και για μικρές τιμές των $r_{average}$ και k εξακολουθεί να αντιπροσωπεύει μια πολύ μεγάλη τιμή.

Από τον τύπο $O((r_{average}^{m-1}) * 10^{k*(m-1)})$ καταδεικνύεται εμφανώς το μειονέκτημα που εισάγει στην AUGMECON 2 η απαίτηση για ακέραιους συντελεστές αντικειμενικών συναρτήσεων. Η αύξηση της πολυπλοκότητας, και άρα του υπολογιστικού χρόνου, στην περίπτωση ύπαρξης δεκαδικών ψηφίων είναι πολύ μεγάλη. Παραδείγματός χάριν για ένα μικρό πρόβλημα με τέσσερις (4) αντικειμενικές, εύρος για την κάθε μια $r_{average} = 50$ και $k = 2$, ο αριθμός των βελτιστοποιήσεων θα είναι της τάξης του $50^3 * 10^6 = 1,25 * 10^{11}$, ενώ απουσία δεκαδικών ψηφίων θα είναι της τάξης του $50^3 = 125.000 \ll 1,25 * 10^{11}$. Τονίζεται και πάλι ότι εδώ γίνεται αναφορά σε τάξη μεγέθους και όχι σε ακριβή αριθμό βελτιστοποιήσεων λόγω της ενσωμάτωσης του συντελεστή παράκαμψης στον πιο εμφωλευμένο βρόγχο.

Ένα ακόμα στοιχείο που αυξάνει τον χρόνο επίλυσης της AUGMECON 2 είναι η επαναληπτική επίλυση βελτιστοποιήσεων που οδηγούν σε αδύνατες λύσεις. Παρατηρώντας τον Πίνακα 3-5 διαπιστώνεται ότι υπάρχει μια τεράστια απόκλιση ανάμεσα στο πλήθος των επιλυόμενων βελτιστοποιήσεων και στο σύνολο των προκύπτοντων κατά Pareto βέλτιστων λύσεων [PF*]. Για παράδειγμα στην περίπτωση του προβλήματος 3kp100 μόνο «6500» από τα επιλυόμενα «103049» μοντέλα οδηγούν σε βέλτιστες λύσεις, που σημαίνει πως επιλύονται κατά περίπου δεκαέξι φορές περισσότερα μοντέλα από όσα απαιτούνται για την διεξαγωγή χρήσιμων για το πρόβλημα συμπερασμάτων. Είναι εμφανές πως το επιθυμητό στην ιδανική περίπτωση είναι να επιλύονται ακριβώς τόσα μοντέλα όσο και το πλήθος των λύσεων του μετώπου Pareto, καθώς σε κάθε άλλη περίπτωση χάνεται πολύτιμος υπολογιστικός χρόνος. Προκειμένου να παραλειφθούν περιττές επαναλήψεις η AUGMECON 2 προτείνει την εφαρμογή συντελεστών παράκαμψης. Ωστόσο αυτοί αφορούν μόνο τον εσωτερικό βρόγχο του αλγορίθμου, που αντιστοιχεί στα σημεία πλέγματος μίας μόνο αντικειμενικής συνάρτησης, και όχι στο σύνολο των σημείων όλων των αντικειμενικών συναρτήσεων. Επομένως υφίσταται μεν εξοικονόμηση στον αριθμό περιττών επιλύσεων, η οποία ωστόσο απέχει της μέγιστης δυνατής.

Παράλληλα, η αδυναμία γνώσης των ακριβών ελαχίστων τιμών των αντικειμενικών συναρτήσεων, και η χρήση αντί αυτών κατώτατων φραγμάτων, δημιουργεί την ανάγκη επίλυσης πρόσθετων βελτιστοποιήσεων, οι οποίες επίσης κοστίζουν σε υπολογιστικό χρόνο. Σημειώνεται εδώ ότι η γνώση των ελαχίστων τιμών των αντικειμενικών συναρτήσεων δεν είναι πάντα εύκολη διαδικασία καθότι οι αλγόριθμοι υπολογισμού των ελαχίστων τιμών είναι αρκετά περίπλοκοι και παράλληλα εμφανίζουν δύο βασικά μειονεκτήματα. Το πρώτο είναι ότι προσφέρουν τη δυνατότητα υπολογισμού των ελαχίστων τιμών για προβλήματα όπου υπάρχουν μέχρι τρεις αντικειμενικές συναρτήσεις, ενώ για μεγαλύτερο αριθμό αντικειμενικών συναρτήσεων ο βαθμός δυσκολίας αυξάνεται σε βαθμό που τους καθιστά μη πρακτικούς. Κατά δεύτερον, ο χρόνος εύρεσης των ελαχίστων τιμών μέσω των αντίστοιχων αλγορίθμων είναι αρκετά μεγάλος και στην γενική περίπτωση συγκρίσιμος με τον χρόνο που χρειάζεται συνολικά η AUGMECON 2 για την επίλυση του προβλήματος. Για τους παραπάνω λόγους

καθίσταται προτιμότερη η χρησιμοποίηση κατώτατων ορίων για τις αντικειμενικές συναρτήσεις, δηλαδή μιας υποεκτίμησης των ελαχίστων τιμών των αντικειμενικών. Κάτι τέτοιο αυξάνει τον υπολογιστικό χρόνο της AUGMECON 2, αλλά συγκριτικά με την αναμενόμενη διάρκεια εκτέλεσης του κώδικα για τον ακριβή υπολογισμό των ελαχίστων τιμών των αντικειμενικών συναρτήσεων, η αύξηση του χρόνου επίλυσης από την χρησιμοποίηση κατώτατων ορίων είναι σαφώς μικρότερη. Ενδεικτικά αναφέρεται εδώ ένα ρεαλιστικό παράδειγμα με σκοπό να γίνει εμφανής η εξοικονόμηση χρόνου στην περίπτωση χρήσης κατώτατων ορίων για τις αντικειμενικές συναρτήσεις, αντί των ελαχίστων τιμών. Θεωρείται πρόβλημα πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης το οποίο επιλύεται από την AUGMECON 2 χρησιμοποιώντας μία συντηρητική υποεκτίμηση των ελαχίστων τιμών των αντικειμενικών. Έστω ότι το συγκεκριμένο πρόβλημα επιλύεται σε μία ώρα με χρήση των κατώτατων ορίων για τις αντικειμενικές συναρτήσεις, ενώ η εκ των προτέρων ακριβής γνώση των ελαχίστων τιμών οδηγεί σε επίλυση σε χρόνο πενήντα (50) λεπτών. Τότε, η προσέγγιση με υποεκτίμηση των ελαχίστων τιμών έχει καθυστερήσει την επίλυση κατά δέκα (10) λεπτά. Ωστόσο, ένας ρεαλιστικός χρόνος που απαιτείται για την εκτέλεση του κώδικα για τον ακριβή υπολογισμό των ελαχίστων τιμών των αντικειμενικών συναρτήσεων αντιστοιχεί σε δεκαπέντε (15) έως είκοσι (20) λεπτά. Καθίσταται λοιπόν σαφές ότι ο κατά προσέγγιση υπολογισμός των ελαχίστων τιμών των αντικειμενικών συναρτήσεων με χρήση των κατώτατων ορίων είναι στην γενική περίπτωση προτιμότερος σε σχέση με την χρήση μεθόδων για τον ακριβή υπολογισμό των ελαχίστων τιμών.

4.2 Διερεύνηση εναλλακτικών προσεγγίσεων βελτίωσης της μεθόδου AUGMECON 2

Προκειμένου να αντιμετωπιστούν μερικές από τις αδυναμίες της μεθόδου AUGMECON 2, διερευνώνται εναλλακτικές μέθοδοι χειρισμού των σημείων που προκαλούν αύξηση του υπολογιστικού χρόνου, ειδικά όσον αφορά τον ακριβέστερο υπολογισμό κατώτατων ορίων για τις αντικειμενικές συναρτήσεις και της αποδοτικότερης χρήσης των συντελεστών παράκαμψης.

Ο κατά προσέγγιση υπολογισμός των ελαχίστων τιμών των αντικειμενικών συναρτήσεων γίνεται, όπως παρουσιάστηκε αναλυτικά σε προηγούμενη ενότητα, μέσω του πίνακα πληρωμών. Ισχύει γενικά πως οι τιμές που λαμβάνονται από τον πίνακα πληρωμών αποτελούν υπερεκτίμηση των ελαχίστων τιμών. Επομένως για να εξασφαλιστεί ότι θα επιλεγεί είτε η ακριβής ελάχιστη τιμή της συνάρτησης, είτε μια υποεκτίμησή της, θα πρέπει οι ελάχιστες τιμές που δίνει ο πίνακας πληρωμών να μειωθούν κατά ένα ασφαλές ποσό, το οποίο εξασφαλίζει ότι το κατώτατο όριο που τίθεται προκύπτει χαμηλότερο της ελάχιστης τιμής.

Ένας τρόπος υπολογισμού των κατώτατων ορίων θα μπορούσε θεωρητικά να είναι η απομείωση των τιμών του πίνακα πληρωμών (υπενθυμίζεται ότι για κάθε αντικειμενική συνάρτηση λαμβάνεται η ελάχιστη τιμή της αντίστοιχης στήλης του πίνακα πληρωμών) με πολλαπλασιασμό των εν λόγω τιμών με έναν μειωτικό συντελεστή μικρότερο της μονάδας.

Για παράδειγμα έστω ο παρακάτω πίνακας πληρωμών:

Πίνακας 4-1: Παράδειγμα πίνακα πληρωμών για εύρεση του κατώτατου ορίου των αντικειμενικών συναρτήσεων

| | f_1 | f_2 | f_3 |
|------------|-------|-------|-------|
| $\max f_1$ | 2050 | 1480 | 1383 |
| $\max f_2$ | 1655 | 1970 | 1323 |
| $\max f_3$ | 1491 | 1249 | 1887 |

Όπως έχει επισημανθεί οι ελάχιστες τιμές του πίνακα πληρωμών «1491», «1249» και «1323» δεν αποτελούν απαραίτητα τις ελάχιστες τιμές των αντικειμενικών συναρτήσεων f_1, f_2, f_3 , αλλά είναι μεγαλύτερες ή ίσες αυτών. Οπότε για να εξασφαλιστεί υποεκτίμηση συγκριτικά με τις ελάχιστες τιμές, έστω ότι εκτελείται πολλαπλασιασμός με συντελεστή μικρότερο της μονάδας, έστω με την τιμή «0,9» (και επιλογή του κάτω ακέραιου μέρους της προκύπτουσας τιμής), οπότε για τον δεδομένο πίνακα πληρωμών και για τις συναρτήσεις f_2, f_3 που χρησιμοποιούνται ως περιορισμού προκύπτουν τα κατώτατα όρια \lim_{f_2}, \lim_{f_3} ως εξής:

$$\lim_{f_2} = \text{int}(0,9 * 1249) = 1124 \text{ και } \lim_{f_3} = \text{int}(0,9 * 1323) = 1190.$$

Ειδικά σε ορισμένες περιπτώσεις όπου το πλέγμα απαιτείται να είναι συμμετρικό, δηλαδή το πλήθος των σημείων του πλέγματος να είναι το ίδιο για όλες τις

αντικειμενικές συναρτήσεις, είναι απαραίτητες περεταίρω τροποποιήσεις οι οποίες στο συγκεκριμένο παράδειγμα διαμορφώνονται ως εξής:

Για $\lim_{f_2} = 1124$ το εύρος της f_2 χρησιμοποιώντας την μέγιστη τιμή για την f_2 του πίνακα πληρωμών είναι $r_2 = 1970 - 1124 = 846$. Για να είναι συμμετρικό το πλέγμα θα πρέπει το εύρος της f_3 να ισούται με το εύρος της f_2 , δηλαδή πρέπει $r_2 = r_3 = 846$. Δεδομένου ότι η μέγιστη τιμή για την f_3 βάση του πίνακα πληρωμών είναι «1887» και με την απαίτηση για $r_3 = 846$, το \lim_{f_3} , για συμμετρικό πλέγμα, θα πρέπει να είναι $\lim_{f_3} = 1887 - 846 = 1041$. Επομένως οι νέες εκτιμήσεις των κατώτατων ορίων των αντικειμενικών συναρτήσεων διαμορφώνονται σε $\lim_{f_2} = 1124$ και $\lim_{f_3} = 1041$.

Ωστόσο η παραπάνω μεθοδολογία, δηλαδή ο προσδιορισμός των κατώτατων ορίων των συναρτήσεων με πολλαπλασιασμό των ελαχίστων του πίνακα πληρωμών με μειωτικό συντελεστή, δεν εξασφαλίζει αποδεδειγμένα ότι τα υπολογιζόμενα κατώτατα όρια είναι μικρότερα των ελαχίστων τιμών των αντικειμενικών συναρτήσεων, δεδομένου μάλιστα πως η επιλογή του μειωτικού συντελεστή γίνεται στην προκειμένη αυθαίρετα. Στην περίπτωση που η εκτίμηση που προκύπτει από τη μεθοδολογία είναι μεγαλύτερη της πραγματικής ελάχιστης τιμής των αντικειμενικών συναρτήσεων θα χαθούν μια ή περισσότερες λύσεις με αποτέλεσμα ο αλγόριθμος τελικά να μη δίνει το ακριβές μέτωπο Pareto. Ταυτόχρονα όμως είναι επιθυμητό η εκτίμηση του κατώτατου ορίου να είναι όσο το δυνατόν πιο κοντά, αλλά σε κάθε περίπτωση χαμηλότερα από την πραγματική ελάχιστη τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης, καθώς κάτι τέτοιο συνεπάγεται μικρότερο πλέγμα και άρα μικρότερο υπολογιστικό χρόνο. Προκύπτει επομένως η ανάγκη η εκτίμηση του κατώτατου ορίου να είναι συντηρητική, ώστε να περιλαμβάνει την ελάχιστη τιμή και να μην παραλείπεται κάποια κατά Pareto βέλτιστη λύση, με ταυτόχρονη απαίτηση να μην είναι αρκετά κατώτερη της ελάχιστης τιμής, ώστε να εξοικονομείται πολύτιμος υπολογιστικός χρόνος.

Προκειμένου να προσδιοριστεί με μεγαλύτερη ακρίβεια το εύρος των αντικειμενικών συναρτήσεων και να προσεγγιστούν καλύτερα τα κατώτατα όρια αυτών διερευνάται η ακόλουθη εναλλακτική μεθοδολογία. Όπως επεξηγήθηκε στα προηγούμενα, σε περιπτώσεις παρουσίας εναλλακτικών βέλτιστων γίνεται

χρήση της λεξικογραφικής βελτιστοποίησης προκειμένου να αποφευχθεί τυχόν εύρεση κυριαρχούμενων λύσεων. Στην λεξικογραφική βελτιστοποίηση είναι σε ορισμένες περιπτώσεις σημαντική η σειρά βελτιστοποίησης των αντικειμενικών συναρτήσεων, με τις διαφορές να καθορίζονται από τις παραμέτρους του προβλήματος. Επομένως τα αποτελέσματα του πίνακα πληρωμών εξαρτώνται από τη σειρά με την οποία επιλέγεται να βελτιστοποιηθούν οι αντικειμενικές συναρτήσεις, με άμεσο επακόλουθο να υπάρχει η δυνατότητα δημιουργίας πολλαπλών πινάκων πληρωμών, αναλόγως της σειράς βελτιστοποίησης. Στο επόμενο παράδειγμα διερευνάται η πρόταση υπολογισμού όλων των δυνατών πινάκων πληρωμών, με βάση όλους τους συνδυασμούς των εναλλακτικών σειρών βελτιστοποίησης, ώστε να προκύψει μια πιο σαφής εικόνα για το εύρος τιμών κάθε αντικειμενικής.

Για την περίπτωση τριών αντικειμενικών συναρτήσεων οι δυνατοί συνδυασμοί βελτιστοποιήσεων είναι οι εξής:

$$f_1, f_2, f_3$$

$$f_1, f_3, f_2$$

$$f_2, f_1, f_3$$

$$f_2, f_3, f_1$$

$$f_3, f_1, f_2$$

$$f_3, f_2, f_1$$

Πίνακας 4-2: Πίνακας πληρωμών για εναλλακτική σειρά βελτιστοποιήσεων

| | f_1 | f_2 | f_3 | | f_1 | f_2 | f_3 |
|------------|------------------|------------------------------|------------------------------|--|------------------------------|------------------------------|------------------|
| $\max f_1$ | z_1^* | $z_{1,2}(x_1^*)$ | $z_{1-2,3}(x_1^*, x_{12}^*)$ | | z_1^* | $z_{1-3,2}(x_1^*, x_{13}^*)$ | $z_{1,3}(x_1^*)$ |
| $\max f_2$ | $z_{2,1}(x_2^*)$ | z_2^* | $z_{2-1,3}(x_2^*, x_{21}^*)$ | | $z_{2-3,1}(x_2^*, x_{23}^*)$ | z_2^* | $z_{2,3}(x_2^*)$ |
| $\max f_3$ | $z_{3,1}(x_3^*)$ | $z_{3-1,2}(x_3^*, x_{31}^*)$ | z_3^* | | $z_{3-2,1}(x_3^*, x_{32}^*)$ | $z_{3,2}(x_3^*)$ | z_3^* |

Με z_i^* απεικονίζεται η άριστη τιμή της i αντικειμενικής συνάρτησης, η οποία ανεξάρτητα από τη σειρά των βελτιστοποιήσεων είναι ίδια για όλες τις βελτιστοποιήσεις, με $z_{i,j}(x_i^*)$ η τιμή της j αντικειμενικής συνάρτησης όπως προκύπτει από την άριστη λύση της i αντικειμενικής συνάρτησης, ενώ με

$z_{i-k,j}(x_i^*, x_{ik}^*)$ συμβολίζεται η τιμή της j αντικειμενικής συνάρτησης όπως προκύπτει από την άριστη λύση της i αντικειμενικής συνάρτησης και την άριστη λύση της k αντικειμενικής συνάρτησης, με δεδομένη την άριστη τιμή της i αντικειμενικής συνάρτησης.

Από τον Πίνακα 4-2 παρατηρείτε ότι για την περίπτωση τριών αντικειμενικών συναρτήσεων ο συνολικός αριθμός των απαιτούμενων βελτιστοποιήσεων προκειμένου να καλυφθούν όλες οι πιθανές τιμές του πίνακα πληρωμών για κάθε εναλλακτική σειρά βελτιστοποίησης είναι δεκαπέντε (15), δεδομένου ότι τα διαγώνια στοιχεία z_i^* παραμένουν σταθερά και ανεξάρτητα της σειράς βελτιστοποίησης. Επισημαίνεται εδώ ότι υπάρχει η πιθανότητα, ανάλογα με τις παραμέτρους του προβλήματος και τις μεταξύ τους σχέσεις, κάποια ή κάποιες εκ των δεκαπέντε (15) βελτιστοποιήσεων να οδηγούν σε ίδιες τιμές, ωστόσο στην γενική περίπτωση προκύπτουν κατά μέγιστο δεκαπέντε (15) διαφορετικές τιμές.

Αποδεικνύεται επαγωγικά ότι το κόστος υπολογισμού για m το πλήθος αντικειμενικές συναρτήσεις είναι:

$$m + m[(m - 1)!(m - 1) - [(m - 2)!/2](m - 3)(m - 1)] \quad (E1)$$

Για $m = 3$ η σχέση E1 γίνεται $3 + 3[2! \cdot 2 - [2!/2] \cdot 0 \cdot 2] = 15$, γεγονός που επιβεβαιώνει την ανάλυση του Πίνακα 4-2.

Ενδεικτικά αναφέρεται ότι εφαρμόζοντας την παραπάνω σχέση για έξι (6) αντικειμενικές συναρτήσεις, το πλήθος των συνολικών βελτιστοποιήσεων διαμορφώνεται σε «2526».

Η παραπάνω μέθοδος που προτείνει την εξαντλητική διερεύνηση των δυνατών τιμών των αντικειμενικών συναρτήσεων για κάθε σειρά βελτιστοποίησής τους, υπερτερεί στο ότι προσφέρει μια πληρέστερη εικόνα για την επιλογή του κατώτατου ορίου. Για να γίνει αντιληπτό αυτό το πλεονέκτημα χρησιμοποιείται ένα απλό παράδειγμα τριών αντικειμενικών συναρτήσεων για το οποίο έστω ότι για δεδομένη προτεραιότητα στην βελτιστοποίηση προκύπτει ο ακόλουθος πίνακας πληρωμών.

Πίνακας 4-3: 1^{ος} εναλλακτικός πίνακας πληρωμών για τρεις αντικειμενικές συναρτήσεις

| | f_1 | f_2 | f_3 |
|------------|-------|-------|-------|
| $\max f_1$ | 2500 | 1600 | 1500 |
| $\max f_2$ | 1750 | 2100 | 1600 |
| $\max f_3$ | 1800 | 1650 | 2050 |

Έστω παράλληλα ότι για μια δεύτερη εναλλακτική σειρά βελτιστοποίησης λαμβάνεται:

Πίνακας 4-4: 2^{ος} εναλλακτικός πίνακας πληρωμών για τρεις αντικειμενικές συναρτήσεις

| | f_1 | f_2 | f_3 |
|------------|-------|-------|-------|
| $\max f_1$ | 2500 | 1550 | 1600 |
| $\max f_2$ | 1700 | 2100 | 1650 |
| $\max f_3$ | 1800 | 1650 | 2050 |

Συγκρίνοντας τους δύο πίνακες πληρωμών προκύπτει από τον πρώτο $\lim_{f_2} = 1600$, ενώ από τον δεύτερο $\lim_{f_2} = 1550$, τιμή η οποία με βεβαιότητα προσεγγίζει καλύτερα την πραγματική ελάχιστη τιμή της συνάρτησης f_2 . Αντίστοιχη παρατήρηση ισχύει για την αντικειμενική συνάρτηση f_3 , με $\lim_{f_3} = 1500$ για τον πρώτο τώρα πίνακα και $\lim_{f_3} = 1600$ για τον δεύτερο πίνακα. Επομένως για την περίπτωση της f_2 δίνει καλύτερη προσέγγιση της ελάχιστης τιμής η δεύτερη σειρά βελτιστοποίησης, ενώ για την f_3 η πρώτη. Ως εκ τούτου γίνεται αντιληπτό ότι γνωρίζοντας όλους τους δυνατούς πίνακες πληρωμών εξάγονται τα κατώτερα όρια των αντικειμενικών συναρτήσεων με μεγαλύτερη ευστοχία και ασφάλεια για υπολογισμό τιμών όσο το δυνατόν πιο κοντά στις πραγματικές ελάχιστες τιμές των συναρτήσεων.

Ωστόσο καθίσταται σαφές ότι η παραπάνω μεθοδολογία για τον υπολογισμό εναλλακτικών πινάκων πληρωμών επηρεάζει καθοριστικά τον υπολογιστικό χρόνο, ειδικά για μεγάλο αριθμό αντικειμενικών συναρτήσεων όπου η αύξηση των επιπρόσθετων βελτιστοποιήσεων είναι σημαντική (όπως στην περίπτωση των έξι αντικειμενικών συναρτήσεων για την οποία απαιτούνται στην γενική περίπτωση «2526» βελτιστοποιήσεις). Στις περιπτώσεις αυτές, η αύξηση του υπολογιστικού χρόνου που επιφέρουν οι επιπλέον βελτιστοποιήσεις για τον

υπολογισμό όλων των διαφορετικών πινάκων πληρωμών είναι κατά πολύ μεγαλύτερη από την επίπτωση που έχει υπολογιστικά μια λιγότερο ακριβής εποπτεία των κατώτατων ορίων, επομένως η εφαρμογή της μεθόδου χάνει την ουσία της δημιουργίας της.

Επιπλέον, όπως παρουσιάστηκε πρωτύτερα, μία από τις αδυναμίες της μεθόδου AUGMECON 2 είναι ότι το πλεονέκτημα μείωσης του χρόνου επίλυσης λόγω του συντελεστή παράκαμψης παρέχεται μόνο στον εσωτερικό βρόγχο του προβλήματος. Μια σχετική λύση η οποία διερευνάται ακριβώς στα επόμενα είναι η δυνατότητα αποδοτικού καθορισμού της σειράς με την οποία οι συναρτήσεις τοποθετούνται στους βρόγχους επίλυσης, ώστε στον εσωτερικότερο βρόγχο να τοποθετηθεί η συνάρτηση με το μεγαλύτερο εύρος. Σε περίπτωση συμμετρικού πλέγματος, η σειρά τοποθέτησης των συναρτήσεων εντός των επαναληπτικών βρόγχων είναι προφανές ότι δεν επηρεάζει τον χρόνο επίλυσης. Ωστόσο η δυνατότητα καθορισμού συμμετρικού πλέγματος δεν είναι εφικτή για όλα τα προβλήματα, γεγονός που καθιστά τη σειρά τοποθέτησης των συναρτήσεων εντός των βρόγχων ιδιαίτερα σημαντική, όπως στο παρακάτω παράδειγμα.

Έστω πρόβλημα με τρεις αντικειμενικές συναρτήσεις και πίνακα πληρωμών:

Πίνακας 4-5: Παράδειγμα πίνακα πληρωμών με μη δυνατότητα εξαγωγής συμμετρικού πλέγματος

| | f_1 | f_2 | f_3 |
|------------|-----------|--------|-------|
| $\max f_1$ | 5.960.777 | 12.905 | 2.620 |
| $\max f_2$ | 5.490.329 | 13.160 | 2.354 |
| $\max f_3$ | 5.326.878 | 10.920 | 3.094 |

Θεωρώντας μειωτικό συντελεστή 0,9 προκύπτουν για τα κατώτατα όρια των f_2 και f_3 και τα αντίστοιχα εύρη:

$$\lim_{f_2} = \text{int}(10.920 * 0,9) = 9.828$$

$$\lim_{f_3} = \text{int}(2.354 * 0,9) = 2.118$$

$$r_2 = 13.160 - 9.828 = 3.332$$

$$r_3 = 3.094 - 2.118 = 976$$

Γίνεται αντιληπτό ότι η εξαγωγή συμμετρικού πλέγματος δεν είναι εφικτή, διότι το εύρος της f_2 είναι μεγαλύτερο της μέγιστης τιμής της f_3 , οπότε είναι αδύνατη η περαιτέρω μείωση του κατώτατου ορίου της f_3 , ώστε να προκύψει συμμετρικό πλέγμα ($\lim_{f_3} = 3.094 - 3.332 < 0$ που είναι αδύνατο). Επομένως προκύπτει μη συμμετρικό πλέγμα (3332x976).

Είναι δεδομένο πως ο συντελεστής παράκαμψης επιδρά μόνο στον πιο εμφωλευμένο βρόγχο και άρα μόνο σε αυτόν τον βρόχο παρακάμπτονται οι περιττές βελτιστοποιήσεις. Αν θεωρηθεί βαθμός παράκαμψης σημείων του πλέγματος λόγω του συντελεστή παράκαμψης -έστω λ - ο οποίος εκφράζει τα σημεία που παρακάμπτονται ως ποσοστό του συνολικού αριθμού σημείων, τότε για τις δύο εναλλακτικές περιπτώσεις συναρτήσεων εντός του πιο εμφωλευμένου βρόγχου λαμβάνονται τα εξής:

- Περίπτωση παρουσίας αντικειμενικής συνάρτησης f_2 εντός του πιο εμφωλευμένου βρόγχου:

$$\text{Συνολικός αριθμός επαναλήψεων για το πρόβλημα} = [3332 * (1 - \lambda_1)] * 976$$

- Περίπτωση παρουσίας αντικειμενικής συνάρτησης f_3 εντός του πιο εμφωλευμένου βρόγχου:

$$\text{Συνολικός αριθμός επαναλήψεων για το πρόβλημα} = [976 * (1 - \lambda_2)] * 3332$$

Όπου σχεδόν σε όλες τις περιπτώσεις $\lambda_1 > \lambda_2$, διότι για μεγαλύτερο εύρος αντικειμενικής συνάρτησης, οι μεταβλητές απόκλισης τείνουν να λάβουν μεγαλύτερες τιμές αφού έχουν μεγαλύτερα περιθώρια μεταβολής. Επομένως, προκειμένου να επιτευχθεί γρηγορότερη επίλυση, είναι προτιμότερο να επιλέγεται η αντικειμενική συνάρτηση με το μεγαλύτερο εύρος εντός του πιο εμφωλευμένου βρόγχου. Για τους εξωτερικούς βρόχους δεν παίζει ρόλο η σειρά τοποθέτησης των αντικειμενικών συναρτήσεων, δεδομένου ότι δεν εφαρμόζεται συντελεστής παράκαμψης.

Λαμβάνοντας υπόψη τα πλεονεκτήματα και τις αδυναμίες της μεθόδου AUGMECON 2, προτείνεται μια βελτιωμένη έκδοση της AUGMECON 2, η οποία στο

εξής θα αναφέρεται με την ονομασία «AUGMECON – R». Ο αλγόριθμος AUGMECON – R είναι ένας αρκετά ισχυρός αλγόριθμος χάρη στον οποίο επιλύονται εύκολα προβλήματα πολυκριτηριακής ανάλυσης αποφάσεων που μέχρι τώρα ήταν δυσεπίλυτα. Στη συνέχεια παρουσιάζεται η AUGMECON R τόσο σε μαθηματικό όσο και σε αλγοριθμικό επίπεδο.

4.3 Η μέθοδος AUGMECON - R

Βασικός στόχος της μεθόδου AUGMECON – R είναι η επίλυση ακριβώς τόσων μοντέλων βελτιστοποίησης, όσα και το πλήθος των προκύπτοντων κατά Pareto βέλτιστων λύσεων. Επιδιώκεται δηλαδή η πλήρης εξάλειψη περιττών βελτιστοποιήσεων, που οδηγούν σε αδύνατες ή ίδιες κατά Pareto βέλτιστες λύσεις. Οι δύο κύριες αιτίες περιττών βελτιστοποιήσεων είναι:

1. Εφαρμογή του συντελεστή παράκαμψης μόνο στον πιο εμφωλευμένο βρόγχο, αντί της πλήρους εφαρμογής του στο σύνολο των βρόγχων του προβλήματος.
2. Αδυναμία πρόβλεψης επιλύσεων βελτιστοποίησης που οδηγούν σε αδύνατες λύσεις.

Σχετικά με το σημείο «1», η καινοτομία που εισάγει η AUGMECON – R στηρίζεται στην ιδέα των ήδη χρησιμοποιούμενων συντελεστών παράκαμψης. Η πρόταση που διερευνάται είναι η παράλειψη επαναλήψεων όχι μόνο στον πιο εσωτερικό, αλλά στο σύνολο των βρόγχων του αλγορίθμου. Η πρόβλεψη των περιττών βελτιστοποιήσεων βάση του συντελεστή παράκαμψης υλοποιείται αλγοριθμικά στη μέθοδο AUGMECON – R με την εισαγωγή ενός πίνακα αποθήκευσης δεδομένων με την ονομασία *flag*, ο οποίος για πρόβλημα k αντικειμενικών συναρτήσεων έχει διάσταση $k - 1$, δηλαδή αντίστοιχη του αριθμού των αντικειμενικών συναρτήσεων που τίθενται ως περιορισμοί. Στην ουσία κάθε διάσταση του πίνακα αντιστοιχεί σε μία αντικειμενική συνάρτηση περιορισμού και οι θέσεις κάθε διάστασης του πίνακα αντιστοιχούν στα σημεία πλέγματος της αντίστοιχης αντικειμενικής. Επομένως οι δείκτες των θέσεων του πίνακα είναι ακέραια αριθμοί που δηλώνουν τη θέση πάνω στο πλέγμα, πάνω στην οποία γίνεται η βελτιστοποίηση. Ο πίνακας αρχικοποιείται, εισάγοντας την τιμή μηδέν σε κάθε θέση. Κάθε βελτιστοποίησης προηγείται έλεγχος σχετικά με την τιμή της

αντίστοιχης θέσης του πίνακα. Σε περίπτωση που η τιμή είναι μηδέν, η βελτιστοποίηση πραγματοποιείται. Σε αντίθετη περίπτωση η βελτιστοποίηση μετακινείται σε επόμενα σημεία στο πλέγμα. Επισημαίνεται πως η βελτιστοποίηση δεν οδηγεί κατά κανόνα στο αμέσως επόμενο σημείο του πλέγματος. Ορισμένα σημεία του πλέγματος μπορεί να παραληφθούν και ο αλγόριθμος να αποφύγει την περιττή συγκεκριμένη επανάληψη (ή τις περιττές επαναλήψεις). Ο αριθμός των σημείων του πλέγματος για τη συνάρτηση του πιο εσωτερικού βρόγχου που αναμένεται να παρακαμφθούν υποδεικνύεται στην τιμή της αντίστοιχης θέσης του πίνακα *flag*, η οποία ενημερώνεται κατάλληλα κατά την εκτέλεση του αλγορίθμου. Σε κάθε βελτιστοποίηση που εκτελείται ενημερώνεται το περιεχόμενο συγκεκριμένων θέσεων του πίνακα *flag*. Ο προσδιορισμός των θέσεων που θα ενημερωθούν προσδιορίζεται από τις τιμές των συντελεστών παράκαμψης των βρόγχων επανάληψης για τη συγκεκριμένη βελτιστοποίηση, πλην του εσωτερικού. Οι προς ενημέρωση θέσεις του πίνακα *flag* λαμβάνουν την τιμή του συντελεστή παράκαμψης του πιο εσωτερικού βρόγχου (προσαυξημένη κατά μία μονάδα), όπως προκύπτει από την βελτιστοποίηση για τη συγκεκριμένη θέση πλέγματος.

Στο σημείο αυτό είναι σημαντικό να οριστεί η έννοια της *γνήσιας βελτιστοποίησης*, προκειμένου να προσδιοριστεί ο αριθμός των περιττών επαναλήψεων τις οποίες παρακάμπτει επιτυχώς ο αλγόριθμος της AUGMECON - R.

Ορισμός: Μια βελτιστοποίηση ονομάζεται γνήσια εάν το αποτέλεσμα της είναι μια πλειάδα λύσεων διαφορετική από αυτή που λαμβάνεται σε περίπτωση μείωσης οποιουδήποτε από τα e_i κατά μία μονάδα.

Ως γενική διατύπωση, ο τύπος που ορίζει τον αριθμό των περιττών βελτιστοποιήσεων (*PB*) που προκύπτουν από μια γνήσια βελτιστοποίηση είναι:

$$PB = b_3 + b_4 * (b_3 + 1) + b_5 * (b_4 + 1) * (b_3 + 1) + \dots + b_k * (b_{k-1} + 1) * (b_{k-2} + 1) * \dots * (b_3 + 1)$$

όπου k ο αριθμός των αντικειμενικών συναρτήσεων του προβλήματος και b ο συντελεστής παράκαμψης της εκάστοτε αντικειμενικής συνάρτησης k .

Αν συμβολιστεί με D το σύνολο των γνήσιων βελτιστοποιήσεων τότε ο αριθμός των συνολικών βελτιστοποιήσεων (ΣB) που δεν θα εκτελεστούν από την AUGMECON - R χάρη στον πίνακα $flag$ είναι:

$$\Sigma B = \sum_{i \in D} b_{3,i} + b_{4,i} * (b_{3,i} + 1) + b_{5,i} * (b_{4,i} + 1) * (b_{3,i} + 1) + \dots + b_{k,i} * (b_{k-1,i} + 1) * (b_{k-2,i} + 1) * \dots * (b_{3,i} + 1)$$

Όπου i η εκάστοτε γνήσια βελτιστοποίηση.

Αντίστοιχα, σχετικά με το σημείο «2», η μέθοδος AUGMECON - R εξασφαλίζει την παράκαμψη του συνόλου των επαναλήψεων που οδηγούν σε αδύνατες λύσεις, επεκτείνοντας τις δυνατότητες της AUGMECON 2 η οποία εξασφαλίζει την μη εκτέλεση ορισμένων επαναλήψεων στην περίπτωση που μια προηγούμενη επανάληψη οδηγήσει σε αδύνατη λύση, ωστόσο δεν διασφαλίζει την μη εκτέλεση του συνόλου των περιττών, λόγω αδυναμίας επίλυσης, επαναλήψεων. Ο έλεγχος για αδύνατες λύσεις από την AUGMECON 2 επικεντρώνεται, κατ' αντιστοιχία με την εξέταση των συντελεστών παράκαμψης, στον έλεγχο του πιο εμφωλευμένου βρόγχου αποκλειστικά. Αντιθέτως η AUGMECON - R προτείνει μια υλοποίηση κατά την οποία θα παραλείπονται οι περιττές επαναλήψεις που έπονται μιας αδύνατης λύσης και αφορούν όχι μόνο τις επόμενες τιμές στο πλέγμα του πιο εμφωλευμένου βρόγχου, αλλά το σύνολο των επόμενων σημείων πλέγματος για όλους τους βρόγχους του προβλήματος. Η γενική ιδέα πίσω από την σχετική, προτεινόμενη από την AUGMECON - R, μεθοδολογία είναι η εξής:

Έστω οι τιμές e_i^* του δεξιού μέλους των περιορισμών των αντικειμενικών συναρτήσεων f_i για τις οποίες προκύπτει αδύνατη λύση. Τότε για οποιαδήποτε αύξηση των παραπάνω τιμών με όλες τις υπόλοιπες ίσες ή μεγαλύτερες των * λαμβάνεται και πάλι αδύνατη λύση, αφού η επίλυση οδηγείται κατά κανόνα σε σημεία εκτός του εφικτού χώρου. Επομένως, αν οριστεί συμβολικά $\delta_i \in NU \setminus \{0\}$ τότε οποιοσδήποτε συνδυασμός των $\{e_i^* + \delta_i\}$ για το δεξί μέλος των περιορισμών της συνάρτησης f_i θα οδηγήσει σε αδύνατη λύση. Θεωρώντας την αντικειμενική συνάρτηση f_2 στον πιο εσωτερικό βρόγχο του προβλήματος, οι μη εκτελέσιμες από την AUGMECON 2 βελτιστοποιήσεις ανήκουν στο σύνολο $\{e_2^* + \delta_2, \dots, e_i^* + \delta_i\} | \delta_i = 0$ για $i \neq 2$ και $\delta_2 > 0$. Αντίθετα, χάρη στις τροποποιήσεις που προτείνει

η AUGMECON – R καθίσταται μη εκτελέσιμος ο συνολικός αριθμός των περιττών αδύνατων βελτιστοποιήσεων, για κάθε τιμή δ_i εντός των ορίων των συναρτήσεων. Αυτό επιτυγχάνεται και πάλι μέσω της χρήσης του πίνακα *flag*. Όπως και στην περίπτωση των περιττών βελτιστοποιήσεων λόγω των συντελεστών παράκαμψης, γίνεται στοχευμένη τροποποίηση συγκεκριμένων θέσεων του πίνακα. Η τροποποίηση αφορά την αποθήκευση εντός των συγκεκριμένων θέσεων του πίνακα της πληροφορίας για τον αριθμό των βελτιστοποιήσεων που δε θα εκτελεστούν. Η διαφορά σε σχέση με τη χρήση του πίνακα *flag* για τους συντελεστές παράκαμψης έγκειται στον τρόπο προσδιορισμού των προς τροποποίηση θέσεων και των περιεχομένων τους, τα οποία ορίζονται πλέον από το εύρος της κάθε αντικειμενικής συνάρτησης και όχι από τις τιμές των εκάστοτε συντελεστών παράκαμψης.

4.4 Επεξήγηση της μεθόδου AUGMECON – R μέσω παραδείγματος

Η λογική πίσω από τις προτεινόμενες από AUGMECON – R τροποποιήσεις και η συνεισφορά τους στην επέκταση της μεθόδου AUGMECON 2 εξηγείται μέσω του ακόλουθου παραδείγματος:

Έστω πρόβλημα ακέραιου πολυκριτηριακού προγραμματισμού με πέντε αντικειμενικές συναρτήσεις. Έστω επίσης, χωρίς βλάβη γενικότητας, ότι η f_2 έχει εύρος $r_2 = 7$, η f_3 εύρος $r_3 = 5$, η $f_4, r_4 = 3$ και η $f_5, r_5 = 2$. Λόγω της φύσης του προβλήματος ως ακέραιου προγραμματισμού το βήμα αύξησης των σημείων του πλέγματος λαμβάνεται ίσο με ένα (1), ώστε να προκύψουν οχτώ ($r_2 + 1$) σημεία για την αντικειμενική συνάρτηση f_2 , έξι για την αντικειμενική f_3 , τέσσερα για την f_4 και τρία για την f_5 . Δεδομένου ότι η συνάρτηση f_2 τοποθετείται στον πιο εμφωλευμένο βρόγχο του προβλήματος, με τις συναρτήσεις f_3, f_4, f_5 να λαμβάνουν τους αμέσως πιο εξωτερικούς βρόγχους με την αυτή σειρά, ώστε η f_5 να εντοπίζεται στον πιο εξωτερικό βρόγχο του προβλήματος, η εικόνα που σχηματίζεται για τους μετρητές των επαναλήψεων και τα αντίστοιχα σημεία του πλέγματος θα έχει την παρακάτω μορφή:

Πίνακας 4-6: Σημεία πλέγματος για κάθε βρόγχο αντικειμενικής συνάρτησης

| Βρόγχος- Αντικειμενική Συνάρτηση | Σημεία πλέγματος |
|--|------------------|
| 1 ^{ος} (πιο εσωτερικός) βρόγχος (αντιστοίχιση με f_2) | 0 1 2 3 4 5 6 7 |
| 2 ^{ος} (επόμενος εξωτερικός) βρόγχος (αντιστοίχιση με f_3) | 0 1 2 3 4 5 |
| 3 ^{ος} (δεύτερος πιο εξωτερικός) βρόγχος (αντιστοίχιση με f_4) | 0 1 2 3 |
| 4 ^{ος} (πιο εξωτερικός) βρόγχος (αντιστοίχιση με f_5) | 0 1 2 |

Σύμφωνα με την μαθηματική μοντελοποίηση της AUGMECON 2 το προς επίλυση πρόβλημα διατυπώνεται μαθηματικά ως εξής:

$$\max \{f_1(\mathbf{x}) + 10^{-3} * \left(\frac{s_2}{7} + 10^{-1} * \frac{s_3}{5} + 10^{-2} * \frac{s_4}{3} + 10^{-3} * \frac{s_5}{2}\right)\}$$

$$f_2(\mathbf{x}) = s_2 + e_2$$

$$f_3(\mathbf{x}) = s_3 + e_3$$

$$f_4(\mathbf{x}) = s_4 + e_4$$

$$f_5(\mathbf{x}) = s_5 + e_5$$

Ορίζονται επίσης οι ελάχιστες τιμές των αντικειμενικών συναρτήσεων ($e_2 \dots e_5$) ως εξής:

$$e_2 = 16999, e_3 = 183, e_4 = 26, e_5 = 30$$

Χωρίς βλάβη γενικότητας εξετάζεται μια τυχαία θέση του πλέγματος, κατά την οποία λαμβάνονται το 2^ο σημείο πλέγματος για τις αντικειμενικές συναρτήσεις f_2, f_4 , το 3^ο σημείο πλέγματος για την αντικειμενική f_3 , και η αρχική ελάχιστη τιμή (1^ο σημείο του πλέγματος) για την f_5 . Η συγκεκριμένη θέση στο πλέγμα θα συμβολίζεται στο εξής με (θ_1). Για την θ_1 επομένως:

$$e_2^{\theta_1} = e_2 + step_2 * 1 = 16999 + 1 * 1 = 17000$$

$$e_3^{\theta_1} = e_3 + step_3 * 2 = 183 + 2 = 185$$

$$e_4^{\theta_1} = e_4 + step_4 * 1 = 26 + 1 = 27$$

$$e_5^{\theta_1} = e_5 = 30$$

Στον Πίνακα 4-7 επισημαίνεται με πράσινο χρώμα η τρέχουσα επανάληψη για την θ_1 .

Πίνακας 4-7: Επισημάνση της θ_1 στο πλέγμα

| Βρόγχος- Αντικειμενική Συνάρτηση | Σημεία πλέγματος |
|--|------------------------|
| 1ος (πιο εσωτερικός) βρόγχος (αντιστοίχιση με f_2) | 0 1 2 3 4 5 6 7 |
| 2ος (επόμενος εξωτερικός) βρόγχος (αντιστοίχιση με f_3) | 0 1 2 3 4 5 |
| 3ος (δεύτερος πιο εξωτερικός) βρόγχος (αντιστοίχιση με f_4) | 0 1 2 3 |
| 4ος (πιο εξωτερικός) βρόγχος (αντιστοίχιση με f_5) | 0 1 2 |

Έστω επίσης ότι τα αποτελέσματα της βελτιστοποίησης για την θ_1 που λαμβάνονται από την επίλυση του μοντέλου είναι τα εξής:

$$f_2^{\theta_1} = 17003 = e_2^{\theta_1} + s_2^{\theta_1} \xrightarrow{e_2^{\theta_1}=17000} s_2^{\theta_1} = 3$$

$$f_3^{\theta_1} = 187 = e_3^{\theta_1} + s_3^{\theta_1} \xrightarrow{e_3^{\theta_1}=185} s_3^{\theta_1} = 2$$

$$f_4^{\theta_1} = 28 = e_4^{\theta_1} + s_4^{\theta_1} \xrightarrow{e_4^{\theta_1}=27} s_4^{\theta_1} = 1$$

$$f_5^{\theta_1} = 31 = e_5^{\theta_1} + s_5^{\theta_1} \xrightarrow{e_5^{\theta_1}=30} s_5^{\theta_1} = 1$$

Έτσι, εφαρμόζοντας τον τύπο $b_i = \frac{s_i}{step_i}$, $i = 2 \dots 5$ και δεδομένου του μοναδιαίου βήματος $step_i = 1$ υπολογίζονται οι παρακάτω συντελεστές παράκαμψης για την θ_1 :

$$b_2^{\theta_1} = \frac{s_2^{\theta_1}}{1} = 3$$

$$b_3^{\theta_1} = \frac{s_3^{\theta_1}}{1} = 2$$

$$b_4^{\theta_1} = \frac{s_4^{\theta_1}}{1} = 1$$

$$b_5^{\theta_1} = \frac{s_5^{\theta_1}}{1} = 1$$

Η AUGMECON 2 θα αξιοποιήσει κατ' αποκλειστικότητα την εφαρμογή του συντελεστή $b_2^{\theta_1}$ με αποτέλεσμα να παρακαμφθούν τρεις κατά τον αριθμό επαναλήψεις, αντί των μέγιστων εφτά που θα μπορούσαν να παραληφθούν όπως καταδεικνύεται από το σύνολο των τιμών των συντελεστών παράκαμψης. Επομένως, όπως ορίζει η μέθοδος AUGMECON 2, ο αλγόριθμος θα αποφύγει τις τρεις επαναλήψεις «2», «3», «4» του πιο εμφωλευμένου βρόγχου και θα μεταβεί στην 5^η επανάληψη για τον συγκεκριμένο βρόγχο από την οποία θα ληφθεί μια νέα λύση.

Πίνακας 4-8: Αποφυγή περιττών επαναλήψεων λόγω του b_2 για τη θ_1

| Βρόγχος- Αντικειμενική Συνάρτηση | Σημεία πλέγματος |
|--|---|
| 1 ^{ος} (πιο εσωτερικός) βρόγχος (αντιστοίχιση με f_2) | 0 1 2 3 4 5 6 7 |
| 2 ^{ος} (επόμενος εξωτερικός) βρόγχος (αντιστοίχιση με f_3) | 0 1 2 3 4 5 |
| 3 ^{ος} (δεύτερος πιο εξωτερικός) βρόγχος (αντιστοίχιση με f_4) | 0 1 2 3 |
| 4 ^{ος} (πιο εξωτερικός) βρόγχος (αντιστοίχιση με f_5) | 0 1 2 |

Πίνακας 4-9: Νέες διαδοχικές καταστάσεις που έπονται της θ_1

| | |
|--|------------------------|
| 1 ^{ος} (πιο εσωτερικός) βρόγχος (αντιστοίχιση με f_2) | 0 1 2 3 4 5 6 7 |
| 2 ^{ος} (επόμενος εξωτερικός) βρόγχος (αντιστοίχιση με f_3) | 0 1 2 3 4 5 |
| 3 ^{ος} (δεύτερος πιο εξωτερικός) βρόγχος (αντιστοίχιση με f_4) | 0 1 2 3 |
| 4 ^{ος} (πιο εξωτερικός) βρόγχος (αντιστοίχιση με f_5) | 0 1 2 |
| 1 ^{ος} (πιο εσωτερικός) βρόγχος (αντιστοίχιση με f_2) | 0 1 2 3 4 5 6 7 |
| 2 ^{ος} (επόμενος εξωτερικός) βρόγχος (αντιστοίχιση με f_3) | 0 1 2 3 4 5 |
| 3 ^{ος} (δεύτερος πιο εξωτερικός) βρόγχος (αντιστοίχιση με f_4) | 0 1 2 3 |
| 4 ^{ος} (πιο εξωτερικός) βρόγχος (αντιστοίχιση με f_5) | 0 1 2 |
| 1 ^{ος} (πιο εσωτερικός) βρόγχος (αντιστοίχιση με f_2) | 0 1 2 3 4 5 6 7 |
| 2 ^{ος} (επόμενος εξωτερικός) βρόγχος (αντιστοίχιση με f_3) | 0 1 2 3 4 5 |
| 3 ^{ος} (δεύτερος πιο εξωτερικός) βρόγχος (αντιστοίχιση με f_4) | 0 1 2 3 |
| 4 ^{ος} (πιο εξωτερικός) βρόγχος (αντιστοίχιση με f_5) | 0 1 2 |
| 1 ^{ος} (πιο εσωτερικός) βρόγχος (αντιστοίχιση με f_2) | 0 1 2 3 4 5 6 7 |
| 2 ^{ος} (επόμενος εξωτερικός) βρόγχος (αντιστοίχιση με f_3) | 0 1 2 3 4 5 |
| 3 ^{ος} (δεύτερος πιο εξωτερικός) βρόγχος (αντιστοίχιση με f_4) | 0 1 2 3 |
| 4 ^{ος} (πιο εξωτερικός) βρόγχος (αντιστοίχιση με f_5) | 0 1 2 |
| 1 ^{ος} (πιο εσωτερικός) βρόγχος (αντιστοίχιση με f_2) | 0 1 2 3 4 5 6 7 |
| 2 ^{ος} (επόμενος εξωτερικός) βρόγχος (αντιστοίχιση με f_3) | 0 1 2 3 4 5 |
| 3 ^{ος} (δεύτερος πιο εξωτερικός) βρόγχος (αντιστοίχιση με f_4) | 0 1 2 3 |
| 4 ^{ος} (πιο εξωτερικός) βρόγχος (αντιστοίχιση με f_5) | 0 1 2 |

Για την τελευταία γραμμή του Πίνακας 4-9, έστω θέση θ_2 , οι τιμές των $e_2^{\theta_2}$, $e_4^{\theta_2}$, $e_5^{\theta_2}$ παραμένουν ίσες με αυτές της θέσης θ_1 , αφού αντιστοιχούν στην ίδια

επανάληψη στο πλέγμα, ενώ η τιμή του $e_3^{\theta_2}$ έχει αυξηθεί κατά ένα λόγω του ότι αντιστοιχεί στην ακριβώς επόμενη επανάληψη. Επομένως:

$$e_2^{\theta_2} = e_2^{\theta_1} = 17000$$

$$e_3^{\theta_2} = e_2^{\theta_1} + 1 = 186$$

$$e_4^{\theta_2} = e_4^{\theta_1} = 27$$

$$e_5^{\theta_2} = e_5^{\theta_1} = 30$$

Τα αποτελέσματα μετά την βελτιστοποίηση είναι τα εξής:

$$f_2^{\theta_2} = 17003 = e_2^{\theta_2} + s_2^{\theta_2} \xrightarrow{e_2^{\theta_2}=17000} s_2^{\theta_2} = 3$$

$$f_3^{\theta_2} = 187 = e_3^{\theta_2} + s_3^{\theta_2} \xrightarrow{e_3^{\theta_2}=186} s_3^{\theta_2} = 1$$

$$f_4^{\theta_2} = 28 = e_4^{\theta_2} + s_4^{\theta_2} \xrightarrow{e_4^{\theta_2}=27} s_4^{\theta_2} = 1$$

$$f_5^{\theta_2} = 31 = e_5^{\theta_2} + s_5^{\theta_2} \xrightarrow{e_5^{\theta_2}=30} s_5^{\theta_2} = 1$$

Παρατηρείται ότι οι διαφορές της θ_1 και της θ_2 περιορίζονται στην διαφορετική τιμή για τη μεταβλητή απόκλισης $s_3^{\theta_2}$. Κάτι τέτοιο είναι αναμενόμενο αφού η θέση θ_1 παρουσίαζε $b_3^{\theta_1} = 2$, που σημαίνει πως οι επαναλήψεις για τα σημεία «3» και «4» στον βρόγχο της f_3 θα δώσουν ακριβώς την ίδια λύση όπως προκύπτει για την επανάληψη «2». Ωστόσο η μέθοδος AUGMECON 2 αδυνατεί να προβλέψει και να αποφύγει τις περιττές επαναληπτικές βελτιστοποιήσεις των παραπάνω σημείων «3» και «4». Αντίστοιχα συμβαίνει και για τις συναρτήσεις f_4 και f_5 , όπου $b_4^{\theta_1} = 1$ και $b_5^{\theta_1} = 1$ και επομένως οι βελτιστοποιήσεις για τα σημεία «1» και «0» δίνουν τις ίδιες ακριβώς λύσεις με τα σημεία «2» και «1» αντίστοιχα. Ο λόγος που συμβαίνει αυτό επεξηγήθηκε αναλυτικά στο Κεφάλαιο 3.

Στόχος της AUGMECON – R είναι, πέραν των περιττών βελτιστοποιήσεων που παραλείπονται από την AUGMECON 2, η αποφυγή επιπλέον περιττών επαναλήψεων, που αντιστοιχούν στις συναρτήσεις των υπολοίπων, πέραν του

Με εφαρμογή του τύπου για τον υπολογισμό του αριθμού των περιττών βελτιστοποιήσεων στο παράδειγμα 1, όπου $b_3 = 2$, $b_4 = 1$, $b_5 = 1$:

$$\begin{aligned} PB &= b_3 + b_4 * (b_3 + 1) + b_5 * (b_4 + 1) * (b_3 + 1) \\ &= 2 + 1 * (2 + 1) + 1 * (1 + 1) * (2 + 1) = 11 \end{aligned}$$

Σχετικά με την αλγοριθμική υλοποίηση του πίνακα *flag*, επεξηγείται αρχικά στην γενική του μορφή ένα πρόβλημα ακέραιου προγραμματισμού (MIP) με πέντε αντικειμενικές συναρτήσεις και εύρη των αντικειμενικών συναρτήσεων των περιορισμών f_2, f_3, f_4, f_5 ίσα με $r_2 = m, r_3 = n, r_4 = k, r_5 = l$ αντίστοιχα. Ο πίνακας *flag* έχει ως αναμενόταν τέσσερις διαστάσεις $flag [i] [j] [r] [v]$ και αριθμό θέσεων $(m + 1) \times (n + 1) \times (k + 1) \times (l + 1)$, δηλαδή ίσο με το μέγεθος του πλέγματος βελτιστοποίησης. Ο δείκτης i θεωρείται ότι αντιστοιχεί στη θέση πάνω στο πλέγμα της αντικειμενικής f_2 , ο j στη θέση πάνω στο πλέγμα της αντικειμενικής f_3 και ο r στη θέση της f_4 και ο v στη θέση της f_5 . Για τους συμβολισμούς που δόθηκαν παραπάνω, η διαδικασία που ακολουθείται είναι η παρακάτω:

1. Θεωρείται η θέση του πίνακα *flag* με δείκτες i^*, j^*, r^*, v^* .
2. Στη συνέχεια γίνεται έλεγχος της τιμής του πίνακα *flag* για τη συγκεκριμένη θέση.
3. Αν η τιμή είναι $flag[i^*][j^*][r^*][v^*] = 0$ εκτελείται η βελτιστοποίηση, αλλιώς η βελτιστοποίηση παρακάμπτεται.
4. Από την εκτέλεση της βελτιστοποίησης προκύπτουν οι συντελεστές παράκαμψης b_2, b_3, b_4, b_5 .
5. Στη συνέχεια ενημερώνεται το περιεχόμενο συγκεκριμένων θέσεων του πίνακα *flag*. Ο προσδιορισμός των θέσεων που θα ενημερωθούν προσδιορίζεται από τις τιμές των συντελεστών παράκαμψης των βρόγχων επανάληψης, πλην του εσωτερικού (δηλαδή στην προκειμένη των b_3, b_4, b_5). Οι προς ενημέρωση θέσεις του πίνακα *flag* λαμβάνουν την τιμή του συντελεστή παράκαμψης του πιο εσωτερικού βρόγχου (προσαυξημένη κατά μία μονάδα), όπως προκύπτει από την βελτιστοποίηση για τη συγκεκριμένη θέση πλέγματος, σύμφωνα με την παρακάτω επαναληπτική υλοποίηση:

```

for(v, v* to v + b5)
{
  for(r, r* to r* + b4)
  {
    for(j, j* to j* + b3)
    {
      for(i, i* to i*)
      flag[i][j][r][v]
      = b2 + 1;
    }
  }
}

```

(5.1)

Συγκεκριμένα έστω ότι θεωρείται η θέση του πίνακα *flag* όπου οι δείκτες i^*, j^*, r^*, v^* λαμβάνουν τις τιμές $i^* = 1, j^* = 2, r^* = 1, v^* = 0$. Η συγκεκριμένη θέση λόγω της αρχικοποίησης περιλαμβάνει μηδενικό στοιχείο, οπότε οδηγεί σε εκτέλεση της εν λόγω βελτιστοποίησης. Επίσης έστω ότι ενδεικτικά οι τιμές για τους συντελεστές παράκαμψης για τη συγκεκριμένη βελτιστοποίηση προκύπτουν ίσες με: $b_2 = 3, b_3 = 2, b_4 = 1, b_5 = 1$ (εξετάζεται δηλαδή για λόγους συνέχειας και καλύτερης κατανόησης το ίδιο πρόβλημα που παρουσιάστηκε παραπάνω). Ο αλγόριθμος της AUGMECON – R δίνει τιμές στις θέσεις του πίνακα *flag* ακολουθώντας τη διαδικασία που περιεγράφηκε στην (5.1):

```

for(v, 0 to 1)
{
  for(r, 1 to 2)
  {
    for(j, 2 to 4)
    {

```

```

for(i, 1 to 1)
    flag[i][j][r][v] = 4;
}
}
}

```

Η παραπάνω αλγοριθμική υλοποίηση που προτείνει η AUGMECON – R δίνει στις θέσεις $[1][2][1][0]$, $[1][3][1][0]$, $[1][4][1][0]$, $[1][2][2][0]$, $[1][3][2][0]$, $[1][4][2][0]$, $[1][2][1][1]$, $[1][3][1][1]$, $[1][4][1][1]$, $[1][2][2][1]$, $[1][3][2][1]$, $[1][4][2][1]$, του πίνακα *flag*, την τιμή τέσσερα (4), που είναι η τιμή του συντελεστή παράκαμψης b_2 προσαυξημένη κατά μία μονάδα. Οι υπόλοιπες θέσεις παραμένουν στην τιμή μηδέν. Αυτό σημαίνει πως όταν ο αλγόριθμος βρεθεί σε οποιαδήποτε από τις θέσεις με τιμή τέσσερα (4), έστω για παράδειγμα στην $[1][4][1][1]$, τότε η εν λόγω επανάληψη δεν θα εκτελεστεί και η βελτιστοποίηση θα οδηγηθεί απευθείας σε θέση που αντιστοιχεί σε τέσσερις θέσεις μετά την τρέχουσα στο πλέγμα του πιο εμφωλευμένου βρόγχου. Δηλαδή όταν ο αλγόριθμος βρεθεί στην θέση $[1][4][1][1]$, αντί της επανάληψης στη θέση $[1][4][1][1]$, θα εκτελεστεί η επανάληψη στη θέση $[5][4][1][1]$ και όλες οι ενδιάμεσες επαναλήψεις θα παρακαμφθούν. Εύκολα παρατηρείται ότι οι θέσεις που έχουν λάβει την τιμή τέσσερα (4) είναι ακριβώς οι ίδιες θέσεις που αποτυπώνονται στον Πίνακα 4-10. Καταδεικνύεται επομένως ο τρόπος με τον οποίο η AUGMECON – R επιτυγχάνει αλγοριθμικά την αποφυγή των έντεκα περιττών βελτιστοποιήσεων του Πίνακα 15 και κατ' επέκταση όλων των περιττών βελτιστοποιήσεων λόγω των συντελεστών παράκαμψης, η οποία και βασίζεται στην καινοτόμο υλοποίηση του πίνακα *flag*.

Όπως εξηγήθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, όταν το σημείο $e_2 = 0.5$ και $e_3 = 0.6$ οδηγεί σε αδύνατη λύση, τότε στην AUGMECON 2 δεν γίνεται επιπλέον έλεγχος για εύρεση ικανών λύσεων για τα σημεία που προκύπτουν για τις τιμές $(e_2 = 0.5, e_3 = 0.7)$, $(e_2 = 0.5, e_3 = 0.8)$, $(e_2 = 0.5, e_3 = 0.9)$ κτλ. αφού και αυτά θα είναι θα οδηγούν και πάλι σε λύσεις εκτός του εφικτού χώρου. Η λογική είναι

η μεταφορά προς έλεγχο εφικτότητας στο επόμενο εξωτερικό σημείο του πλέγματος το οποίο στην προκειμένη είναι το ($e_2 = 0.5 + 0.1 = 0.6, e_3 = 0$). Για παράδειγμα έστω η συνέχεια του προβλήματος που εξετάστηκε παραπάνω, κατά την οποία το πρόβλημα εμφανίζει στη θέση πλέγματος θ_3 αδύνατη λύση. Ως θέση θ_3 θεωρείται η εξής:

Πίνακας 4-11: Θέση πλέγματος θ_3 που αντιστοιχεί σε αδύνατη λύση

| Βρόγχος- Αντικειμενική Συνάρτηση | Σημεία πλέγματος |
|--|------------------------|
| 1 ^{ος} (πιο εσωτερικός) βρόγχος (αντιστοίχιση με f_2) | 0 1 2 3 4 5 6 7 |
| 2 ^{ος} (επόμενος εξωτερικός) βρόγχος (αντιστοίχιση με f_3) | 0 1 2 3 4 5 |
| 3 ^{ος} (δεύτερος πιο εξωτερικός) βρόγχος (αντιστοίχιση με f_4) | 0 1 2 3 |
| 4 ^{ος} (πιο εξωτερικός) βρόγχος (αντιστοίχιση με f_5) | 0 1 2 |

Σύμφωνα με την λογική της AUGMECON 2 η επόμενη θέση πλέγματος θα προκύψει με επαναφορά του μετρητή της θέσης πλέγματος του πιο εσωτερικού βρόγχου στην αρχική του θέση (σημείο «0») και με παράλληλη αύξηση του μετρητή του δεύτερου πιο εσωτερικού βρόγχου στην επόμενη θέση πλέγματος. Αυτό είναι λογικό καθότι ο αλγόριθμος γλιτώνει την εκτέλεση επόμενων σημείων πλέγματος του πιο εσωτερικού βρόγχου (στη προκειμένη των σημείων «6», «7») που είναι προφανές πως θα οδηγήσουν επίσης σε αδύνατες λύσεις, αφού αυτά θα βρίσκονται ακόμα πιο εξωτερικά του εφικτού χώρου. Ωστόσο είναι λογικό πως αδύνατες λύσεις θα προκύψουν για θέσεις που έπονται της θ_3 , όχι μόνο με αύξηση του μετρητή του πιο εμφωλευμένου βρόγχου, αλλά για αντίστοιχη αύξηση των μετρητών για κάθε έναν από τους βρόγχους του προβλήματος. Για παράδειγμα, ως αδύνατες λύσεις θα πρέπει να παρακαμφθούν επιπλέον, χωρίς να γίνει έλεγχος και επίλυση, οι λύσεις του Πίνακας 4-12.

Πίνακας 4-12: Θέσεις πλέγματος που αντιστοιχούν σε αδύνατη λύση και παραλείπονται από την AUGMECON - R

| A/A | Βρόγχος- Αντικειμενική Συνάρτηση | Σημεία πλέγματος |
|-----|--|------------------------|
| 1 | 1 ^{ος} (πιο εσωτερικός) βρόγχος (αντιστοίχιση με f_2) | 0 1 2 3 4 5 6 7 |
| | 2 ^{ος} (επόμενος εξωτερικός) βρόγχος (αντιστοίχιση με f_3) | 0 1 2 3 4 5 |
| | 3 ^{ος} (δεύτερος πιο εξωτερικός) βρόγχος (αντιστοίχιση με f_4) | 0 1 2 3 |
| | 4 ^{ος} (πιο εξωτερικός) βρόγχος (αντιστοίχιση με f_5) | 0 1 2 |
| 2 | 1 ^{ος} (πιο εσωτερικός) βρόγχος (αντιστοίχιση με f_2) | 0 1 2 3 4 5 6 7 |

| | |
|--|-------------|
| 2 ^{ος} (επόμενος εξωτερικός) βρόγχος (αντιστοίχιση με f_3) | 0 1 2 3 4 5 |
| 3 ^{ος} (δεύτερος πιο εξωτερικός) βρόγχος (αντιστοίχιση με f_4) | 0 1 2 3 |
| 4 ^{ος} (πιο εξωτερικός) βρόγχος (αντιστοίχιση με f_5) | 0 1 2 |

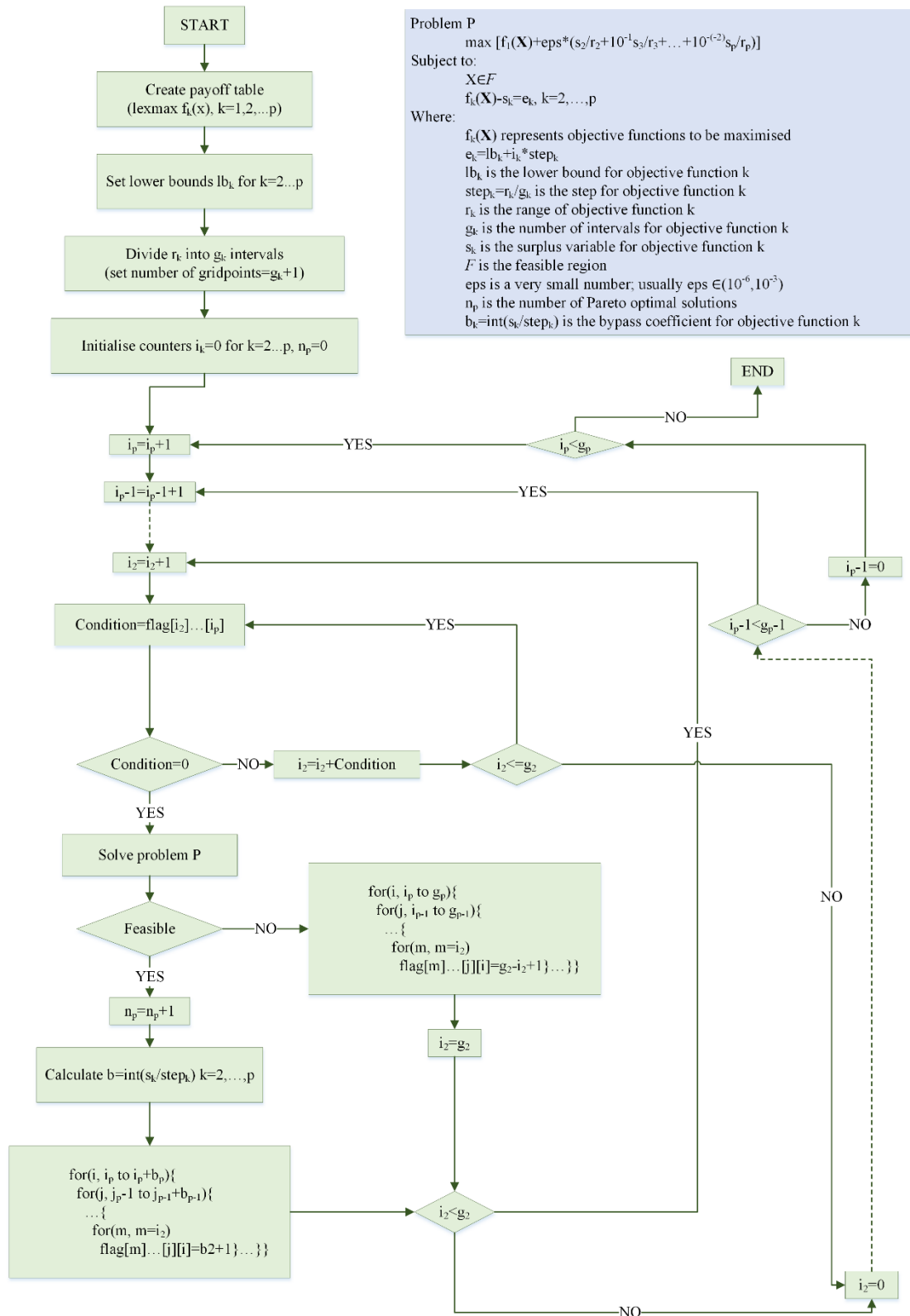
Οι λύσεις του Πίνακα 4-12 βρίσκονται εξωτερικότερα στο πλέγμα της λύσης της θέσης θ_3 , (αυτό που συμβαίνει με άλλα λόγια είναι ότι αυξάνεται το δεξί μέλος των περιορισμών των αντίστοιχων συναρτήσεων). Δεδομένου ότι η λύση της θ_3 θεωρήθηκε αδύνατη, οι δύο λύσεις του πίνακα είναι και αυτές αδύνατες. Η AUGMECON – R εισάγει κατάλληλη μεθοδολογία η οποία εντοπίζει αδύνατες λύσεις της μορφής του παραπάνω πίνακα, και σε αντίθεση με την AUGMECON 2, αποφεύγει τις αντίστοιχες περιττές βελτιστοποιήσεις. Η μη εκτέλεση των περιττών επαναλήψεων πραγματοποιείται και πάλι με χρήση του πίνακα *flag*. Σε συνέχεια των προηγούμενων, εξετάζεται η γενική μορφή των βημάτων που ακολουθεί ο αλγόριθμος της AUGMECON – R για πρόβλημα πέντε αντικειμενικών συναρτήσεων.

1. Η τρέχουσα επανάληψη θεωρείται η θέση i^*, j^*, r^*, v^* .
2. Στη συνέχεια γίνεται έλεγχος της τιμής του πίνακα *flag* για τη συγκεκριμένη θέση.
3. Αν η τιμή είναι $flag[i^*][j^*][r^*][v^*] = 0$ εκτελείται η βελτιστοποίηση, αλλιώς η βελτιστοποίηση παρακάμπτεται.
4. Από η βελτιστοποίηση οδηγεί σε αδύνατη λύση ενημερώνεται το περιεχόμενο του πίνακα *flag* σε συγκεκριμένες θέσεις. Το ανανεωμένο περιεχόμενο θα δηλώνει τις θέσε
5. Στη συνέχεια ενημερώνεται το περιεχόμενο συγκεκριμένων θέσεων του πίνακα *flag*. Ο προσδιορισμός των θέσεων που θα ενημερωθούν προσδιορίζεται από τις τιμές των συντελεστών παράκαμψης των βρόγχων επανάληψης, πλην του εσωτερικού (δηλαδή στην προκειμένη των b_3, b_4, b_5). Οι προς ενημέρωση θέσεις του πίνακα *flag* λαμβάνουν την τιμή του συντελεστή παράκαμψης του πιο εσωτερικού βρόγχου (προσαυξημένη κατά μία μονάδα), όπως προκύπτει από την βελτιστοποίηση για τη συγκεκριμένη θέση πλέγματος, σύμφωνα με την παρακάτω επαναληπτική υλοποίηση:

```
for( $v, v^*$  to  $v + b_5$ )
{
  for( $r, r^*$  to  $r^* + b_4$ )
  {
    for( $j, j^*$  to  $j^* + b_3$ )
    {
      for( $i, i^*$  to  $i^*$ )
      flag[ $i$ ][ $j$ ][ $r$ ][ $v$ ]
      =  $b_2 + 1$ ;
    }
  }
}
```

(5.2)

4.5 Αλγοριθμική υλοποίηση της AUGMECON - R



Σχήμα 4-1: Διάγραμμα ροής AUGMECON - R

Παρακάτω παρουσιάζεται ο κώδικας της AUGMECON - R ο οποίος έχει αναπτυχθεί στο προγραμματιστικό περιβάλλον GAMS και ο οποίος στηρίχθηκε στον ήδη υπάρχοντα κώδικα της AUGMECON 2. Ο κώδικας, χωρίς βλάβη γενικότητας, θεωρείται ότι αφορά ένα πρόβλημα MIP (knapsack) με πέντε αντικειμενικές συναρτήσεις, πέντε περιορισμούς και δέκα μεταβλητές απόφασης. Επισημαίνεται ότι οι γραμμές του κώδικα που ξεκινούν με το σύμβολο «*» δεν αντιστοιχούν σε εκτελέσιμες εντολές, αλλά σε σχόλια. Ο κώδικας έχει διαιρεθεί σε τμήματα προκειμένου να επεξηγηθούν ευκολότερα τα βασικά του σημεία. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στις προσθήκες της AUGMECON - R σε σύγκριση με την AUGMECON 2.

Αρχικά ορίζονται τα βασικά στοιχεία του προβλήματος και οι ιδιότητές τους, δηλαδή δίνονται οι παράμετροι, οι μεταβλητές απόφασης, οι αντικειμενικές συναρτήσεις και οι περιορισμοί του προβλήματος.

Set

```
I 'constraints' / i1* i5 /
J 'decision variables' / j1*j10 /
K 'objective functions' / k1* k5 /
;
```

Parameter

```
dir(k) 'direction of the objective functions 1 for max and -1 for min' / k1 1, k2 1, k3 1, k4 1, k5
1 /
b(I) 'RHS of the constraints' / i1 220, i2 175 , i3 215, i4 150, i5 190/;
```

Table c(J,K) 'matrix of objective function coefficients C'

| | k1 | k2 | k3 | k4 | k5 |
|----|----|----|----|----|----|
| j1 | 14 | 17 | 17 | 28 | 27 |
| j2 | 43 | 11 | 32 | 15 | 32 |
| j3 | 26 | 26 | 18 | 29 | 27 |
| j4 | 24 | 22 | 42 | 34 | 21 |
| j5 | 25 | 29 | 13 | 42 | 25 |
| j6 | 31 | 39 | 17 | 42 | 41 |
| j7 | 36 | 41 | 47 | 37 | 27 |

```

j8  29  50  15  31  50
j9  45  47  17  17  36
j10 45  50  20  47  39
;
Table a(J,I) 'matrix of technological coefficients A'
      i1  i2  i3  i4  i5
j1  29  38  47  29  36
j2  29  47  45  40  48
j3  35  41  23  23  11
j4  46  33  13  45  23
j5  14  35  42  14  27
j6  46  41  19  33  34
j7  30  46  22  21  21
j8  16  36  28  50  43
j9  23  13  18  50  46
j10 29  16  39  13  45
;

Variable
Z(K) 'objective function variables'
X(J) 'decision variables';

Binary Variable X;

Equations
objfun(K)  objective functions
con(I)     constraints
;
objfun(K).. sum(J,c(J,K)*X(J)) =e= Z(K);
con(I).. sum(J, a(J,I)*X(J)) =l= b(I);
Model example / all /;

```

Στη συνέχεια διαμορφώνονται κατάλληλα οι εξισώσεις (αντικειμενική συνάρτηση και περιορισμοί) ώστε να ικανοποιούνται οι σχέσεις που περιγράφονται από το μοντέλο της AUGMECON 2, το οποίο ενδεικτικά απαιτεί οι επιπλέον συναρτήσεις να τεθούν ως περιορισμοί, την κατάλληλη διαμόρφωση των περιορισμών των αντικειμενικών συναρτήσεων και την κατάλληλη διαμόρφωση της αντικειμενικής συνάρτησης στην οποία πλέον εισάγονται και οι μεταβλητές απόκλισης.

STitle eps-constraint method

Set k1(k) the first element of k, km1(k) all but the first elements of k;

k1(k)\$(ord(k)=1) = **yes**; km1(k)=**yes**; km1(k1) = **no**;

Set kk(k) active objective function in constraint allobj ;

Parameter

rhs(k) right hand side of the constrained obj functions in eps-constraint

maxobj(k) maximum value from the payoff table

minobj(k) minimum value from the payoff table

numk(k) ordinal value of k starting with 1 ;

Scalar

iter total number of iterations

infeas total number of infeasibilities

elapsed_time elapsed time for payoff and e-sonstraint

start start time

finish finish time ;

Variables

a_objval auxiliary variable for the objective function

obj auxiliary variable during the construction of the payoff table ;

Positive Variables

sl(k) slack or surplus variables for the eps-constraints ;

Equations

con_obj(k) constrained objective functions

augm_obj augmented objective function to avoid weakly efficient solutions

allobj all the objective functions in one expression;

con_obj(km1).. z(km1) - dir(km1)*sl(km1) =e= rhs(km1);

** We optimize the first objective function and put the others as constraints*

** the second term is for avoiding weakly efficient points*

** objfun=max z1 + 0.001*(s1/r1+0.1 s2/r2+ 0.01*s3/r3+...)*

augm_obj..

sum(k1,dir(k1)*z(k1))+1.0e-3***sum**(km1,power(10,-(numk(km1)-1))*sl(km1)/(maxobj(km1)-minobj(km1))) =e= a_objval;

```
allobj.. sum(kk, dir(kk)*z(kk)) =e= obj;
$
Model mod_payoff / example, allobj / ;
Model mod_epsmethod / example, con_obj, augm_obj / ;
```

Σαν επόμενο βήμα υπολογίζεται ο πίνακας πληρωμών (payoff table). Επισημαίνεται ότι σε αντίθεση με την AUGMECON 2, η οποία ορίζει έναν ενιαίο αριθμό σημείων πλέγματος για όλες τις αντικειμενικές συναρτήσεις (συμμετρικό πλέγμα), η AUGMECON - R ορίζει διαφορετικό εύρος πλέγματος για κάθε αντικειμενική συνάρτηση (το οποίο στην προκειμένη αντιστοιχεί στις μεταβλητές gridpoints_1 ... gridpoints_4). Η AUGMECON 2 χρησιμοποιεί το μέγιστο εύρος των αντικειμενικών συναρτήσεων για να ορίσει το μέγεθος του πλέγματος και να το αντιστοιχίσει σε κάθε μια από τις αντικειμενικές συναρτήσεις. Ο αλγόριθμος είναι κατάλληλα διαμορφωμένος ώστε στη συνέχεια με κατάλληλους ελέγχους να σταματάει τις επαναλήψεις για κάθε αντικειμενική συνάρτηση στα σημεία του πλέγματος που αντιστοιχούν στην μέγιστη τιμή της και να μην χρησιμοποιεί τα υπόλοιπα σημεία που αντιστοιχούν στο μέγιστο εύρος, παρά μόνο αν αυτά είναι απαραίτητα για να εξασφαλιστεί η μέγιστη τιμή. Επομένως η επιλογή του συμμετρικού πλέγματος στην AUGMECON 2 δεν επηρεάζει την επίλυση σε υπολογιστικό χρόνο. Ωστόσο, ο αλγόριθμος που προτείνεται από την AUGMECON - R τροποποιείται σε αυτό το σημείο δεδομένου πως, λόγω της εισαγωγής της μεταβλητής «σημαίας-flag», η επιλογή συμμετρικού πλέγματος επιφέρει σημαντική αύξηση στις απαιτούμενες θέσεις μνήμης.

```
Parameter
  payoff(k,k) payoff tables entries;
Alias(k,kp);

option optcr=0.0;
option limrow=0, limcol=0, solprint=off ,solveLink = %solveLink.LoadLibrary%;
;
$offlisting;
$offsymxref;
$offsymlist;
$offuelxref;
```

```

$offuellist;
*file cplexopt /cplex.opt/;
*put cplexopt;
*put 'threads 4'/;
*put 'parallelmode 1'/;
*putclose cplexopt;
*mod_epsmethod.optfile=1;
*option optca=0.;
*mod_payoff.optfile=1;
*mod_epsmethod.optfile=1;

* Generate payoff table applying lexicographic optimization
loop(kp,
  kk(kp)=yes;
  repeat
    solve mod_payoff using mip maximizing obj;
    payoff(kp,kk) = z.l(kk);
    z.fx(kk) = z.l(kk);
    kk(k++1) = kk(k);
  until kk(kp); kk(kp) = no;
  * release the fixed values of the objective functions for the new iteration
  z.up(k) = inf; z.lo(k) = -inf;
);
if (mod_payoff.modelstat<>1 and mod_payoff.modelstat<>8, abort 'no optimal solution for
mod_payoff');

File fx / 5kp10.txt /;

PUT fx ' PAYOFF TABLE' / ;
loop (kp,
  loop(k, put payoff(kp,k):12:2);
  put /;
);
put fx /;

*display payoff;
minobj(k)=floor(0.95*smin(kp,payoff(kp,k)));
**$ontext
maxobj(k)=smax(kp,payoff(kp,k));

```



```

*$ontext
*$set fname h.%scrcxt.dat%
*gridpoints=max integer of km1 = 4149

$if not set gridpoints_1 $set gridpoints_1 307
$if not set gridpoints_2 $set gridpoints_2 232
$if not set gridpoints_3 $set gridpoints_3 242
$if not set gridpoints_4 $set gridpoints_4 183
Set g grid points /g0*g%gridpoints_1%/
  grid(k,g) 'grid '
  q /q0*q%gridpoints_1%/
  r /r0*r%gridpoints_2%/
  s /s0*s%gridpoints_3 %/
  t /t0*t%gridpoints_4 %/

;

```

Στη συνέχεια καλείται από τον πίνακα «σημαίας – flag» η τιμή που αντιστοιχεί στο τρέχον σημείο του πλέγματος και μέσω της μεταβλητής «synthiki» ελέγχεται αν θα πραγματοποιηθεί η βελτιστοποίηση (μηδενική τιμή) ή όχι. Για την εκτέλεση της παραπάνω διαδικασίας ορίζονται δύο επιπλέον μετρητές, με τον συμβολισμό *current i* και *terminal i* αντίστοιχα, από τους οποίους ο πρώτος αναφέρεται στις τρέχουσες τιμές των θέσεων πάνω στο πλέγμα για την εκάστοτε αντικειμενική *i*, και ο δεύτερος στο τελευταίο σημείο της αντικειμενικής *i* πάνω στο πλέγμα.

Parameter

```

gridrhs(k,g)
maxg(k) maximum point in grid for objective k
posg(k) grid position of objective k
firstOffMax, lastZero, current1, current2, current3, current4, synthiki, b2, b3, b4, b5,
terminal1, terminal2, terminal3, terminal4, control1, control2 some counters
* numk(k) ordinal value of k starting with 1
numg(g) 'ordinal value of g starting with 0 '
step(k) step of grid points in objective functions
jump(k) jumps in the grid points' traversing only for the first objective function
numq(q) ordinal value of q starting with 0
numr(r) ordinal value of r starting with 0

```

```

nums(s) ordinal value of s starting with 0
numt(t) ordinal value of t starting with 0
flag(q,r,s,t) optimization control matrix
;

lastZero=1; loop(km1, numk(km1)=lastZero; lastZero=lastZero+1); numg(g) = ord(g)-1;
numq(q) = ord(q)-1;
numr(r) = ord(r)-1;
nums(s) = ord(s)-1;
numt(t) = ord(t)-1;
*initialization of flag matrix
loop(q,
    loop(r,
        loop(s,
            loop(t,flag(q,r,s,t)=0);)););

grid(km1,g) = yes;
maxg(k)=(maxobj(k)-minobj(k));
step(km1) = 1 ;
gridrhs(grid(km1,g))$(dir(km1)=-1) = maxobj(km1) - numg(g)/maxg(km1)*(maxobj(km1)-
minobj(km1));
gridrhs(grid(km1,g))$(dir(km1)=1) = minobj(km1) + numg(g)*step(km1);
*display gridrhs;

PUT fx 'Grid points'/ ;
loop (g,
    loop(km1, put gridrhs(km1,g):12:2);
    put /; );
put fx /;
put fx 'Efficient solutions'/;

* Walk the grid points and take shortcuts if the model becomes infeasible
posg(km1) = 0;
iter=0;
infeas=0;
terminal1=0;
terminal2=0;
terminal3=0;
terminal4=0;

```

```

terminal1=sum(km1$(numk(km1)=1),maxg(km1));
terminal2=sum(km1$(numk(km1)=2),maxg(km1));
terminal3=sum(km1$(numk(km1)=3),maxg(km1));
terminal4=sum(km1$(numk(km1)=4),maxg(km1));
synthiki=0;
control1=0;
start=jnow;

repeat
rhs(km1) = sum(grid(km1,g$(numg(g)=posg(km1)), gridrhs(km1,g));
current1=0;
current2=0;
current3=0;
current4=0;
current1=sum(km1$(numk(km1)=1),posg(km1)) ;
current2=sum(km1$(numk(km1)=2),posg(km1)) ;
current3=sum(km1$(numk(km1)=3),posg(km1)) ;
current4=sum(km1$(numk(km1)=4),posg(km1)) ;

loop(q$(numq(q)= current1),
  loop(r$(numr(r)=current2),
    loop(s$(nums(s)=current3),
      loop(t$(numt(t)=current4), synthiki=flag(q,r,s,t));)););
if(synthiki=0, solve mod_epsmethod maximizing a_objval using mip);
iter=iter+1;

```

Σε περίπτωση που το μοντέλο καταλήγει σε αδύνατη λύση, και προκειμένου να παρακαμφθούν οι επόμενες βελτιστοποιήσεις που οδηγούν κατά κανόνα με τη σειρά τους σε αδύνατες λύσεις, και επομένως να βελτιωθεί η απόδοση του αλγορίθμου, εκτελείται το παρακάτω τμήμα κώδικα. Συγκεκριμένα, ενημερώνονται κατάλληλα οι τιμές του πίνακα “flag”, με την εκχώρηση της τιμής «terminal1-current1+1». Με αυτόν τον τρόπο, αν οποιοδήποτε επόμενο τρέξιμο καταλήξει στη συγκεκριμένη θέση, ο έλεγχος θα καλέσει την εν λόγω τιμή και ο αλγόριθμος θα εξαναγκαστεί να συνεχίσει στην επόμενη, εφικτή, βελτιστοποίηση, παρακάμπτοντας τις αδύνατες λύσεις.

```

if (synthiki=0 and mod_epsmethod.modelstat<>1 and mod_epsmethod.modelstat<>8,
    infeas=infeas+1;
    put fx iter:5:0, ' infeasible'/;
    lastZero = 0; loop(km1$(posg(km1)>0 and lastZero=0), lastZero=numk(km1));
    posg(km1)$(numk(km1)<=lastZero) = maxg(km1);
    loop(t$(numt(t)>=current4 and numt(t)<=terminal4),
        loop(s$(nums(s)>=current3 and nums(s)<= terminal3),
            loop(r$(numr(r)>=current2 and numr(r)<= terminal2),
                loop(q$(numq(q)=current1), flag(q,r,s,t)= terminal1-current1+1);));););

```

Σε περίπτωση που η βελτιστοποίηση καταλήξει σε εφικτή λύση, ο πίνακας «flag» ενημερώνεται με τις τιμές που καθορίζονται από τις μεταβλητές απόκλισης της αντίστοιχης βελτιστοποίησης.

```

else if(synthiki=0 ,
    put fx iter:5:0;
    loop(k, put fx z.l(k):12:2);
    put fx ' *** ';
    loop(km1, put fx sl.l(km1):12:2, put fx posg(km1):6:0);
    put fx ' *** ';
    loop(km1$(numk(km1)=1),b2=floor(sl.l(km1)/step(km1)));
    loop(km1$(numk(km1)=2),b3=floor(sl.l(km1)/step(km1)));
    loop(km1$(numk(km1)=3),b4=floor(sl.l(km1)/step(km1)));
    loop(km1$(numk(km1)=4),b5=floor(sl.l(km1)/step(km1)));
    loop(t$(numt(t)>=current4 and numt(t)<= current4+b5),
        loop(s$(nums(s)>=current3 and nums(s)<= current3+b4),
            loop(r$(numr(r)>=current2 and numr(r)<= current2+b3),
                loop(q$(numq(q)=current1) , flag(q,r,s,t)=b2+1);)););

    jump(km1)=1;

    put fx ' * ';
    jump(km1)$(numk(km1)=1)=1+floor(sl.L(km1)/step(km1));
    loop(km1, put fx jump(km1):5:0) ;
    loop(km1$(jump(km1)> 1), put ' jump')
    put /;
);

```

```
);  
  
jump(km1)$(numk(km1)>1)=1 ;
```

Το επόμενο τμήμα κώδικα αφορά τους ελέγχους που γίνονται κάθε φορά που απαιτείται να εξεταστεί η επόμενη θέση πλέγματος. Σε αυτό υπάρχουν τέσσερεις πιθανές καταστάσεις:

- 1) Έγινε βελτιστοποίηση -οπότε synthiki=0- και το αποτέλεσμα ήταν μια εφικτή λύση
- 2) Έγινε βελτιστοποίηση -οπότε synthiki=0- και το αποτέλεσμα ήταν μια αδύνατη λύση
- 3) Δεν έγινε βελτιστοποίηση -οπότε synthiki>0- και η τιμή της αντίστοιχης θέσης του πίνακα flag αντιστοιχεί σε προηγούμενη αδύνατη λύση
- 4) Δεν έγινε βελτιστοποίηση -οπότε synthiki>0- και η τιμή της αντίστοιχης θέσης του πίνακα flag αντιστοιχεί σε προηγούμενη γνήσια βελτιστοποίηση

```
* Proceed forward in the grid  
  
control1=0;  
firstOffMax = 0;  
loop(km1$(posg(km1)<maxg(km1) and firstOffMax=0 and numk(km1)=1 and  
synthiki>0),control2=posg(km1)+synthiki;posg(km1)=min(posg(km1)+synthiki,maxg(km1));  
firstOffMax=numk(km1) );  
loop(km1$(posg(km1)=maxg(km1) and numk(km1)=1 and synthiki>0 and firstOffMax>0  
and control2>maxg(km1)), control1=1);  
loop(km1$(posg(km1)<maxg(km1) and firstOffMax=0 and numk(km1)=1 and synthiki=0),  
posg(km1)=min((posg(km1)+jump(km1)),maxg(km1)); firstOffMax=numk(km1));  
loop(km1$(posg(km1)<maxg(km1) and firstOffMax=0 and numk(km1)>1),  
posg(km1)=min((posg(km1)+jump(km1)),maxg(km1)); firstOffMax=numk(km1));  
  
loop(km1$(posg(km1)<maxg(km1) and control1>0 and numk(km1)>1),  
posg(km1)=min((posg(km1)+jump(km1)),maxg(km1)); firstOffMax=numk(km1);  
control1=0);  
  
posg(km1)$(numk(km1)<firstOffMax) = 0 ;
```

```
until sum(km1$(posg(km1)=maxg(km1)),1)= card(km1) and firstOffMax=0;
finish=jnow;
elapsed_time=(finish-start)*86400;
put /;
put 'Infeasibilities = ', infeas:5:0 /;
put 'Elapsed time: ',elapsed_time:10:2, ' seconds' /;
*$offtext
putclose fx;
**$offtext
```

4.6 Συγκριτική ανάλυση μεθόδων AUGMECON – 2 & AUGMECON – R

Σε αυτήν την ενότητα, χρησιμοποιείται η μέθοδος AUGMECON-R για την επίλυση ενός συνόλου προβλημάτων πολυστοχικής βελτιστοποίησης προκειμένου να συγκριθεί η απόδοσή της με την απόδοση της AUGMECON 2. Αρχικά, επιλύονται ενδεικτικά προβλήματα που παρουσιάζονται και συζητούνται από τους Manrotas & Florios (2013), τα οποία λειτουργούν ως προβλήματα αναφοράς, ακολουθούμενα από μια σειρά περισσότερο απαιτητικών προβλημάτων όσον αφορά τον αριθμό των αντικειμενικών συναρτήσεων και του συνολικού τους μεγέθους. Για τα τελευταία, έγινε επιπλέον επίλυση με την μέθοδο AUGMECON 2 ώστε να επιτευχθεί η μεταξύ τους συγκριτική ανάλυση.

Όλα τα προβλήματα που παρουσιάζονται στην παρούσα ενότητα επιλύθηκαν στο περιβάλλον GAMS 23.5 χρησιμοποιώντας CPLEX 12.2, λειτουργικό σύστημα Windows 10 64-bit, επεξεργαστή i5-6400 2.7 GHz και 8GB RAM.

4.6.1 Συγκριτική ανάλυση επί των προβλημάτων αναφοράς

Δεδομένου ότι η μέθοδος AUGMECON – R σχεδιάστηκε ως μια βελτιωμένη έκδοση της AUGMECON 2, προκειμένου να συγκριθούν οι δύο μέθοδοι και να αξιολογηθεί η υπεροχή της AUGMECON – R, χρησιμοποιήθηκαν ως προβλήματα αναφοράς τα προβλήματα τύπου 3kpY, τα οποία προτάθηκαν από τους Manrotas & Florios (2013) για την αξιολόγηση μεταξύ των AUGMECON 2 και AUGMECON. Συγκεκριμένα, εξετάστηκαν τα προβλήματα 3kp100, 3kp50, 3kp40, δηλαδή

επιλεγμένα προβλήματα σακιδίου τριών αντικειμενικών συναρτήσεων, τριών περιορισμών και 100, 50 και 40 μεταβλητών απόφασης αντίστοιχα. Τα προβλήματα 2kpY που χρησιμοποιήθηκαν στην ίδια μελέτη δεν ελήφθησαν υπόψη καθώς, με βάση το προτεινόμενο μοντέλο που περιγράφεται στην Ενότητα 4.3, το μοντέλο της AUGMECON-R είναι πανομοιότυπο με αυτό της AUGMECON2 όταν αφορά μόνο δύο αντικειμενικές συναρτήσεις.

Θα πρέπει επίσης να σημειωθεί ότι, στη μελέτη των Mavrotas & Florios (2013) δεν χρησιμοποιήθηκε ο αρχικά προτεινόμενος αλγόριθμος της AUGMECON 2, αλλά μια τροποποιημένη έκδοση του κώδικα, η οποία αποφεύγει αυθαίρετα ορισμένες βελτιστοποιήσεις στα αρχικά στάδια, τόσο στον πιο εσωτερικό βρόχο όσο και στον εξωτερικό βρόχο. Αυτό είναι αξιοσημείωτο καθώς, αν και η χρήση αυτής της τροποποίησης δεν αλλάζει σημαντικά την απόδοση της μεθόδου, στην παρούσα διατριβή η απόδοση της AUGMECON-R συγκρίνεται με τον αρχικό αλγόριθμο AUGMECON 2 και όχι κατά της ειδικά διαμορφωμένης για τα πλαίσια της δημοσίευσης τροποποίησης. Ο παρακάτω πίνακας συνοψίζει την απόδοση μεταξύ των δύο αλγορίθμων, όσον αφορά τον απαιτούμενο χρόνο εκτέλεσης (CPU), τα σημεία πλέγματος ανά αντικειμενική συνάρτηση, τα συνολικά μοντέλα που επιλύθηκαν, τον αριθμό των προκύπτοντων αδύνατων λύσεων, τον αριθμό των μοντέλων που επιλύθηκαν δίνοντας τις ίδιες λύσεις («διπλότυπες λύσεις»), τις κυριαρχούμενες λύσεις και τις λύσεις που ανήκουν στο μέτωπο Pareto.

Πίνακας 4-13: Σύγκριση απόδοσης μεταξύ των AUGMECON 2 (AUGM 2) και AUGMECON-R (AUGM-R) για προβλήματα τύπου 3kpY.

| | 3kp100 | | 3kp50 | | 3kp40 | |
|--|--------|---------|---------|---------|--------|---------|
| | AUGM 2 | AUGM-R | AUGM 2 | AUGM-R | AUGM 2 | AUGM-R |
| Χρόνος CPU | 23 h | 268 min | 113 min | 695 sec | 42 min | 220 sec |
| Σημεία πλέγματος ανά αντικειμενική συνάρτηση | 1236 | 1236 | 846 | 846 | 540 | 540 |
| Αριθμός προς επίλυση μοντέλων | 103652 | 11727 | 25245 | 1951 | 11098 | 746 |
| Αδύνατες λύσεις | 1093 | 137 | 564 | 78 | 420 | 34 |
| Διπλότυπες λύσεις | 96020 | 5071 | 23630 | 823 | 10287 | 321 |
| Κυριαρχούμενες λύσεις | 39 | 19 | 3 | 2 | 2 | 2 |
| Λύσεις που ανήκουν στο μέτωπο Pareto | 6500 | 6500 | 1048 | 1048 | 389 | 389 |

Τα αποτελέσματα υποδεικνύουν ότι, για τον ίδιο αριθμό λύσεων στο μέτωπο Pareto, η μέθοδος AUGMECON-R είναι σημαντικά γρηγορότερη γεγονός που

έρχεται ως επακόλουθο της επίλυσης σημαντικά λιγότερων μοντέλων, οδηγώντας σε σημαντικά λιγότερες αδύνατες και διπλότυπες λύσεις. Για να αντισταθμιστεί η πιθανή τυχαιότητα στους χρόνους της CPU λόγω των ενδεχόμενων διαφορετικών επιπέδων διαθεσιμότητας της λόγω παράλληλων εργασιών, οι χρόνοι CPU που παρουσιάζονται είναι οι μέσοι χρόνοι που προκύπτουν μετά από μια σειρά εκτελέσεων μοντέλου, έτσι ώστε η σύγκριση να μπορεί να θεωρηθεί αμερόληπτη και αντιπροσωπευτική. Αυτός είναι επίσης ο λόγος που ο αριθμός των μοντέλων που επιλύθηκαν επισημαίνεται ως μετρική σύγκρισης, υποδεικνύοντας παρόμοιες αναλογίες. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι οι διαφορές στους χρόνους της CPU και στα μοντέλα που επιλύθηκαν μπορούν να αποδοθούν στον χρόνο που χρειάζεται το AUGMECON-R για να εκτελέσει τους ελέγχους συνθηκών παράκαμψης. Επιπλέον, οι διαφορές των λόγων αποδοτικότητας του αλγορίθμου μεταξύ των τριών προβλημάτων μπορούν να αποδοθούν στη διαφορετική πυκνότητα των προβλημάτων, δηλαδή στην αναλογία του αριθμού των λύσεων που περιλαμβάνονται στο μέτωπο Pareto προς τον αριθμό των μοντέλων που επιλύθηκαν: όσο πιο πυκνό είναι το πρόβλημα, τόσο μικρότερη είναι η διαφορά στην επίδοση του χρόνου μεταξύ των δύο αλγορίθμων, καθώς αποφεύγονται λιγότερες επαναλήψεις στους βρόχους έξω από τον πιο εσωτερικό βρόχο.

Πίνακας 4-14: Σύγκριση λόγων απόδοσης της AUGMECON 2 έναντι της AUGMECON-R για τα προβλήματα 3kpY

| Πρόβλημα | Λόγος χρόνων CPU | Λόγος επιλυόμενων μοντέλων | Λόγος αδύνατων λύσεων | Λόγος διπλότυπων λύσεων |
|----------|------------------|----------------------------|-----------------------|-------------------------|
| 3kp100 | 5.15 | 8.84 | 7.98 | 18.93 |
| 3kp50 | 9.75 | 12.94 | 7.23 | 28.71 |
| 3kp40 | 11.45 | 14.88 | 12.35 | 32.05 |

Προκειμένου να γίνει ξεκάθαρη η βελτιωμένη απόδοση της AUGMECON-R έναντι της AUGMECON 2, η αυθαίρετη επιλογή των κάτω ορίων χαλαρώνει και επιλέγεται ένας μειωτικός συντελεστής ο οποίος μεγιστοποιεί την πιθανότητα να συμπεριληφθούν τα πραγματικά σημεία ναδίρ στην ανάλυση και να διασφαλιστεί ότι δεν θα χαθεί καμία λύση. Έτσι, αντί να πολλαπλασιαστούν οι τιμές ναδίρ των πινάκων πληρωμών κατά 95%, όπως συνέβη στα παραπάνω προβλήματα, επαναλαμβάνεται η ανάλυση για αυτά τα τρία προβλήματα, πολλαπλασιάζοντας

τις τιμές ναδίρ κατά 5%, οδηγώντας σε ένα εμφατικά μεγαλύτερο πλέγμα, προκειμένου να αξιολογηθεί πώς αυτό επηρεάζει την απόδοση της σύγκρισης των δύο αλγορίθμων

Πίνακας 4-15: Σύγκριση απόδοσης μεταξύ των AUGMECON 2 (AUGM 2) και AUGMECON-R (AUGM-R) για προβλήματα τύπου 3kpY και μεγαλύτερο μέγεθος πλέγματος

| | 3kp100* | | 3kp50* | | 3kp40* | |
|--|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| | AUGM 2 | AUGM-R | AUGM 2 | AUGM-R | AUGM 2 | AUGM-R |
| Χρόνος CPU | 62 h | 274 min | 230 min | 737 sec | 130 min | 234 sec |
| Σημεία πλέγματος ανά αντικειμενική συνάρτηση | 3940 | 3940 | 1880 | 1880 | 1560 | 1560 |
| Αριθμός προς επίλυση μοντέλων | 417809 | 11768 | 61442 | 1953 | 39648 | 748 |
| Αδύνατες λύσεις | 1093 | 137 | 564 | 78 | 420 | 34 |
| Διπλότυπες λύσεις | 410138 | 5090 | 59827 | 825 | 38836 | 322 |
| Κυριαρχούμενες λύσεις | 78 | 41 | 3 | 2 | 3 | 3 |
| Λύσεις που ανήκουν στο μέτωπο Pareto | 6500 | 6500 | 1048 | 1048 | 389 | 389 |

Από τον Πίνακας 4-15 γίνεται πλέον εμφανής η διαφορά των δύο αλγορίθμων και η ανωτερότητα του αλγορίθμου της AUGMECON – R. Στην προκειμένη περίπτωση, όπου το μέγεθος του πλέγματος λόγω των σημαντικά χαμηλότερων ορίων είναι σαφώς μεγαλύτερο, είναι πλέον πιο έντονα τα πλεονεκτήματα της μεθόδου AUGMECON – R. Συγκεκριμένα, αξίζει να σημειωθεί ότι η τροποποίηση στο μέγεθος του πλέγματος του προβλήματος οδήγησε σε αύξηση του χρόνου της CPU μόλις κατά 2,24%, 6,00% και 6,40 % για την AUGMECON-R, ενώ το ίδιο μέγεθος αυξήθηκε κατά 170,00%, 103,50% και 209,52% για την AUGMECON 2 και για τα 3kp100, 3kp50 και 3kp40 αντίστοιχα. Οι εν λόγω υπολογισμοί γίνονται λαμβάνοντας υπόψη τα μεγέθη των πινάκων Πίνακας 4-14 και Πίνακας 4-15. Αντίστοιχες παρατηρήσεις λαμβάνονται για όλες τις υπόλοιπες σχετικές μετρήσεις, για παράδειγμα, τα πρόσθετα μοντέλα που επιλύθηκαν από την AUGMECON R (μετρική «αριθμός προς επίλυση μοντέλων») είναι αμελητέα (41, 2 και 2) και για τα τρία προβλήματα, ωστόσο δεν παρατηρείται το ίδιο για την περίπτωση της AUGMECON-2 (314157, 36197 και 28550 αντίστοιχα).

4.6.2 Συγκριτική ανάλυση σύνθετων προβλημάτων πολυστοχικής βελτιστοποίησης

Στη συγκεκριμένη ενότητα εφαρμόζονται οι αλγόριθμοι της AUGMECON 2 και AUGMECON – R σε προβλήματα με περισσότερες από τρεις αντικειμενικές

συναρτήσεις. Σε αυτό το σημείο υπενθυμίζεται η διάκριση μεταξύ των μη συσχετισμένων προβλημάτων (uncorrelated) και των ασθενώς συσχετισμένων προβλημάτων (weakly correlated): τα μη συσχετισμένα προβλήματα υποθέτουν ότι δεν υπάρχει συσχέτιση μεταξύ των στοιχείων των μητρών των αντικειμενικών συναρτήσεων και των περιορισμών, ενώ τα ασθενώς συσχετισμένα προβλήματα υποθέτουν μια ασθενή μεταξύ αυτών των στοιχείων. Αυτή η ασθενής συσχέτιση καθιστά την επίλυσή τους σημαντικά πιο δύσκολη, καθώς ο επιλύτης απαιτεί αυξημένους πόρους από άποψη χρόνου, και δεδομένων των αυξημένων απαιτήσεων χρόνου για την επίλυση τέτοιων προβλημάτων από την AUGMECON 2, η παρούσα μελέτη εστιάζει σε μη συσχετισμένα προβλήματα. Τα προς εξέταση προβλήματα είναι τα εξής:

- Ένα πρόβλημα 4kp40, με τα πραγματικά σημεία ναδέρ των τριών αντικειμενικών συναρτήσεων να ισούνται με 155, 119 και 121 και τα αντίστοιχα εύρη των αντικειμενικών συναρτήσεων με 123, 127 και 140.
- Ένα πρόβλημα 4kp40*, το οποίο είναι πανομοιότυπο με το πρόβλημα 4kp40, με τη διαφορά ότι σε αυτή την περίπτωση θεωρείται ότι δεν υπάρχει εκ των προτέρων γνώση των σημείων ναδέρ. Ως εκ τούτου για την επίλυση του προβλήματος πρέπει να γίνει επιλογή των κατώτατων ορίων της κάθε συνάρτησης, τα οποία, προκειμένου να διασφαλιστεί ότι δε θα χαθεί κάποια λύση επιλέγονται να είναι σημαντικά χαμηλότερα και ίσα με 15, 11 και 13. Τα αντίστοιχα εύρη διαμορφώνονται σε 263, 235 και 248.
- Ένα δυαδικό πρόβλημα 4kp50, με τους συντελεστές αντικειμενικής συνάρτησης να υπολογίζονται από μια ομοιόμορφη κατανομή $U[0,1]$ και τους συντελεστές των περιορισμών από μία ομοιόμορφη κατανομή $U[50,70]$. Τα πραγματικά σημεία ναδέρ των αντικειμενικών συναρτήσεων θεωρούνται γνωστά και ίσα με 718, 735 και 713, ενώ τα αντίστοιχα εύρη ισούνται με 51, 35 και 44.
- Ένα δυαδικό πρόβλημα 4kp50*, το οποίο είναι πανομοιότυπο με το δυαδικό πρόβλημα 4kp50, αλλά, όπως και στο προηγούμενο πρόβλημα, το εύρος των αντικειμενικών συναρτήσεων επεκτείνεται με τον ορισμό των κατώτατων ορίων στα 70, 69 και 57 αντίστοιχα.

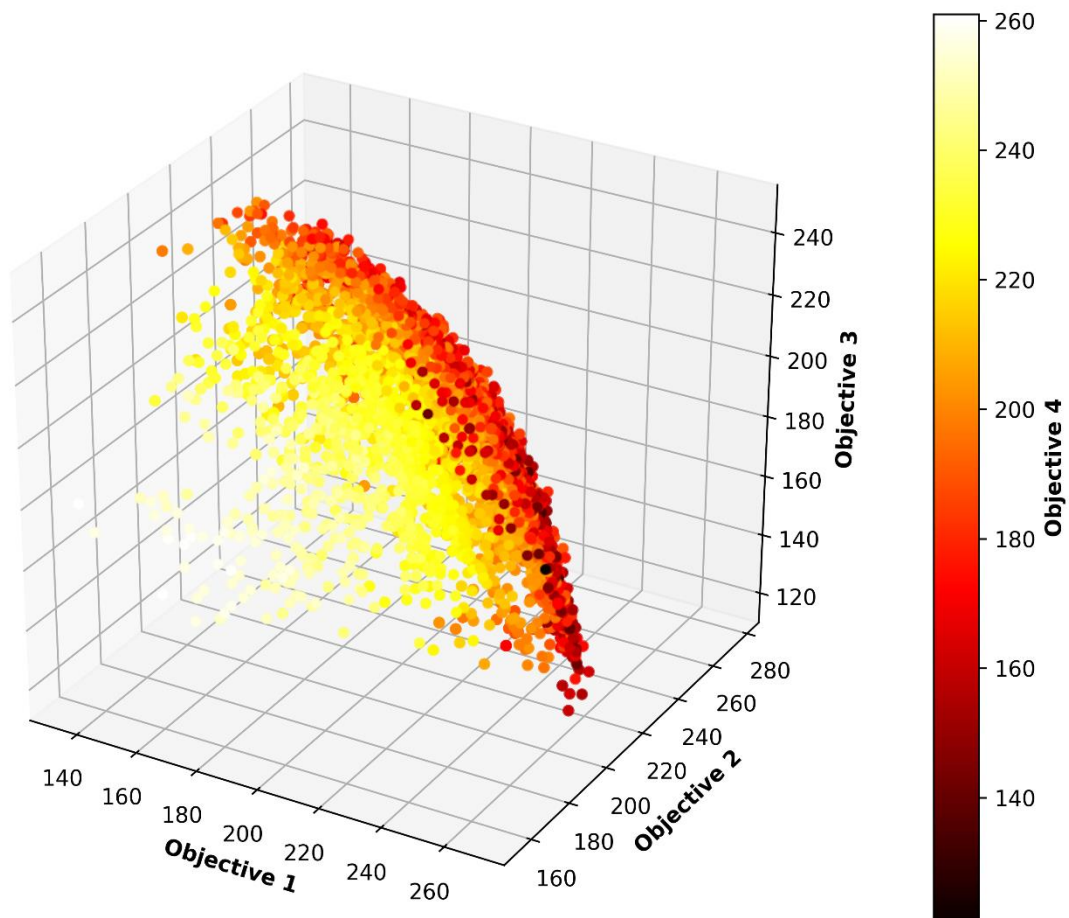
- Ένα πρόβλημα 5kp40, με τους συντελεστές αντικειμενικής συνάρτησης να υπολογίζονται από μια ομοιόμορφη κατανομή $U[50,40]$ και τους συντελεστές των περιορισμών από μία ομοιόμορφη κατανομή $U[2,10]$. Τα πραγματικά σημεία ναδέρ των τεσσάρων αντικειμενικών συναρτήσεων θεωρούνται γνωστά και ίσα με 29, 32, 27 και 27, ενώ τα αντίστοιχα εύρη τιμών ισούνται με 21, 21, 27 και 25.
- Ένα πρόβλημα 5kp40*, το οποίο είναι πανομοιότυπο με το πρόβλημα 5kp40, με τη διαφορά ότι τα εύρη των αντικειμενικών συναρτήσεων επεκτείνονται ώστε να ισούνται με 45, διασφαλίζοντας με αυτόν τον τρόπο ότι θα συμπεριληφθούν στο πλέγμα τα, άγνωστα πλέον, πραγματικά σημεία ναδέρ, με τα 5, 8, 9 και 7 να είναι τα νέα κάτω όρια.
- Ένα δυαδικό πρόβλημα 6kp50, με συντελεστές αντικειμενικής συνάρτησης που προκύπτουν από ομοιόμορφη κατανομή $U[0,1]$ και συντελεστές περιορισμού από ομοιόμορφη κατανομή $U[0,5]$. Τα πραγματικά σημεία ναδέρ των πέντε αντικειμενικών συναρτήσεων του προβλήματος ισούνται με 38, 37, 31, 27 και 30 και τα εύρη των αντικειμενικών συναρτήσεων με 21, 24, 26, 30 και 22.
- Ένα πρόβλημα 6kp50*, το οποίο είναι πανομοιότυπο με το δυαδικό πρόβλημα 6kp50, με τη διαφορά ότι, όπως στα προηγούμενα, θεωρείται ότι τα πραγματικά σημεία ναδέρ είναι άγνωστα, και επομένως επιλέγεται μια υποεκτίμησή τους, ώστε αυτά τελικά να διαμορφώνονται σε 9, 11, 7, 7 και 2, και τα εύρη σε 50 για όλες τις αντικειμενικές συναρτήσεις.

Οι πίνακες των συντελεστών των αντικειμενικών συναρτήσεων και των περιορισμών για όλα τα παραπάνω ζεύγη προβλημάτων, δηλαδή για τα 4kp40 – 4kp40*, 4kp50 – 4kp50*, 5kp40 – 5kp40* και 6kp50 – 6k5, δίνονται στο Παράρτημα 2.

Ο Πίνακας 4-16: Σύγκριση απόδοσης μεταξύ AUGMECON 2 και AUGMECON-R για το πρόβλημα 4kp40, θεωρώντας γνωστά (4kp40) και άγνωστα (4kp40*) τα πραγματικά σημεία ναδέρ. συνοψίζει τις διαφορές μεταξύ των επιδόσεων των AUGMECON 2 και AUGMECON-R, για τα προβλήματα 4kp40 και 4kp40*, ενώ το Σχήμα 4-2: Μέτωπο Pareto για το πρόβλημα 4kp40 απεικονίζει το μέτωπο Pareto του προβλήματος.

Πίνακας 4-16: Σύγκριση απόδοσης μεταξύ AUGMECON 2 και AUGMECON-R για το πρόβλημα 4kp40, θεωρώντας γνωστά (4kp40) και άγνωστα (4kp40*) τα πραγματικά σημεία ναδίρ.

| | 4kp40 | | 4kp40* | |
|--------------------------------------|------------|------------|------------|------------|
| | AUGMECON 2 | AUGMECON-R | AUGMECON 2 | AUGMECON-R |
| Χρόνος CPU | 1214 min | 56 min | 85 hours | 59 min |
| Αριθμός προς επίλυση μοντέλων | 290443 | 14735 | 1431195 | 10846 |
| Αδύνατες λύσεις | 14735 | 359 | 35363 | 359 |
| Διπλότυπες λύσεις | 272530 | 7324 | 1392653 | 7315 |
| Κυριαρχούμενες λύσεις | 6 | 0 | 7 | 0 |
| Λύσεις που ανήκουν στο μέτωπο Pareto | 3172 | 3172 | 3172 | 3172 |



Σχήμα 4-2: Μέτωπο Pareto για το πρόβλημα 4kp40

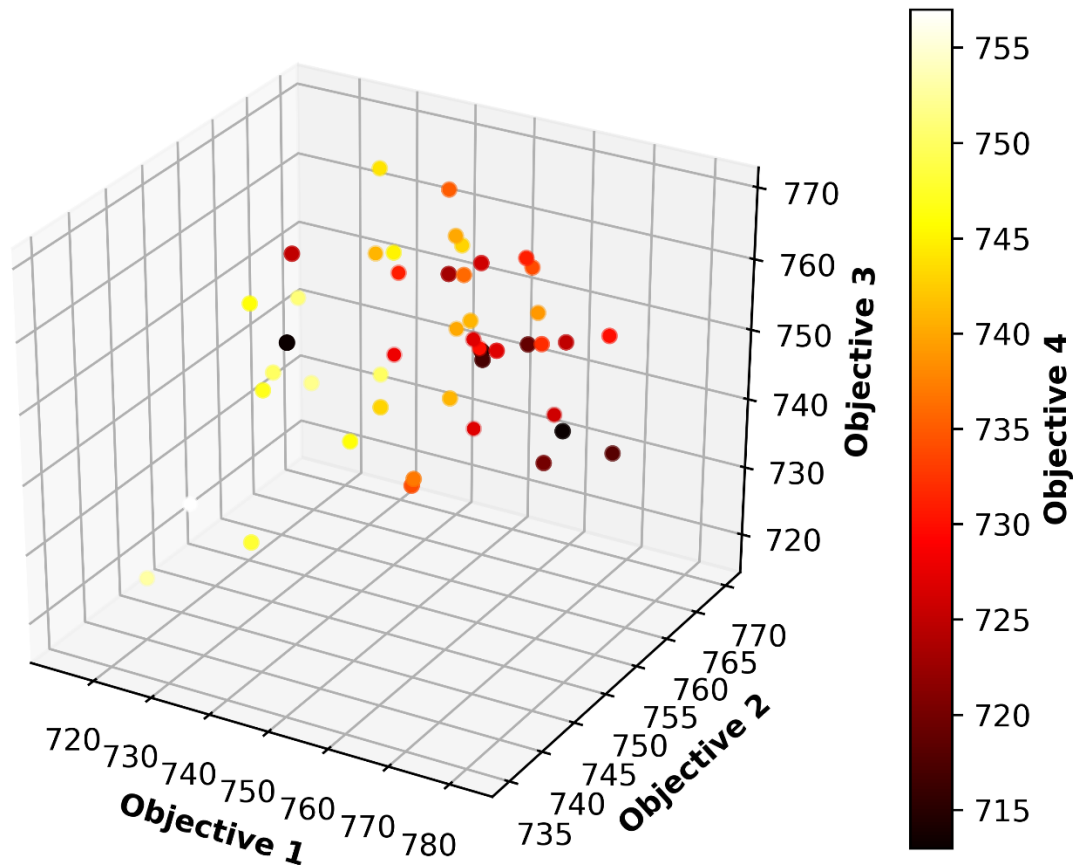
Όπως ξεκάθαρα υποδεικνύει και ο Πίνακας 4-16, η μέθοδος AUGMECON-R είναι σχεδόν 21 φορές ταχύτερη από την προκάτοχό της, AUGMECON 2, με την τελευταία να λύνει σχεδόν 26 φορές περισσότερα μοντέλα, για την περίπτωση όπου θεωρείται ότι τα πραγματικά σημεία ναδίρ του προβλήματος είναι γνωστά

εκ των προτέρων. Επισημαίνεται εδώ ότι, όπως συζητήθηκε παραπάνω, η διαφορά του λόγου επίδοσης μεταξύ των προς επίλυση μοντέλων και του χρόνου επίλυσης, οφείλεται στον αριθμό ελέγχων που γίνονται στον πίνακα «σημαία – flag». Όταν τώρα εξετάζεται η περίπτωση κατά την οποία τα πραγματικά σημεία ναδύρ είναι άγνωστα και, ως εκ τούτου, θεωρείται πλέγμα πολύ μεγαλύτερου μεγέθους ώστε να διασφαλιστεί ότι τα πραγματικά σημεία ναδύρ περιλαμβάνονται στην ανάλυση και ότι δεν χάνεται καμία λύση, η AUGMECON-R υπερτερεί έναντι της AUGMECON 2, επιλύοντας περίπου 131 φορές λιγότερα μοντέλα, σε 85 φορές λιγότερο χρόνο. Μία περίεργη παρατήρηση εδώ είναι ότι η AUGMECON-R λύνει τώρα ακόμη λιγότερα μοντέλα από πριν. Δεδομένης της μεγάλης μείωσης των κατώτερων ορίων, οι μεταβλητές απόκλισης είναι σημαντικά μεγαλύτερες, οδηγώντας σε στην επίλυση λιγότερων μοντέλων. Ωστόσο η συγκεκριμένη συμπεριφορά του μοντέλου, δεν έχει αρνητικές επιπτώσεις στην ακρίβεια του αλγορίθμου, καθώς προσδιορίζονται επακριβώς οι αδύνατες λύσεις και τελικά οι λύσεις του μέτωπου Pareto.

Ομοίως, ο Πίνακας 4-17 συνοψίζει τις διαφορές στις επιδόσεις των AUGMECON 2 και AUGMECON-R, για τα δυαδικά προβλήματα 4kp50 και 4kp50*, ενώ στο Σχήμα 4-3 απεικονίζεται το μέτωπο Pareto του προβλήματος.

Πίνακας 4-17: Σύγκριση απόδοσης μεταξύ AUGMECON 2 και AUGMECON-R για το πρόβλημα 4kp50, θεωρώντας γνωστά (4kp50) και άγνωστα (4kp50*) τα πραγματικά σημεία ναδύρ.

| | 4kp50 | | 4kp50* | |
|--------------------------------------|------------|------------|------------|------------|
| | AUGMECON 2 | AUGMECON-R | AUGMECON 2 | AUGMECON-R |
| Χρόνος CPU | 1021 sec | 31 sec | 161 hours | 939 sec |
| Αριθμός προς επίλυση μοντέλων | 6296 | 176 | >4000000 | 161 |
| Αδύνατες λύσεις | 1211 | 28 | - | 28 |
| Διπλότυπες λύσεις | 5039 | 102 | - | 87 |
| Κυριαρχούμενες λύσεις | 0 | 0 | - | 0 |
| Λύσεις που ανήκουν στο μέτωπο Pareto | 46 | 46 | 46 | 46 |



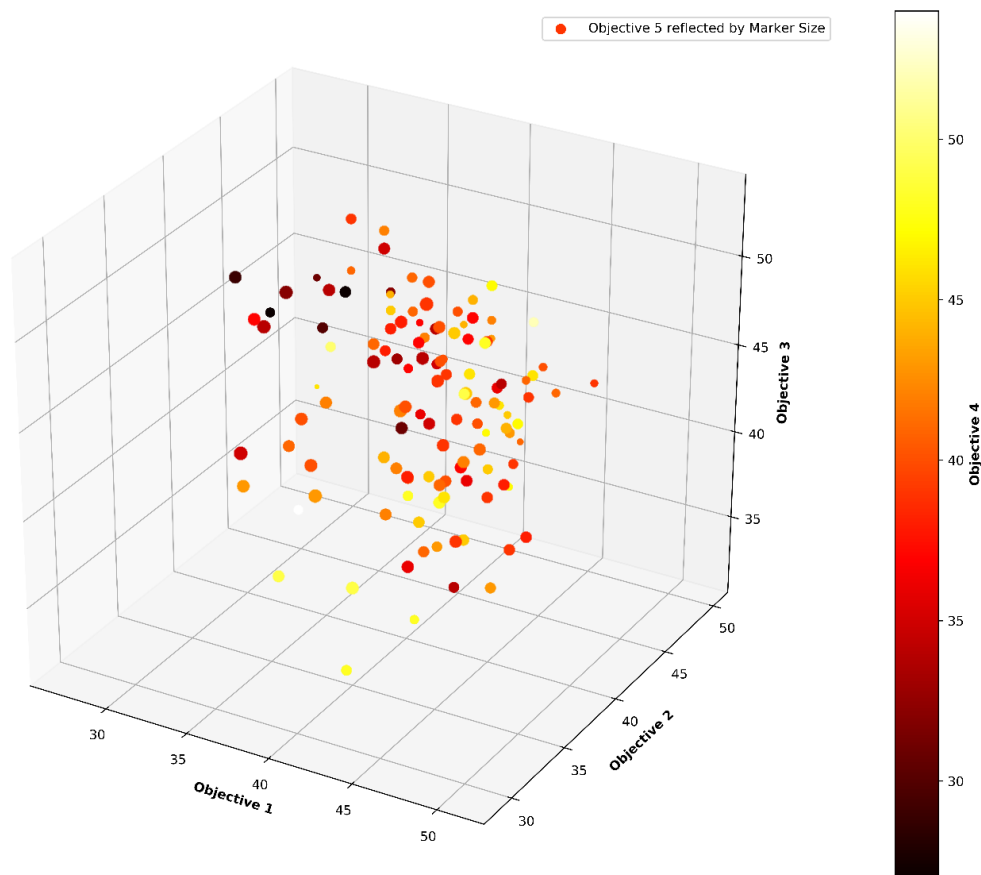
Σχήμα 4-3: Μέτωπο Pareto για το πρόβλημα 4kp50

Παρατηρείται και πάλι ότι η AUGMECON-R λύνει το πρόβλημα 4kp50 σχεδόν 32 φορές πιο γρήγορα, έχοντας λύσει περίπου 35 φορές λιγότερα μοντέλα. Το πιο αξιοσημείωτο στην προκειμένη επίλυση είναι ότι, για το πρόβλημα 4kp50*, η μέθοδος AUGMECON 2 χρειάστηκε 161 ώρες και έλυσε περισσότερα από τέσσερα εκατομμύρια μοντέλα — έναν υπερβολικά μεγάλο αριθμό, που είναι επαρκής για να αποθαρρύνει τον χρήστη από την ανάλυση αντίστοιχων προβλημάτων. Τα αποτελέσματα αυτά υποδεικνύουν με άμεσο και ξεκάθαρο τρόπο την ανωτερότητα του αλγορίθμου της AUGMECON-R, ως προς την χρονικά αποδοτική επίλυση σύνθετων και, ως τώρα δυσεπίλυτων, προβλημάτων, διασφαλίζοντας ακρίβεια στην επίλυση και παροχή του συνόλου των λύσεων του μετώπου Pareto του προβλήματος.

Προχωρώντας σε ένα πρόβλημα πέντε κριτηρίων, ο Πίνακας 4-18 συνοψίζει τις διαφορές στην επίδοση μεταξύ των AUGMECON 2 και AUGMECON-R, για τα προβλήματα 5kp40 και 5kp40*, ενώ το Σχήμα 4-4 απεικονίζει το μέτωπο Pareto του προβλήματος.

Πίνακας 4-18: Σύγκριση απόδοσης μεταξύ AUGMECON 2 και AUGMECON-R για το πρόβλημα 5kp40, θεωρώντας γνωστά (5kp40) και άγνωστα (5kp40*) τα πραγματικά σημεία ναδύρ.

| | 5kp40 | | 5kp40* | |
|--------------------------------------|------------|------------|------------|------------|
| | AUGMECON 2 | AUGMECON-R | AUGMECON 2 | AUGMECON-R |
| Χρόνος CPU | 12035 sec | 175 sec | 27 hours | 194 sec |
| Αριθμός προς επίλυση μοντέλων | 52030 | 618 | 458760 | 622 |
| Αδύνατες λύσεις | 9351 | 114 | 47521 | 114 |
| Διπλότυπες λύσεις | 42553 | 378 | 411113 | 382 |
| Κυριαρχούμενες λύσεις | 0 | 0 | 0 | 1 |
| Λύσεις που ανήκουν στο μέτωπο Pareto | 126 | 126 | 126 | 126 |



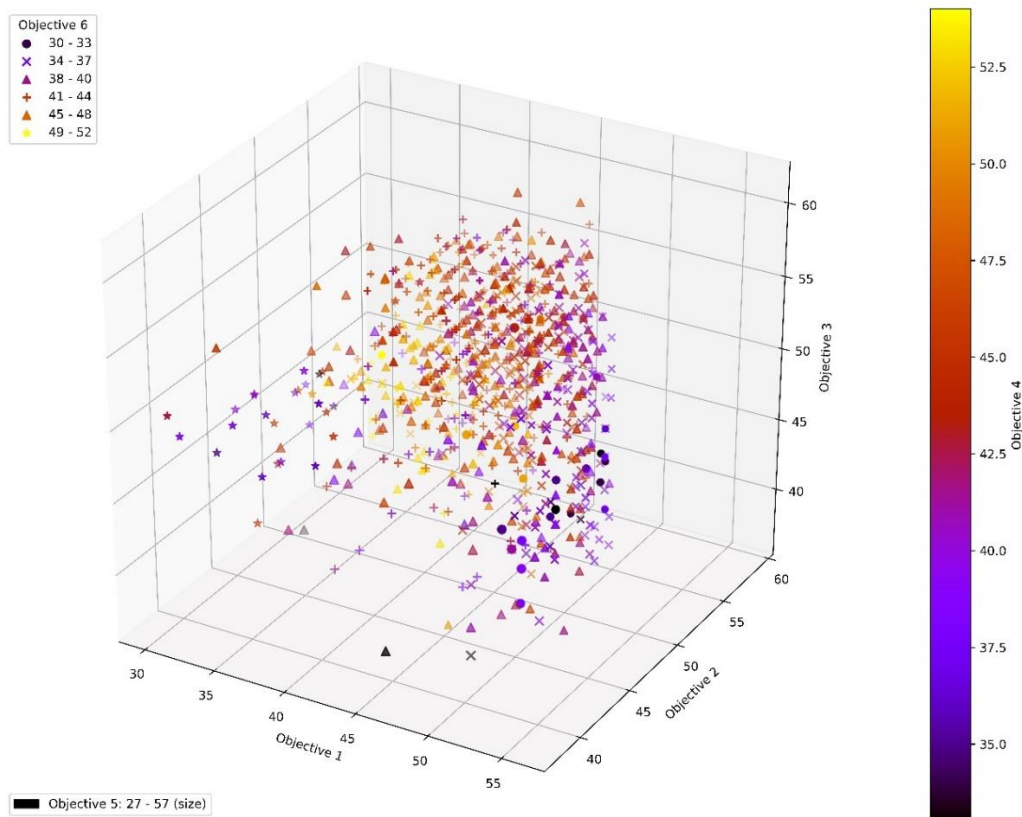
Σχήμα 4-4: Μέτωπο Pareto για το πρόβλημα 5kp40

Για το πρόβλημα 5kp40, η μέθοδος AUGMECON - R αποδεικνύεται 68 φορές γρηγορότερη σε σύγκριση με την AUGMECON 2, έχοντας λύσει περίπου 83 φορές λιγότερα μοντέλα, ενώ στην περίπτωση όπου τα κάτω όρια των προς βελτιστοποίηση αντικειμενικών συναρτήσεων δεν θεωρούνται γνωστά (πρόβλημα 5kp40*), οι παραπάνω διαφορές αυξάνονται, με βελτίωση της απόδοσης για την AUGMECON -R κατά 505 και 737 φορές αντίστοιχα. Παράλληλα, και στις δύο περιπτώσεις (προβλήματα 5kp40 και 5kp40*), η

υπεροχή της AUGMECON-R έναντι της AUGMECON 2 γίνεται ακόμα πιο έντονη, σε σύγκριση με τα προηγούμενα δύο σετ προβλημάτων τεσσάρων αντικειμενικών συναρτήσεων. Όπως έχει εξηγηθεί, όσο μεγαλύτερος είναι ο αριθμός των αντικειμενικών συναρτήσεων, τόσο μεγαλύτερη είναι η διαφορά στην επίδοση των δύο μεθόδων. Η συγκεκριμένη διαπίστωση γίνεται εμφανής στο τελικό πρόβλημα των έξι αντικειμενικών συναρτήσεων, με τα αποτελέσματα να δίνονται στον Πίνακα 4-19 και στο Σχήμα 4-5.

Πίνακας 4-19: Σύγκριση απόδοσης μεταξύ AUGMECON 2 και AUGMECON-R για το πρόβλημα 6kp50, θεωρώντας γνωστά (6kp50) και άγνωστα (6kp50*) τα πραγματικά σημεία ναδύρ.

| | 6kp50 | | 6kp50* | |
|--------------------------------------|------------|------------|------------|------------|
| | AUGMECON 2 | AUGMECON-R | AUGMECON 2 | AUGMECON-R |
| Χρόνος CPU | 52 hours | 1207 sec | - | 4145 sec |
| Αριθμός προς επίλυση μοντέλων | 1104406 | 6269 | - | 6242 |
| Αδύνατες λύσεις | 193612 | 863 | - | 863 |
| Διπλότυπες λύσεις | 909949 | 4563 | - | 4536 |
| Κυριαρχούμενες λύσεις | 2 | 0 | - | 0 |
| Λύσεις που ανήκουν στο μέτωπο Pareto | 843 | 843 | 843 | 843 |



Σχήμα 4-5: Μέτωπο Pareto για το πρόβλημα 6kp50

Κατ' αντιστοιχία με το δυαδικό πρόβλημα 4kp50, το δυαδικό πρόβλημα 6kp50 χρησιμοποιείται για να τονιστεί η διαφορά απόδοσης μεταξύ των δύο μεθόδων, AUGMECON 2 και AUGMECON-R. Δεδομένης της σημαντικά μεγαλύτερης πολυπλοκότητας που προσθέτει στο πρόβλημα μια έκτη αντικειμενική συνάρτηση, οι λόγοι μεταξύ των δύο μεθόδων, ως προς τον χρόνο και τον αριθμό των προς επίλυση μοντέλων, είναι ακόμη υψηλότεροι σε αυτήν την περίπτωση, με την AUGMECON 2 να επιλύει 175 περισσότερα μοντέλα, οδηγώντας συνολικά σε κατά 155 φορές πιο αργή επίλυση. Επεκτείνοντας την ανάλυση στην περίπτωση που τα πραγματικά κατώτατα όρια των αντικειμενικών συναρτήσεων θεωρούνται άγνωστα, και διευρύνοντας το πλέγμα προκειμένου να διασφαλιστεί ότι αυτά περιλαμβάνονται στην ανάλυση, η AUGMECON 2 αδυνατεί να λύσει το πρόβλημα σε εύλογο χρονικό διάστημα, αλλά, λαμβάνοντας υπόψη ότι ο αλγόριθμος χρειάστηκε 47 ώρες για να εξετάσει το πλέγμα κατά την πρώτη επίλυση και δεδομένου του μεγάλου αριθμού ακέрайων μεταβλητών απόφασης, 50, εκτιμάται ότι η AUGMECON 2 ενδεχομένως να χρειαζόταν έως και εκατό ημέρες για να ολοκληρώσει η ανάλυση.

4.7 Συμπεράσματα

Σε αυτό το κεφάλαιο, παρουσιάζεται μια βελτιωμένη έκδοση της μεθόδου ε-constraint, η μέθοδος AUGMECON-R. Αντλώντας από τις αδυναμίες της μεθόδου AUGMECON 2, η οποία στο παρόν λογίζεται ως η προκάτοχος της AUGMECON – R, παρουσιάζονται αναλυτικά η βασική ιδέα και το μαθηματικό μοντέλο της τελευταίας, και οι δύο μέθοδοι εφαρμόζονται σε μία συγκριτική μεταξύ τους ανάλυση. Τα προβλήματα που επιλύθηκαν στην ενότητα 4.6 υποδηλώνουν ότι η προτεινόμενη μέθοδος, AUGMECON-R, βελτιώνει σε σημαντικό βαθμό τις δυνατότητες της προκατόχου της, AUGMECON 2, επιλύοντας σημαντικά λιγότερα μοντέλα σε σημαντικά λιγότερο χρόνο και επιτρέποντας την εύκολη και περιορισμένη χρονικά επίλυση δύσκολων ή ακόμα και αδύνατων, από άποψη απαιτήσεων χρόνου και επεξεργασίας, προβλημάτων πολλών αντικειμενικών συναρτήσεων. Η AUGMECON-R, επιπλέον, λύνει το πρόβλημα της μη γνώσης των κατώτατων σημείων, ναδέρ, των προς βελτιστοποίηση συναρτήσεων, καθώς δύναται να χρησιμοποιήσει πολύ χαμηλής ή μηδενικής τιμής κάτω όρια χωρίς να

αυξήσει τις απαιτήσεις χρόνου της επίλυσης. Παράλληλα, ο προτεινόμενος αλγόριθμος συνιστάται ακόμα και για μη ακέραια προβλήματα πολλαπλών κριτηρίων, καθώς η ικανότητά του να λύνει ακέραια προβλήματα σε πολύ περιορισμένο χρονικό διάστημα, σε σύγκριση με άλλες προσεγγίσεις, επιτρέπει τη μετατροπή οποιουδήποτε μη ακέραιου προβλήματος σε ακέραιο, χωρίς υπερβολικές απαιτήσεις σε χρόνο και λοιπούς πόρους. Τα παραπάνω πλεονεκτήματα του αλγορίθμου της AUGMECON-R συμβάλλουν επίσης στη μεγιστοποίηση της ευρωστίας του εκάστοτε προβλήματος έναντι της στοχαστικής αβεβαιότητας, επιτρέποντας, για παράδειγμα, λόγω της δυνατότητας επίλυσης των μοντέλων σε σημαντικά περιορισμένο χρόνο, την αύξηση του αριθμού των επαναλήψεων Monte Carlo, τις οποίες απαιτεί η εν λόγω ανάλυση. Το συγκεκριμένο χαρακτηριστικό είναι ιδιαίτερο σημαντικό στα πλαίσια της παρούσας διατριβής όπου και αποτελεί ζητούμενο η εξαγωγή εύρωστων λύσεων.

Σε αυτό το σημείο επισημαίνεται ότι, όπως προκύπτει και από την βιβλιογραφική επισκόπηση της Ενότητας 3.6, έχουν γίνει και στο παρελθόν κάποιες προσπάθειες εντοπισμού των αδυναμιών που σχετίζονται με την AUGMECON 2, καθώς και προσπάθειες βελτίωσής της (π.χ. Domínguez-Ríos et al., 2019), ωστόσο αυτές τείνουν να εκτελούν εκ των υστέρων πολυάριθμους ελέγχους, οι οποίοι αυξάνουν δυνητικά την πολυπλοκότητα του αλγορίθμου και τις χρονικές απαιτήσεις. Μια τέτοια περίπτωση είναι αυτή των Zhang and Reimann (2014), η οποία έχει επιπλέον το μειονέκτημα ότι είναι υλοποιημένη σε Visual Studio Express, και όχι σε ένα κοινό για την επίλυση προβλημάτων επιχειρησιακής έρευνας εργαλείο, όπως είναι το GAMS, στο οποίο υλοποιούνται οι AUGMECON 2 και AUGMECON – R.

Ένας περιορισμός της προτεινόμενης μεθόδου έγκειται στην χρησιμοποίηση του πίνακα «σημαίας – flag», το μέγεθος του οποίου συνδέεται άμεσα με το εύρος των αντικειμενικών συναρτήσεων, και επομένως μπορεί να οδηγήσει στην απορρόφηση μεγάλου χώρου μνήμης ο οποίος ενδεχομένως, και κατά περίπτωση, να μην είναι διαθέσιμος. Το συγκεκριμένο πρόβλημα θα μπορούσε να ξεπεραστεί με υλοποίηση της μεθόδου AUGMECON-R, αντί της GAMS, σε μια αντικειμενοστραφή γλώσσα όπως η python, εργαλείο που επιτρέπει τη δυναμική

κατανομή μνήμης. Μία τέτοια υλοποίηση επιτρέπει τη χρήση εικονικής μνήμης, την αποφυγή της αρχικοποίησης του πίνακα σημαιών με μηδενικές τιμές και την απελευθέρωση χώρου στη μνήμη κάθε φορά που ένας μετρητής μετακινείται στο πλέγμα και θα εξεταστεί στο αμέσως επόμενο κεφάλαιο της διατριβής.

Κεφάλαιο 5

5 Ένταξη αλγορίθμου AUGMECON – R σε ολοκληρωμένο εργαλείο πολυστοχικής βελτιστοποίησης υπό αβεβαιότητα

5.1 Εισαγωγή

Στα πλαίσια της παρούσας ενότητας επεκτείνεται περαιτέρω ο αλγόριθμος επίλυσης AUGMECOR-R και υλοποιείται χρησιμοποιώντας τη γλώσσα προγραμματισμού rython. Ο βελτιωμένος αλγόριθμος εντάσσεται σε ένα ολοκληρωμένο εργαλείο με το οποίο ο χρήστης μπορεί να λύσει ένα πρόβλημα αξιολόγησης και επιλογής κλιματικών στρατηγικών υπό αβεβαιότητα, με ευκολία στον χειρισμό των εισόδων και στην αναπαράσταση των εξόδων του προβλήματος. Όπως γίνεται κατανοητό από τα προηγούμενα, ο αλγόριθμος AUGMECON – R αποτελεί τον τελευταίο κρίκο εξέλιξης στην αλυσίδα αλγορίθμων που ξεκινά από τον αλγόριθμο ϵ -constraint και συνεχίζει με τους αλγορίθμους AUGMECON και AUGMECON 2, με το σύνολο των αλγορίθμων να έχει υλοποιηθεί με την αλγεβρική γλώσσα μοντελοποίησης GAMS. Το GAMS είναι ένα ειδικά σχεδιασμένο σύστημα για την μοντελοποίηση γραμμικών, μη γραμμικών και προβλημάτων μοντελοποίησης μεικτού ακέραιου προγραμματισμού και είναι ιδιαίτερα χρήσιμο για την επίλυση μεγάλων και σύνθετων προβλημάτων, τα οποία απαιτούν πολλές επαναλήψεις για να καθοριστεί ένα μοντέλο με ακρίβεια. Στα πλεονεκτήματα του GAMS ανήκει η δυνατότητα που προσφέρει στον χρήστη για αλλαγή του σχηματισμού με γρήγορο και εύκολο τρόπο, για εύκολη επιλογή και εναλλαγή μεταξύ διαφορετικών επιλυτών (solvers), καθώς και η δυνατότητα μετατροπής ενός γραμμικού προβλήματος σε μη γραμμικό χωρίς ιδιαίτερη δυσκολία. Από τα παραπάνω χαρακτηριστικά είναι κατανοητό πως το GAMS αποτελεί μια γλώσσα μοντελοποίησης με δυνατότητες που ταιριάζουν στις

απαιτήσεις των αναγκών της AUGMECON – R. Η επιλογή της γλώσσας προγραμματισμού *rython* και συγκεκριμένα του πακέτου *Pyomo* γίνεται στην προκειμένη υλοποίηση ώστε να δοθεί ευελιξία στο χειρισμό των εισόδων και εξόδων του αλγορίθμου και στην απεικόνιση των αποτελεσμάτων, καθώς επίσης και να διευκολυνθεί η περαιτέρω ανάπτυξη, δεδομένης της ευρείας χρήσης της γλώσσας στην ερευνητική κοινότητα. Η *rython* είναι μια ισχυρή διερμηνευόμενη, γενικού σκοπού γλώσσα προγραμματισμού υψηλού επιπέδου, η οποία έχει πολύ καθαρή και ευανάγνωστη σύνταξη. Ανήκει στις γλώσσες προστακτικού προγραμματισμού και υποστηρίζει τόσο το διαδικαστικό όσο και το αντικειμενοστραφές προγραμματιστικό υπόδειγμα. Το *Pyomo* είναι ένα πακέτο λογισμικού ανοιχτού κώδικα βασισμένο σε *rython* το οποίο υποστηρίζει ένα ποικίλο σύνολο δυνατοτήτων βελτιστοποίησης για τη διαμόρφωση, επίλυση και ανάλυση μοντέλων βελτιστοποίησης. Η βασική δυνατότητα που προσφέρει το εργαλείο *Pyomo* είναι η μοντελοποίηση δομημένων εφαρμογών βελτιστοποίησης. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον ορισμό γενικών συμβολικών προβλημάτων, την δημιουργία συγκεκριμένων περιπτώσεων προβλημάτων και τη λύση αυτών με χρήση διαφόρων λογισμικών ανοιχτού ή μη κώδικα. Το *Pyomo* υποστηρίζει την ανάπτυξη και επίλυση ενός μεγάλου εύρους προβλημάτων που ανήκουν στις κατηγορίες του γραμμικού προγραμματισμού, τετραγωνικού προγραμματισμού, μη γραμμικού προγραμματισμού, μεικτού ακέραιου γραμμικού προγραμματισμού κ.α. Επιπρόσθετα της νέας υλοποίησης σε *rython* του αλγορίθμου της AUGMECON -R, ο οποίος επί της αρχής χρησιμοποιεί μία σειρά τρόπων και τεχνικών, ούτως ώστε να επιτύχει αποδοτικότερους χρόνους επίλυσης, στο παρόν κεφάλαιο ο αλγόριθμος επεκτείνεται προκειμένου να χειριστεί τη βέλτιστη κατανομή των αντικειμενικών συναρτήσεων εντός των εμφωλευμένων βρόγχων επίλυσης. Για τους σκοπούς της επίλυσης χρησιμοποιείται το λογισμικό *Gurobi*, το οποίο ενδείκνυται για χρήση σε προγράμματα ακέραιου, γραμμικού και τετραγωνικού προγραμματισμού καθώς και μεικτού ακέραιου γραμμικού προγραμματισμού, μεικτού ακέραιου τετραγωνικού προγραμματισμού, κ.α..

5.2 Επέκταση της μεθόδου AUGMECON – R και υλοποίηση σε περιβάλλον python

Στο παρόν κεφάλαιο, θα γίνει παρουσίαση της τεχνικής υλοποίησης του αλγορίθμου της AUGMECON-R, όπως αυτός αναπτύχθηκε στη γλώσσα προγραμματισμού python, στα πλαίσια της παρούσας εργασίας.

Η υλοποίηση του αλγορίθμου εστιάζει σε προβλήματα πολυστοχικού ακέραιου προγραμματισμού, όπου είναι επιθυμητή η εύρεση του πλήρους μετώπου Pareto μεταξύ των εφικτών λύσεων. Επιπρόσθετα, αναπτύχθηκε δυνατότητα εισόδου των δεδομένων και δυνατότητα επεξεργασίας των εξόδων για παρουσίαση των αποτελεσμάτων, οι οποίες εστιάζουν στη μορφή προβλημάτων κλιματικής πολιτικής τα οποία εξετάζονται στα πλαίσια της παρούσας διατριβής.

Ο συλλογισμός πίσω από την επιλογή της γλώσσας προγραμματισμού, στην οποία ολοκληρώθηκε η υλοποίηση, είναι τριμερής. Πρώτον, η python προσφέρει ευελιξία σχετικά με την επεξεργασία των δεδομένων, τόσο όσον αφορά το χειρισμό των εισόδων για τον καθορισμό και τη μορφοποίηση του προβλήματος, όσο και αναφορικά με το χειρισμό των εξόδων για την εύληπτη παρουσίαση των αποτελεσμάτων. Δεύτερον, η συγκεκριμένη γλώσσα χρησιμοποιείται πλέον ευρέως στην ακαδημαϊκή και ερευνητική κοινότητα, για πλήθος έργων, σε ποικίλους και ετερογενείς επιστημονικούς τομείς, γεγονός που καθιστά το περιεχόμενό της οικείο σε μεγάλο μέρος των ερευνητών, επιτρέποντας όχι μόνο την καλύτερη κατανόηση της υλοποίησης, αλλά και την επεξεργασία, βελτίωση και περαιτέρω ανάπτυξη της. Τέλος, η python πλαισιώνεται από μία σειρά ώριμων και εύρωστων βιβλιοθηκών, που αφορούν τη μορφοποίηση και επίλυση μοντέλων βελτιστοποίησης και την αποδοτική επεξεργασία πινάκων και δομών δεδομένων.

Η αρχιτεκτονική της υλοποίησης βασίζεται στο διαχωρισμό τριών πυλώνων τη βασικής λειτουργίας: την είσοδο και επεξεργασία των δεδομένων για την παραγωγή του μοντέλου βελτιστοποίησης ακέραιου προγραμματισμού, τη μετατροπή του μοντέλου στην κατάλληλη για την AUGMECON-R μορφή και

εφαρμογή του αλγορίθμου επίλυσης, και τέλος, τη συγκέντρωση και παρουσίαση των λύσεων/αποτελεσμάτων.

5.2.1 Υλοποίηση του αλγορίθμου επίλυσης της βελτιστοποίησης

Η επίλυση - ενός προβλήματος βελτιστοποίησης πολυκριτηριακού ακέραιου προγραμματισμού - ως ξεχωριστή και ανεξάρτητη οντότητα, συντελείται από την επεξεργασία του μοντέλου και την εφαρμογή του αλγορίθμου επίλυσης. Η μοντελοποίηση του υπό εξέταση προβλήματος, καθώς και ο χειρισμός των αποτελεσμάτων ξεφεύγουν από το πλαίσιο της διαδικασίας επίλυσης. Για το λόγο αυτό, επιχειρήθηκε να ενσωματωθούν, εντός της ίδιας οντότητας, μόνο οι διεργασίες που αφορούν τόσο το χειρισμό του μοντέλου όσο και την εφαρμογή του αλγορίθμου επίλυσης επάνω στο μοντέλο. Τα ανωτέρω εσωκλείονται σε μία κλάση επονομαζόμενη «MoirAugmeconR».

Η διαδικασία επίλυσης αποτελείται από μία σειρά διακριτών βημάτων, τα οποία υλοποιούνται στην ρυθμόν υπό τη μορφή διακριτών κλάσεων. Τα βήματα και η αντιστοίχιση τους στις υλοποιημένες σε ρυθμόν κλάσεις αναλύονται παρακάτω, ενώ ο ακριβής κώδικας ως περιεχόμενο των κλάσεων, δίνεται στο Παράρτημα 3.

- Βήμα 1: Δημιουργία του πίνακα πληρωμών (payoff table) – κλάση `self.create_payoff_table()` και εκτύπωση του για ενημέρωση του χρήστη – κλάση `self.print_payoff_table()`

Η δημιουργία του πίνακα πληρωμών προχωρά αρχικά στον υπολογισμό των διαγώνιων στοιχείων, βελτιστοποιώντας ανεξάρτητα κάθε μία από τις αντικειμενικές του υπό εξέταση μοντέλου. Στη συνέχεια, για τον υπολογισμό των τιμών κάθε γραμμής, περιορίζεται η αντικειμενική που αντιστοιχεί στο κελί της διαγωνίου του πίνακα ώστε αυτή να λαμβάνει τη μέγιστη τιμή, και βελτιστοποιείται η επόμενη αντικειμενική προς τα δεξιά. Η αντικειμενική που μόλις βελτιστοποιήθηκε τίθεται σε περιορισμό ώστε να λαμβάνει τη βέλτιστη τιμή της, και η διαδικασία συνεχίζεται με την επόμενη προς τα δεξιά αντικειμενική. Μόλις υπολογιστούν οι τιμές για όλες τις στήλες του πίνακα, αίρονται οι βοηθητικοί περιορισμοί που είχαν τεθεί στις αντικειμενικές, και η επίλυση προχωρά στην επόμενη γραμμή του πίνακα. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται ο υπολογισμός του πίνακα

πληρωμών μέσω λεξικογραφικής βελτιστοποίησης των αντικειμενικών συναρτήσεων. Τέλος, συγκεντρώνονται οι μέγιστες και ελάχιστες τιμές κάθε αντικειμενικής, με τις ελάχιστες να πολλαπλασιάζονται με σχετικό συντελεστή απομείωσης.

- Βήμα 2: Μετατροπή του μοντέλου του προβλήματος σε μοντέλο κατάλληλο για την εφαρμογή της μεθόδου AUGMECON-R – κλάση `self.buid_augmecon_problem()`.

Η μετατροπή του μοντέλου του προβλήματος σε μοντέλο κατάλληλο για την εφαρμογή της AUGMECON-R επιτυγχάνεται τροποποιώντας την πρώτη αντικειμενική του προβλήματος, προσθέτοντας σε αυτή τις μεταβλητές χαλάρωσης, πολλαπλασιασμένες με του αντίστοιχους συντελεστές. Έπειτα, προστίθεται στο μοντέλο ένας εξισωτικός περιορισμός για κάθε μία από τις υπόλοιπες αντικειμενικές του προβλήματος.

- Βήμα 3: Εφαρμογή της διαδικασίας επίλυσης – κλάση `self.run_augmecon_r()`. Η εφαρμογή της διαδικασίας επίλυσης συντελείται μέσω της περιήγησης στο πλέγμα. Ο κώδικας υλοποιεί τους εμφωλευμένους βρόγχους που απαιτούνται για την περιήγηση στο πλέγμα, με χρήση αναδρομής, ώστε το πλήθος των βρόγχων να παράγεται δυναμικά. Για κάθε μία αντικειμενική, ανακτώνται - όπως υπολογίστηκαν από τον πίνακα πληρωμών- τα όρια του εύρους τιμών της, δημιουργείται ο αντίστοιχος βρόγχος και εντός του καλείται ο υπολογισμός του βήματος. Ο υπολογισμός του βήματος, εάν ο αλγόριθμος δεν έχει φθάσει στην αντικειμενική που αντιστοιχεί στον πιο εσωτερικό βρόγχο, θα καλέσει ξανά την περιήγηση στο πλέγμα ένα επίπεδο πιο μέσα, και θα επιστρέψει μοναδιαίο βήμα. Συνεπώς, θα δημιουργηθούν μέσω αναδρομής όλοι οι απαιτούμενοι εμφωλευμένοι βρόγχοι, και εντός του πιο εσωτερικού, ο αλγόριθμος θα ελέγξει αν το τρέχον σημείο στο πλέγμα έχει σημανθεί να παρακαμφθεί. Στην περίπτωση αυτή, ο υπολογισμός του βήματος επιστρέφει τη σχετική τιμή του πίνακα σήμανσης. Διαφορετικά, αν το

τρέχον σημείο δεν έχει σημαθεί να παρακαμφθεί, ο αλγόριθμος προχωράει σε επίλυση. Αν εντοπιστεί εφικτή λύση, την καταγράφει, και ενημερώνει τον πίνακα σήμανσης σύμφωνα με τις τιμές των μεταβλητών χαλάρωσης. Ενώ αν εντοπιστεί αδύνατη λύση, ενημερώνει κατάλληλα τον πίνακα σήμανσης, σύμφωνα με άνω όριο του εύρους των αντικειμενικών συναρτήσεων. Με την ολοκλήρωση της περιήγησης στο πλέγμα, έχουν πλέον καταγραφεί όλες οι παραγόμενες λύσεις.

- Βήμα 4: Συγκέντρωση των λύσεων και κατασκευή του μετώπου Pareto – κλάση `self.display_pareto()`. Ως τελευταίο βήμα, ο αλγόριθμος συγκεντρώνει τις λύσεις, καθαρίζοντας τις διπλότυπες, και αποτυπώνει το ακριβές μέτωπο Pareto του προβλήματος.

5.2.2 Υπολογισμός απόδοσης βελτιωμένου αλγορίθμου επί των σύνθετων προβλημάτων αναφοράς

Προκειμένου να αποδειχθεί η ανωτερότητα της υλοποίησης του αλγορίθμου της AUGMECON – R σε `python`, σε σύγκριση με την αρχική υλοποίηση της μεθόδου στο GAMS, επιλέγεται να επιλυθούν οι δύο αλγόριθμοι και να συγκριθεί η επίδοσή τους στα σύνθετα προβλήματα της υπενότητας 4.6.2. Εν προκειμένω λύνονται το μη συσχετισμένο πρόβλημα `4kp40 uncorrelated`, το πρόβλημα δυαδικών μεταβλητών `4kp40 binary`, και τα δύο προβλήματα πέντε και έξι αντικειμενικών συναρτήσεων `5kp40` και `6kp50` αντίστοιχα. Και για τις τέσσερις εφαρμογές θεωρήθηκε ότι τα πραγματικά σημεία ναδίρ των αντικειμενικών συναρτήσεων είναι γνωστά εκ των προτέρων. Προκειμένου να είναι ισότιμοι οι υπολογισμοί και για τους δύο αλγόριθμους, τα προβλήματα της υπενότητας 4.6.2 έτρεξαν ξανά σε υπολογιστή με επεξεργαστή Intel® Core™ i7 – 1065G7 CPU @1.30 GHz, 1498 Mhz, τεσσάρων πυρήνων και 8 λογικών επεξεργαστών. Η συγκριτική ανάλυση των δύο υλοποιήσεων δίνεται στους Πίνακας 5-1 και Πίνακας 5-2.

Πίνακας 5-1: Σύγκριση των υλοποιήσεων της AUGMECON – R σε GAMS και `python` επί των σύνθετων προβλημάτων αναφοράς `4kp40 uncorrelated` και `binary`.

| | 4kp40 uncorrelated | | 4kp40 binary | |
|-------------------------------|--------------------|---------------|--------------|--------|
| | GAMS | PYTHON | GAMS | PYTHON |
| Χρόνος CPU | 39 min 38sec | 14 min 23 sec | 25 sec | 2 sec |
| Αριθμός προς επίλυση μοντέλων | 10855 | 11094 | 176 | 169 |

Κεφάλαιο 5. Ένταξη αλγορίθμου AUGMECON – R σε ολοκληρωμένο εργαλείο πολυστοχικής βελτιστοποίησης υπό αβεβαιότητα

| | | | | |
|--------------------------------------|------|------|-----|----|
| Αδύνατες λύσεις | 359 | 359 | 28 | 28 |
| Διπλότυπες λύσεις | 7324 | 7562 | 102 | 95 |
| Κυριαρχούμενες λύσεις | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Λύσεις που ανήκουν στο μέτωπο Pareto | 3172 | 3172 | 46 | 46 |

Από τον Πίνακα 5-1 γίνεται φανερό πως η υλοποίηση σε *rython* είναι περίπου τρεις φορές ταχύτερη για το πρόβλημα 4kp40 uncorrelated και παραπάνω από δέκα φορές ταχύτερη για το πρόβλημα 4kp40 binary. Οι διαφορές αυτές είναι ιδιαίτερα σημαντικές για τα προβλήματα που εξετάζονται στο Κεφάλαιο 8 της παρούσας διατριβής, τα οποία, λόγω του μεγάλου αριθμού μεταβλητών και των επαναλαμβανόμενων επιλύσεων Monte Carlo, εμφανίζουν αυξημένες απαιτήσεις σε χρόνους επίλυσης, και θα ήταν πρακτικά αδύνατο να επιλυθούν στο σύστημα GAMS. Η βελτίωση στην απόδοση του αλγορίθμου της AUGMECON R όταν αυτός υλοποιείται στην *rython* είναι φανερή και για τα προβλήματα 5kp40 και 6kp50 (Πίνακας 5-2). Εδώ, η υλοποίηση στην *rython* είναι πάνω από τέσσερις φορές ταχύτερη και για τα δύο προβλήματα.

Πίνακας 5-2: Σύγκριση των υλοποιήσεων της AUGMECON – R σε GAMS και *rython* επί των σύνθετων προβλημάτων αναφοράς 5kp40 και 6kp50 binary.

| | 5kp40 | | 6kp50 binary | |
|--------------------------------------|---------|--------|---------------|--------------|
| | GAMS | PYTHON | GAMS | PYTHON |
| Χρόνος CPU | 158 sec | 35 sec | 19 min 01 sec | 4 min 32 sec |
| Αριθμός προς επίλυση μοντέλων | 618 | 621 | 6269 | 5797 |
| Αδύνατες λύσεις | 114 | 114 | 863 | 863 |
| Διπλότυπες λύσεις | 378 | 381 | 4563 | 4091 |
| Κυριαρχούμενες λύσεις | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Λύσεις που ανήκουν στο μέτωπο Pareto | 126 | 126 | 843 | 843 |

5.3 Χειρισμός δεδομένων εισόδου

Η είσοδος και επεξεργασία των δεδομένων για τη δημιουργία του μοντέλου ενός προβλήματος βελτιστοποίησης ακέραιου προγραμματισμού, είναι κομμάτι ανεξάρτητο της επίλυσης και εξαρτάται τόσο από τα υφιστάμενα δεδομένα, όσο και από τη μορφή του μοντελοποιούμενου προβλήματος. Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας, αναπτύχθηκε, ανεξάρτητα της μεθόδου επίλυσης, τρόπος εισόδου για τα δεδομένα που απαιτούνται προς τη δημιουργία μοντέλου

προβλημάτων ακέραιου προγραμματισμού. Ο τρόπος που επιλέχθηκε για την είσοδο των δεδομένων, είναι η ανάγνωσή τους από υπολογιστικά φύλλα τα οποία παρέχονται από το χρήστη.

Για κάθε πρόβλημα, εισάγεται από το χρήστη μία σειρά υπολογιστικών φύλλων, ένα για κάθε περιορισμό και ένα για κάθε κριτήριο του προβλήματος που εξετάζεται. Τα φύλλα των περιορισμών φέρουν στο πάνω αριστερό κελί την τιμή του δεξιού μέρους του ανισοτικού περιορισμού. Το υπόλοιπο φύλλο, αποτελείται από ένα πίνακα που απεικονίζει τους συντελεστές των μεταβλητών απόφασης, οι οποίοι απαιτούνται για την κατασκευή του περιορισμού, κρατώντας την ακόλουθη σύμβαση: μεταβλητές απόφασης που αντιστοιχούν στην ίδια γραμμή του πίνακα, θεωρούνται αμοιβαία αποκλειόμενες και για αυτές θα τεθούν επιπλέον περιορισμοί που εξασφαλίζουν τον αμοιβαίο αποκλεισμό τους. Αντίστοιχα κατασκευάζονται τα υπολογιστικά φύλλα που αφορούν τις προς βελτιστοποίηση αντικειμενικές του μοντελοποιούμενου προβλήματος, παραλείποντας μόνο το πάνω αριστερά κελί του φύλλου.

Η υλοποίηση προχωρά σε ανάγνωση και επικύρωση της μορφής των υπολογιστικών φύλλων κάνοντας χρήση της βιβλιοθήκης *pandas* της *rython*. Ακολουθώς, προχωρά στη δημιουργία του μοντέλου και στην προσθήκη σε αυτό των ανάλογων αντικειμενικών συναρτήσεων και των σχετικών περιορισμών όπως αυτοί διαμορφώνονται από τα δεδομένα των υπολογιστικών φύλλων. Σε αυτό το σημείο σημειώνεται η καινοτομία της παρούσας υλοποίησης η οποία αφορά αλλαγές στην επίλυση, ώστε αυτή να γίνεται αλλάζοντας τη σειρά των αντικειμενικών συναρτήσεων και επιλέγοντας οι αντικειμενικές με μεγάλο εύρος να τοποθετηθούν στους εξωτερικούς βρόγχους. Η αλλαγή της σειράς των αντικειμενικών γίνεται αξιοποιώντας τη δυνατότητα που δίνει η συγκεκριμένη υλοποίηση στον χειρισμό των δεδομένων εισόδων. Ουσιαστικά η αλλαγή αφορά τον τρόπο με τον οποίο φορτώνονται τα δεδομένα εισόδου. Αρχικά διαβάζονται τα δεδομένα με μια τυχαία σειρά και εκτελείται υπολογισμός του πίνακα πληρωμών και υπολογισμός του εύρους κάθε αντικειμενικής συνάρτησης. Από τον αρχικό υπολογισμό εντοπίζονται οι συναρτήσεις με το μεγαλύτερο εύρος και τα δεδομένα διαβάζονται εκ νέου με την επιθυμητή σειρά και με σκοπό η

αντικειμενική συνάρτηση με το μεγαλύτερο εύρος να τοποθετηθεί στον εξωτερικό βρόγχο. Για τη μοντελοποίηση του προβλήματος γίνεται χρήση της βιβλιοθήκης Pyomo της rython. Τέλος, το μοντέλο που δημιουργείται μπορεί να δοθεί σε ένα στιγμιότυπο της κλάσης «MoipAugmeconR» προς επίλυση. Το σύνολο του κώδικα που αφορά την παραπάνω λειτουργία δίνεται στο Παράρτημα 4.

5.4 Παρουσίαση των λύσεων και χειρισμός αβεβαιότητας

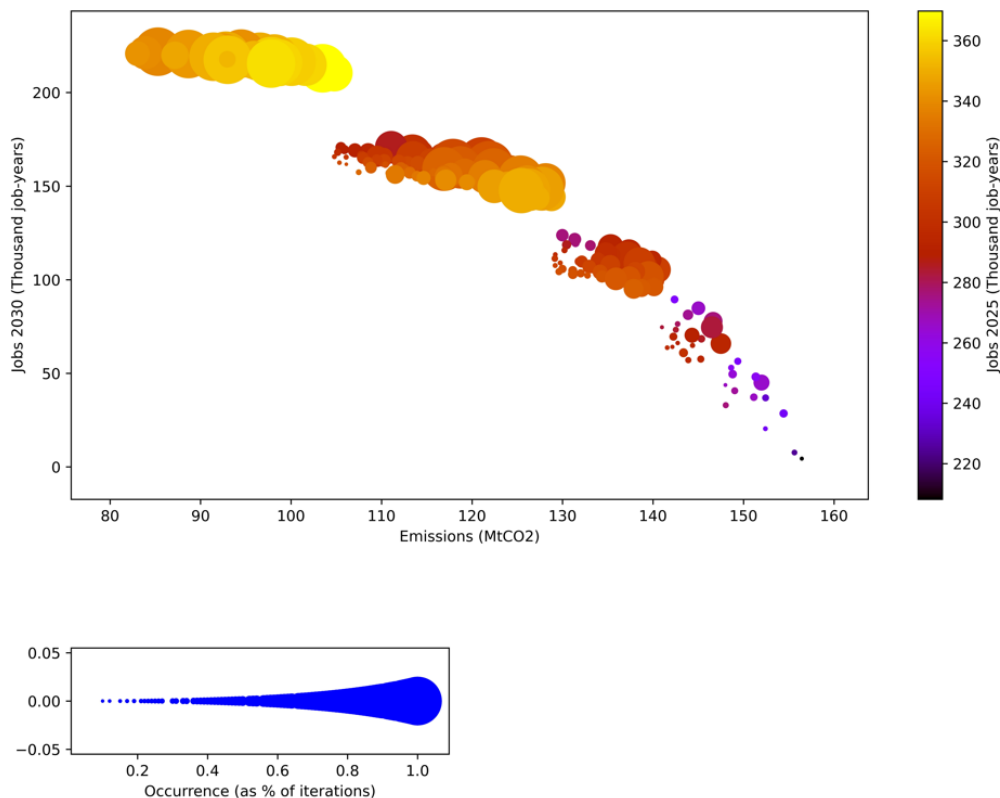
Για την έξοδο των παραγόμενων λύσεων, υλοποιήθηκε τρόπος αποτύπωσής τους σε υπολογιστικά φύλλα, ενώ επιπρόσθετα, δόθηκε η δυνατότητα δημιουργίας διαγράμματος του μετώπου Pareto για περιπτώσεις προβλημάτων πολλαπλών αντικειμενικών συναρτήσεων, παρέχοντας επιπλέον τη δυνατότητα αποτύπωσης στο διάγραμμα της ευρωστίας των λύσεων, μέσω επαναλαμβανόμενης επίλυσης του προβλήματος, για μικρές μεταβολές στις τιμές εισόδου των δεδομένων.

Για τα προβλήματα που εξετάζονται, παράγεται σε υπολογιστικό φύλλο, πίνακας αποτύπωσης των λύσεων του μετώπου Pareto, με την εξής μορφή: σε κάθε γραμμή του φύλλου αποτυπώνεται μία λύση, αναγράφοντας πρώτα την τιμή κάθε αντικειμενικής για το σημείο λύσης, και έπειτα κάθε μία από τις μεταβλητές απόφασης που ενεργοποιήθηκαν, καθώς και τη συνεισφορά τους σε κάθε κριτήριο και περιορισμό του προβλήματος. Ο κώδικας παραγωγής του υπολογιστικού φύλλου υλοποιείται μέσω της συνάρτησης `def save_solutions_to_excel()` η οποία δίνεται στο Παράρτημα 5. Για τη δημιουργία των μετώπων Pareto κατασκευάζεται ειδική συνάρτηση (`def draw_pareto`) η οποία είναι παραμετροποιήσιμη ανάλογα με τον αριθμό των αντικειμενικών συναρτήσεων. Σημειώνεται ότι τα γραφήματα δίνουν τη δυνατότητα απεικόνισης τρίτης διάστασης μέσω φάσματος χρωμάτων, ενώ μπορούν να αποτυπώσουν την ευρωστία των λύσεων μέσω της διαμέτρου του κύκλου που απεικονίζει το κάθε σημείο λύσης.

Τέλος, προκειμένου να είναι δυνατή η αξιολόγηση της ευρωστίας των λύσεων έναντι της στοχαστικής αβεβαιότητας των παραμέτρων του προβλήματος

υλοποιήθηκε η δυνατότητα επαναλαμβανόμενης επίλυσης του προβλήματος με τη μέθοδο Monte Carlo. Η τυχαία μεταβολή στις τιμές των δεδομένων εισόδου, επιτρέπει να εποπτευθεί η ευαισθησία του μοντέλου σε μεταβολές των εισόδων και να εξεταστεί η ευρωστία των υπολογιζόμενων λύσεων μέσα από τη συχνότητα εμφάνισής τους κατά τις επαναλαμβανόμενες επιλύσεις. Η συγκεκριμένη υλοποίηση αποτυπώνεται μέσω της συνάρτησης `def mc_iterations` και αντίστοιχος κώδικας δίνεται στο Παράρτημα 5.

Τα αποτελέσματα της μεθόδου Monte Carlo αποτυπώνονται σε υπολογιστικό φύλλο το οποίο απεικονίζει τόσο τη συχνότητα εμφάνισης των παραγόμενων λύσεων, όσο και τη συχνότητα ενεργοποίησης κάθε μίας εκ των μεταβλητών απόφασης. Ακολουθεί ενδεικτικό παράδειγμα της μορφής του γραφήματος για πρόβλημα τριών αντικειμενικών συναρτήσεων με ενσωμάτωση της πληροφορίας για την ευρωστία των λύσεων έναντι στοχαστικής αβεβαιότητας.



Σχήμα 5-1: Ενδεικτικό παράδειγμα μετώπου Pareto για πρόβλημα τριών αντικειμενικών συναρτήσεων με ενσωμάτωση της πληροφορίας για την ευρωστία των λύσεων

5.5 Συμπεράσματα

Στο σύγχρονο ανταγωνιστικό περιβάλλον των αλγορίθμων επίλυσης προβλημάτων βελτιστοποίησης μαθηματικού προγραμματισμού, η μέθοδος AUGMECON-R προσφέρει τη δυνατότητα εντοπισμού χαρακτηριστικού υποσυνόλου ή και του πλήρους συνόλου των λύσεων του μετώπου Pareto, γεγονός που την καθιστά χρήσιμο εργαλείο στα χέρια του αποφασίζοντα.

Ο κώδικας `rython` που αναπτύχθηκε, προσφέρει τη δυνατότητα επίλυσης προβλημάτων ακέραιου προγραμματισμού, οδηγώντας το λύτη στην εύρεση του συνόλου των αποδοτικών λύσεων Pareto του προβλήματος, παρέχοντας στον αποφασίζοντα την ευχέρεια επιλογής μεταξύ των λύσεων, έχοντας τη συνολική εποπτεία του μετώπου Pareto και αποκαλύπτοντας τα ανταλλάγματα μεταξύ των διαφορετικών αποδοτικών λύσεων. Η εποπτεία των ανωτέρω πληροφοριών, ενισχύεται από τη διαγραμματική της απεικόνιση για προβλήματα δύο και τριών κριτηρίων απόφασης. Η ενσωμάτωση δυνατότητας επαναλαμβανόμενης επίλυσης του προβλήματος, με διαφορετικές τιμές εισόδου, καθιστά τον αποφασίζοντα ενήμερο για την ευαισθησία των παραγόμενων λύσεων σε μεταβολές των εισόδων, πληροφορία ιδιαίτερα χρήσιμη σε πλήθος εφαρμογών, όπου η μοντελοποίηση του προβλήματος δε δύναται να είναι επακριβής.

Οι ενδιαφερόμενοι για περαιτέρω διερεύνηση και ανάπτυξη της τεχνικής υλοποίησης, μπορούν να στραφούν σε μία σειρά πεδίων προς βελτίωση, που περιλαμβάνουν, αλλά δεν εξαντλούνται, στα ακόλουθα. Τη διεύρυνση των επιλυόμενων προβλημάτων πέραν του ακέραιου προγραμματισμού, με τη μετατροπή τους σε προβλήματα ακέραιου προγραμματισμού. Τη δυνατότητα επιλογής του βήματος κατά την περιήγηση στο πλέγμα επίλυσης, παραμετροποιώντας την επιλογή του επιθυμητού βήματος. Την επέκταση της δυνατότητας διαγραμματικής απεικόνισης των λύσεων σε περιπτώσεις προβλημάτων περισσότερων των τριών κριτηρίων. Τη διευκόλυνση εισόδου των δεδομένων των προβλημάτων, μέσω ολοκληρωμένης διεπαφής για το χρήστη. Και τέλος, την πλήρη ανεξαρτητοποίηση της επίλυσης της μεθόδου από την είσοδο του μοντέλου και την επεξεργασία των δεδομένων.

Κεφάλαιο 6

6 Πολυστοχικό μοντέλο ανάλυσης χαρτοφυλακίου με αξιολόγηση κινδύνου και ανάλυση ευρωστίας για την προώθηση της ενεργειακής αποδοτικότητας στην Ελλάδα

6.1 Εισαγωγή

Σε περιφερειακό επίπεδο, η Ευρωπαϊκή Ένωση (ΕΕ) αντιμετωπίζει πρωτόγνωρες προκλήσεις που απορρέουν από την αυξημένη εξάρτηση από τις εισαγωγές ενέργειας και τους ανεπαρκείς ενεργειακούς πόρους, καθώς και την ανάγκη περιορισμού της αλλαγής του κλίματος και αντιμετώπισης της οικονομικής κρίσης. Η αύξηση της ενεργειακής απόδοσης έχει καθοριστική σημασία για την αντιμετώπιση αυτών των μελλοντικών προκλήσεων (Οδηγία 2012/27/ΕΕ). Οι πολιτικές για την ενεργειακή απόδοση αποφέρουν εξοικονόμηση κόστους για τους καταναλωτές, καθώς και οφέλη που σχετίζονται με τη μείωση των εκπομπών αερίων θερμοκηπίου, την ασφάλεια του ενεργειακού εφοδιασμού, την ανταγωνιστικότητα, τη βιωσιμότητα της ευρωπαϊκής οικονομίας και τη δημιουργία νέων θέσεων εργασίας (COM (2017) 56 final). Στο πλαίσιο αυτό, το 2012 (Οδηγία 2012/27/ΕΕ) τέθηκε από την ΕΕ ο γενικός στόχος ενεργειακής απόδοσης για εξοικονόμηση 20% της κατανάλωσης πρωτογενούς ενέργειας έως το 2020, καθώς και περαιτέρω βελτιώσεις στην ενεργειακή απόδοση μετά το 2020 (Οδηγία 2012/27/ΕΕ). Τον Νοέμβριο του 2016 η Επιτροπή πρότεινε την ενίσχυση αυτού του καίριου τομέα πολιτικής πέραν του 2020 με το να τεθεί δεσμευτικός στόχος 30% για την ενεργειακή απόδοση σε επίπεδο ΕΕ έως το 2030

(COM (2017) 56 final). Για την διασφάλιση και παρακολούθηση της πορείας επίτευξης αυτού του κεντρικού στόχου κρίθηκε σκόπιμο να υπάρξει επικαιροποίηση τόσο των δεσμεύσεων όσο και των μηχανισμών που πρέπει να τεθούν σε εφαρμογή από τα κράτη μέλη (ΕΣΔΕΑ, 2014). Προς αυτήν την κατεύθυνση στο πλαίσιο της Οδηγίας 2012/27/ΕΕ, τα κράτη μέλη κλήθηκαν να υποβάλλουν Εθνικά Σχέδια Δράσης Ενεργειακή Απόδοση (ΕΣΔΕΑ). Τα ΕΣΔΕΑ καλύπτουν σημαντικά μέτρα βελτίωσης της ενεργειακής απόδοσης και την αναμενόμενη ή/και επιτευχθείσα εξοικονόμηση ενέργειας, συμπεριλαμβανομένων των μέτρων στον τομέα του εφοδιασμού, της μεταφοράς και της διανομής ενέργειας, καθώς και της τελικής χρήσης ενέργειας, με σκοπό την υλοποίηση των στόχων ενεργειακής απόδοσης όπως αναφέρονται στο άρθρο 3 της οδηγίας (Οδηγία 2012/27/ΕΕ).

Η Ελλάδα στα πλαίσια συμμετοχής της στην κοινή δέσμευση για την επίτευξη του στόχου μείωσης της κατανάλωσης πρωτογενούς ενέργειας στην ΕΕ υπέβαλε τον Δεκέμβριο του 2014 το τρίτο ΕΣΔΕΑ (σε συνέχεια των δύο ήδη υποβληθέντων σχεδίων δράσης κατά τα έτη 2008 και 2011), το οποίο αποτελεί το πρώτο ΕΣΔΕΑ στο πλαίσιο της Οδηγίας 2012/27/ΕΕ. Σύμφωνα με το άρθρο 3 της Οδηγίας, ως ενδεικτικός εθνικός στόχος ενεργειακής απόδοσης για το 2020 τέθηκε η επίτευξη τελικής κατανάλωσης ενέργειας στα επίπεδα των 18,4 Mtoe. Επιπρόσθετα, ορίστηκε ότι η κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας το 2020 θα ανέρχεται σε 24,7 Mtoe, ενώ η ενεργειακή ένταση πρωτογενούς κατανάλωσης ενέργειας και η ενεργειακή ένταση τελικής κατανάλωσης ενέργειας της ελληνικής οικονομίας το 2020 θα ισούνται αντίστοιχα με 0,109 και 0,081 kt/e/€.

Επιπλέον σύμφωνα με την προτεινόμενη μεθοδολογία του άρθρου 7 της Οδηγίας, για τον υπολογισμό της τελικής κατανάλωσης ενέργειας και του προσδιορισμού του υποχρεωτικού, επί αυτής, στόχου εξοικονόμησης ενέργειας, υπολογίστηκε μέση τελική κατανάλωση ενέργειας 10.023 kt/e και συνολικός στόχος σωρευτικής εξοικονόμησης 3.332,7 kt/e. Αναλυτικά, οι επιμέρους στόχοι νέων ετήσιων εξοικονομήσεων που τέθηκαν για το 2020 φαίνονται στον παρακάτω πίνακα.

Κεφάλαιο 6. Πολυστοχικό μοντέλο ανάλυσης χαρτοφυλακίου με αξιολόγηση κινδύνου και ανάλυση ευρωστίας για την προώθηση της ενεργειακής αποδοτικότητας στην Ελλάδα

Πίνακας 6-1: Εθνικοί στόχοι εξοικονόμησης ενέργειας

| Έτος | Εξοικονόμηση ενέργειας κατ' έτος | | | | | | Συσσωρευτική Εξοικονόμηση |
|---------------|----------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|------------------------------|
| | ktoe | | | | | | |
| 2014 | 100,2 | | | | | | 100,2 |
| 2015 | 100,2 | 100,2 | | | | | 200,5 |
| 2016 | 100,2 | 100,2 | 125,3 | | | | 325,8 |
| 2017 | 100,2 | 100,2 | 125,3 | 125,3 | | | 451,0 |
| 2018 | 100,2 | 100,2 | 125,3 | 125,3 | 150,3 | | 601,4 |
| 2019 | 100,2 | 100,2 | 125,3 | 125,3 | 150,3 | 150,3 | 751,7 |
| 2020 | 100,2 | 100,2 | 125,3 | 125,3 | 150,3 | 150,3 | 902,1 |
| Σύνολο | | | | | | | 3.332,7 |

Ως ενδιάμεσοι περίοδοι για την παρακολούθηση της πορείας επίτευξης του συνολικού στόχου εξοικονόμησης ενέργειας, αλλά και των νέων εξοικονομήσεων ορίστηκαν (ΕΣΔΕΑ, 2014) α) η περίοδος 2014 έως 2015 με ενδιάμεσο συνολικό στόχο εξοικονόμησης ενέργειας 300,7 ktoe (3,5 TWh), β) η περίοδος 2016 έως 2018 με ενδιάμεσο συνολικό στόχο εξοικονόμησης ενέργειας 1.678,9 ktoe (19,5 TWh).

Για την εκπλήρωση του στόχου εξοικονόμησης ενέργειας, το ΕΣΔΕΑ του 2014 προέβλεψε 18 κατάλληλα ισοδύναμα μέτρα πολιτικής για την εξασφάλιση εξοικονόμησης ενέργειας αποκλειστικά στους τελικούς καταναλωτές, χωρίς τη θέσπιση καθεστώτων επιβολής υποχρέωσης ενεργειακής απόδοσης σε υπόχρεα μέρη (εταιρείες λιανικής πώλησης ενέργειας και διανομείς ενέργειας) (ΕΣΔΕΑ, 2014). Συμπληρωματικά σύμφωνα με το άρθρο 9 του Νόμου 4342/2015, που αποτελεί την εναρμόνιση της Οδηγίας 2012/27/ΕΕ στην Εθνική νομοθεσία, επιπρόσθετα των εναλλακτικών μέτρων πολιτικής που περιγράφηκαν στο ΕΣΔΕΑ του 2014, από την 1^η Ιανουαρίου 2017 θεσπίζεται καθεστώς επιβολής της υποχρέωσης ενεργειακής απόδοσης, με το οποίο εξασφαλίζεται ότι οι διανομείς ενέργειας ή/ και οι εταιρείες λιανικής πώλησης ενέργειας που ορίζονται ως υπόχρεα μέρη και λειτουργούν στην Ελληνική Επικράτεια, επιτυγχάνουν έναν σωρευτικό στόχο εξοικονόμησης ενέργειας στην τελική χρήση έως τις 31 Δεκεμβρίου 2020.

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα που υποβλήθηκαν στην ετήσια έκθεση προόδου του έτους 2015 σχετικά με την επίτευξη του Εθνικού Στόχου Ενεργειακής Απόδοσης διαπιστώνεται απόκλιση από τον ενδιάμεσο στόχο του 2015. Πιο συγκεκριμένα, η συσσωρευτική εξοικονόμηση ενέργειας, η οποία τελικά επιτεύχθηκε, ισούται με 192,3 ktoe οδηγώντας σε απόκλιση 36% (απόκλιση 108,4 ktoe δεδομένου ότι ο ενδιάμεσος στόχος ισούται με 300,7 ktoe) (Ετήσια Έκθεση Επίτευξης Εθνικών Στόχων Ενεργειακής Απόδοσης, 2016).

Για την κάλυψη των συγκεκριμένων αποκλίσεων κρίθηκε απαραίτητο να δρομολογηθεί διαδικασία ανασχεδιασμού των μέτρων πολιτικής και να καθοριστεί το βέλτιστο χαρτοφυλάκιο πολιτικών λαμβάνοντας υπόψη την οικονομική αποδοτικότητα του κάθε μέτρου, τα διαθέσιμα κονδύλια και δίνοντας ιδιαίτερη έμφαση στην ενσωμάτωση του ρίσκου και της αβεβαιότητας στην επιτυχία των επιλεγμένων πολιτικών.

Σε αυτό το πλαίσιο σκοπό της παρούσας μελέτης αποτέλεσε ο καθορισμός του βέλτιστου χαρτοφυλακίου μέτρων πολιτικής λαμβάνοντας υπόψη την οικονομική αποδοτικότητα του κάθε μέτρου, τους διαθέσιμους οικονομικούς πόρους, καθώς και την ενσωμάτωση της επίδρασης του ρίσκου και της αβεβαιότητας στην επιτυχία των επιλεγμένων μέτρων πολιτικής. Προς αυτή την κατεύθυνση αξιοποιούνται δεδομένα σχετικά με τα εκτιμώμενα κόστη (€) και οφέλη (ktoe εξοικονόμησης ενέργειας) ενός συνόλου δεκαπέντε μέτρων πολιτικής και παρεμβάσεων εξοικονόμησης ενέργειας, καθώς και των εκτιμήσεων εμπειρογνομώνων σχετικά με την έκθεση των μέτρων αυτών στους ορατούς κινδύνους που ενδέχεται να επηρεάσουν την επιτυχία υλοποίησής τους, με σκοπό τον προσδιορισμό ενός χαρτοφυλακίου μέτρων που επιτυγχάνει τη βέλτιστη κατανομή των διαθέσιμων πόρων. Συγκεκριμένα, λαμβάνοντας υπόψη τα κόστη, τους πιθανούς κινδύνους και την υφιστάμενη αβεβαιότητα, προσδιορίζονται με τη συμμετοχή εμπειρογνομώνων: α) το κατάλληλο ενός συνόλου βέλτιστων χαρτοφυλακίων μέτρων πολιτικής που επιτυγχάνει εξ ολοκλήρου έναν δεδομένο στόχο εξοικονόμησης ενέργειας, με κριτήριο την ελαχιστοποίηση του κόστους και του ρίσκου που ενέχει και β) το κατάλληλο ενός συνόλου βέλτιστων χαρτοφυλακίων μέτρων πολιτικής που, για δεδομένο

Κεφάλαιο 6. Πολυστοχικό μοντέλο ανάλυσης χαρτοφυλακίου με αξιολόγηση κινδύνου και ανάλυση ευρωστίας για την προώθηση της ενεργειακής αποδοτικότητας στην Ελλάδα

διαθέσιμο προϋπολογισμό, επιτυγχάνει τη βέλτιστη κατανομή πόρων, με κριτήριο τη μεγιστοποίηση της εξοικονομούμενης ενέργειας και την ελαχιστοποίηση του ρίσκου που ενέχει. Με αυτόν τον τρόπο πραγματοποιείται μία ολοκληρωμένη προσέγγιση του προβλήματος που στοχεύει τόσο στον προσδιορισμό του βέλτιστου χαρτοφυλακίου μέτρων που πρέπει να υλοποιηθούν με βάση τους διαθέσιμους οικονομικούς πόρους, όσο και στον προσδιορισμό του βέλτιστου χαρτοφυλακίου μέτρων πολιτικής και του συνεπαγόμενου επιπρόσθετου κόστους που πρέπει να ανευρεθεί προκειμένου να επιτευχθεί ο στόχος εξοικονόμησης ενέργειας. Τα αποτελέσματα της παρούσας μελέτης χρησιμοποιήθηκαν από το Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργεια (ΥΠΕΝ) στο τέταρτο ΕΣΔΕΑ που δημοσιεύθηκε το 2018 με στόχο τον προγραμματισμό νέων μέτρων πολιτικής προς υλοποίηση την περίοδο 2017 – 2020 (ΕΣΔΕΑ, 2017). Η χρησιμοποίηση της μελέτης στην επιστημονική πλαισίωση των προσπάθειών για επανασχεδιασμό του εθνικού πλαισίου πολιτικής για την ενεργειακή αποδοτικότητα κατά την προετοιμασία τους τέταρτου ΕΣΔΕΑ, αποτελεί μια από τις καινοτομίες της μελέτης, η οποία πλαισιώνεται από τα καινοτόμα στοιχεία σε επίπεδο τεχνικής υλοποίησης, όπως αυτά περιγράφονται παρακάτω.

Συγκεκριμένα, προκειμένου να μοντελοποιηθούν τα δύο παραπάνω προβλήματα και εφόσον η ανάλυση αφορά δύο κριτήρια βελτιστοποίησης, κρίθηκε απαραίτητη η χρήση μιας πολυκριτήριας τεχνικής βελτιστοποίησης. Λόγω της φύσης του προβλήματος ως ακέрайου μαθηματικού προγραμματισμού, η μέθοδος που επιλέγεται είναι η AUGMECON 2. Είναι χαρακτηριστικό ότι η οικογένεια των μεθόδων της AUGMECON δίνει τη δυνατότητα επιλογής της πυκνότητας του πλέγματος για την εξαγωγή του μετώπου Pareto, ενώ παράλληλα η μέθοδος AUGMECON2 και οι βελτιωμένες εκδοχές της μεθόδου που προτείνονται στην παρούσα διατριβή παράγουν το πλήρες μέτωπο Pareto στα προβλήματα πολυκριτηριακού ακέрайου προγραμματισμού. Το πρόβλημα βελτιστοποίησης προσεγγίζεται ως ένα πρόβλημα ανάλυσης χαρτοφυλακίου μέτρων πολιτικής, με κριτήρια βελτιστοποίησης τη μεγιστοποίηση της εξοικονόμησης ενέργειας (ή ελαχιστοποίηση του κόστους) και την ελαχιστοποίηση του κινδύνου. Η προσέγγιση της ανάλυσης χαρτοφυλακίου στον ενεργειακό τομέα έχει χρησιμοποιηθεί σε διαφορετικές μελέτες της βιβλιογραφίας (Bazilian and

Roques, 2008, Pérez Odeh et al., 2018). Στις καινοτομίες της παρούσας μελέτης προστίθεται η ενσωμάτωση της έννοιας του κινδύνου και η διαχείριση της αβεβαιότητας, στοιχεία εγγενή στο σχεδιασμό εύρωστων ενεργειακών μοντέλων, λόγω των προκλήσεων που θέτουν οι αβέβαιες οικονομικές δυναμικές της ενεργειακής αγοράς, η γεωπολιτική αστάθεια και οι ασταθείς χρηματοπιστωτικές αγορές (Zhang and Chen, 2017). Πάνω στην έννοια του κινδύνου, ο Aven (2016) δίνει μια αναλυτική βιβλιογραφική ανασκόπηση αναγνωρίζοντας προοπτικές και προσεγγίσεις εννοιολογικοποίησης, αξιολόγησης και διαχείρισης κινδύνων. Ειδικά για το πεδίο του ενεργειακού σχεδιασμού, η εργασία των Ioannou et al. (2017) δίνει μία ολοκληρωμένη εικόνα των μεθόδων μοντελοποίησης κινδύνου και αβεβαιοτήτων, ενσωματώνοντας τις προοπτικές των εμπειρογνομόνων και λοιπών ενδιαφερόμενων φορέων. Οι κίνδυνοι που καλούνται να αντιμετωπίσουν οι φορείς χάραξης ενεργειακής πολιτικής είναι, όπως προκύπτει από τις μελέτες (Angelopoulos et al., 2017, Bürer and Wüstenhagen, 2008, Dóci and Gotchev, 2016, Enevoldsen, 2016, Gatzert and Kosub, 2016, Gatzert and Vogl, 2016, Holma et al., 2018, Kitzing, 2014, Marrero et al., 2015, Szumilo and Fuerst, 2017), οικονομικής, ρυθμιστικής, κοινωνικής, τεχνολογικής, πολιτικής και περιβαλλοντικής φύσεως. Υπό την επιρροή των παραπάνω προκλήσεων η παρούσα μελέτη επεκτείνει τις υπάρχουσες μελέτες στο πεδίο της ανάλυσης χαρτοφυλακίου στον ενεργειακό τομέα, εντάσσοντας την ανάλυση χαρτοφυλακίου σε μοντέλα πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης και ταυτόχρονα συνδυάζοντας τις υπάρχουσες πρακτικές με την ανάλυση κινδύνου και ευρωστίας και την επιτυχή συμμετοχή εμπειρογνομόνων στα πλαίσια της ανάλυσης. Η εν λόγω σύγκριση με βάση τις σημαντικότερες από τις προηγούμενες μελέτες από την οποία διαφαίνεται η αξία της παρούσας ανάλυσης δίνεται στον Πίνακα 6-2. Από τις μελέτες που παρουσιάζονται στον πίνακα, οι περισσότερες εξετάζουν χαρτοφυλάκια τεχνολογιών παραγωγής ενέργειας, ενώ τέσσερις αναφέρονται στην αξιολόγηση παρεμβάσεων εξοικονόμησης ενέργειας, αυτές των Bukarica and Tomšić (2017), Jackson (2010), Thollander et al. (2007) και Togeby et al. (2012). Από αυτές μόνο οι Togeby et al. (2012) συμπεριέλαβαν εμπειρογνώμονες στην διαδικασία αξιολόγησης του βέλτιστου χαρτοφυλακίου πολιτικής ενεργειακής αποδοτικότητας, ωστόσο στη συγκεκριμένη έρευνα

Κεφάλαιο 6. Πολυστοχικό μοντέλο ανάλυσης χαρτοφυλακίου με αξιολόγηση κινδύνου και ανάλυση ευρωστίας για την προώθηση της ενεργειακής αποδοτικότητας στην Ελλάδα

απουσιάζουν οι έννοιες του κινδύνου και της αβεβαιότητας που αποτελούν σημαντικό στοιχείο της παρούσας εργασίας. Ορισμένες μελέτες παρουσιάζουν εφαρμογές με διαχείριση αβεβαιότητας, ωστόσο αυτή εξετάζεται κατά κύριο λόγο ντετερμινιστικά υπό την μορφή σεναρίων, με μόνο δύο μελέτες να συνδυάζουν την ανάλυση χαρτοφυλακίου με ανάλυση ευρωστίας έναντι στοχαστικής αβεβαιότητας και τεχνικές ανάλυσης ρίσκου.

Πίνακας 6-2: Ανασκόπηση συναφών μελετών ανάλυσης χαρτοφυλακίου στον χώρο της ενέργειας

| Μελέτη | Ανάλυση Κινδύνου | Ανάλυση Χαρτοφυλακίου | Ανάλυση Ευρωστίας | Συμμετοχή Εμπειρογνομόνων |
|-------------------------------------|------------------|-----------------------|-------------------|---------------------------|
| Allan et al., 2011 | | x | Ντετερμινιστική | |
| Bistline, 2016 | x | x | Στοχαστική | x |
| Bukarica and Tomšić, 2017 | x | | | |
| Deluque et al., 2018 | x | x | Στοχαστική | |
| Huang and Wu, 2008 | x | x | Ντετερμινιστική | |
| Jackson, 2010 | x | | Στοχαστική | |
| Marrero et al., 2015 | x | x | Ντετερμινιστική | |
| Muñoz et al., 2009 | x | x | Ντετερμινιστική | |
| Pérez Odeh et al, 2018 | | x | | |
| Thollander et al., 2007 | x | | | |
| Togebay et al., 2012 | | x | | x |
| Vithayasrichareon and MacGill, 2012 | | x | Ντετερμινιστική | |
| Zhang and Chen, 2018 | x | x | Ντετερμινιστική | |
| Zhu and Fan, 2010 | | x | Ντετερμινιστική | |

Παράλληλα, κατανοώντας την αξία της συμμετοχής του ανθρώπινου παράγοντα στη γεφύρωση γνωσιακών χασμάτων (Nikas et al., 2017), ενσωματώθηκε η γνώση εμπειρογνομόνων του ελληνικού Υπουργείου Περιβάλλοντος και Ενέργειας σε δύο στάδια της ανάλυσης. Σε πρώτο επίπεδο αξιοποιήθηκε η γνώση και η εμπειρία των στελεχών του Υπουργείου προκειμένου να προσδιοριστούν και να αξιολογηθούν οι κίνδυνοι που σχετίζονται με την υλοποίηση της μελέτης. Σε δεύτερο επίπεδο και μετά την μοντελοποίηση και λύση του προβλήματος

Κεφάλαιο 6. Πολυστοχικό μοντέλο ανάλυσης χαρτοφυλακίου με αξιολόγηση κινδύνου και ανάλυση ευρωστίας για την προώθηση της ενεργειακής αποδοτικότητας στην Ελλάδα

βελτιστοποίησης, ζητήθηκε εκ νέου η συμμετοχή των εμπειρογνομόνων, με σκοπό την αξιολόγηση του συνόλου των προκύπτοντων χαρτοφυλακίων και τον προσδιορισμό εκείνου που οι εμπειρογνώμονες θεωρούν βέλτιστο σύμφωνα με τη δική τους προτεραιοποίηση της επίδοσης ως προς τα κριτήρια βελτιστοποίησης. Αυτή η δυναμική αλληλεπίδραση με τους εμπειρογνώμονες είναι ένα στοιχείο που παρά την σημαντικότητά του, σπάνια συναντάται σε ανάλογες μελέτες αξιολόγησης ενεργειακών χαρτοφυλακίων. Από τις μελέτες του Πίνακα 6-2, η πιο σημαντική όσον αφορά μελέτες με συμμετοχή εμπειρογνομόνων είναι η εργασία του Bistline (2016) στην οποία αξιοποιούνται εμπειρικές πληροφορίες προερχόμενες από εμπειρογνώμονες για την παραμετροποίηση ενός μοντέλου στοχαστικού προγραμματισμού προς την αποτίμηση προσπαθειών έρευνας και ανάπτυξης σε ενεργειακές τεχνολογίες. Ταυτόχρονα η μελέτη της βιβλιογραφίας του πίνακα δείχνει ότι στην πλειοψηφία τους οι μελέτες αφορούν την εκ των υστέρων ανάλυση μέτρων πολιτικής, με εξαίρεση την εργασία του Togeby et al. (2012) η οποία προσανατολίζεται στην υποστήριξη του σχεδιασμού νέων οικονομικών κινήτρων και φορολογικών μέτρων. Αποδεικνύεται δηλαδή παράλληλα η σημαντικότητα της εφαρμογής της προτεινόμενης μεθοδολογίας σε ένα ρεαλιστικό πρόβλημα για την υποστήριξη της Ελλάδας στην προσπάθεια επαναδόμησης του ΕΣΔΕΑ.

Η προτεινόμενη προσέγγιση παρουσιάζεται συνολικά στο ακόλουθο σχήμα.



Σχήμα 6-1: Μεθοδολογική Προσέγγιση

6.2 Μέθοδοι και Μοντέλα

Όπως εξηγήθηκε, στην παρούσα εφαρμογή εξετάζεται το πρόβλημα επιλογής βέλτιστων χαρτοφυλακίων ενεργειακών πολιτικών λαμβάνοντας υπόψη δύο βασικά κριτήρια: τη μεγιστοποίηση της εξοικονόμησης ενέργειας παράλληλα με την ελαχιστοποίηση του ρίσκου που αυτή ενέχει, θεωρώντας ως δεδομένο τον διαθέσιμο προϋπολογισμό. Επίσης, εξετάζεται το πρόβλημα επιλογής κατάλληλων χαρτοφυλακίων μέτρων πολιτικής που επιτυγχάνουν εξ ολοκλήρου έναν δεδομένο στόχο εξοικονόμησης ενέργειας για τα έτη 2018-2020, με κριτήρια την ελαχιστοποίηση του κόστους και του ρίσκου που ενέχει η υλοποίηση των επιλεγμένων μέτρων. Κατά την επίλυση του προβλήματος λαμβάνεται υπόψη η αβεβαιότητα που εμπεριέχεται στην ποσοτικοποίηση των επιδόσεων των πολιτικών και η συμμετοχή εμπειρογνομόνων στον προσδιορισμό και την αξιολόγηση των συνδεδεμένων με την εφαρμογή κινδύνων. Για την εφαρμογή του μοντέλου εξετάστηκαν δεκαπέντε (15) μέτρα εξοικονόμησης ενέργειας τα οποία επιλέχθηκαν στο 3^ο ΕΣΔΕΑ ώστε να καλύψουν τις υποχρεώσεις που απορρέουν από το Άρθρο 7. Τα επιλεγμένα μέτρα πολιτικής καλύπτουν στο σύνολό τους όλους τους τομείς της τελικής κατανάλωσης ενέργειας περιλαμβανομένων του οικιακού, του τριτογενούς τομέα, των μεταφορών, καθώς επίσης και των βιομηχανιών που εμπίπτουν στην Οδηγία 2003/87/ΕΚ και περιγράφονται αναλυτικά στη συνέχεια.

Πίνακας 6-3: Υπό εξέταση μέτρα πολιτικής

| A/A | Πολιτικές που επιλέχθηκαν |
|-----|--|
| M1 | Πρόγραμμα «Εξοικονόμηση κατ'οίκον» |
| M2 | Ενεργειακή αναβάθμιση δημοσίων κτιρίων |
| M3 | Έργα ενεργειακής απόδοσης και επίδειξης σε ΜΜΕ και μέτρα στήριξης |
| M4 | Εφαρμογή συστήματος ενεργειακής διαχείρισης με βάση το πρότυπο ISO 50001 σε φορείς του Δημόσιου και ευρύτερου δημόσιου τομέα |
| M5 | Ενεργειακή αναβάθμιση σε κτίρια επαγγελματικής χρήσης μέσω Επιχειρήσεων Ενεργειακών Υπηρεσιών |
| M6 | Ανάπτυξη ευφυών συστημάτων μέτρησης ενέργειας |
| M7 | Δράσεις ΕΠΠΕΡΑΑ |
| M8 | Συμφηφισμός προστίμων αυθαιρέτων |
| M9 | Ενεργειακοί υπεύθυνοι και ΣΔΕΑ |

Κεφάλαιο 6. Πολυστοχικό μοντέλο ανάλυσης χαρτοφυλακίου με αξιολόγηση κινδύνου και ανάλυση ευρωστίας για την προώθηση της ενεργειακής αποδοτικότητας στην Ελλάδα

| | |
|-----|--|
| M10 | Τηλεθέρμανση |
| M11 | Αντικατάσταση παλαιών ελαφριών φορτηγών δημοσίου και ιδιωτικού τομέα |
| M12 | Αντικατάσταση παλαιών επιβατικών οχημάτων ιδιωτικού τομέα |
| M13 | Οδοφωτισμός |
| M14 | Αντλιοστάσια |
| M15 | Πιστοποιητικά Ενεργειακής Απόδοσης |

M1. Πρόγραμμα "Εξοικονόμηση Κατ' Οίκον"

Το πρόγραμμα «Εξοικονόμηση κατ' οίκον» έχει ως στόχο την υποστήριξη δράσεων ενεργειακής αναβάθμισης των κατοικιών συμπεριλαμβανομένων τόσο των μονοκατοικιών όσο και των διαμερισμάτων ή πολυκατοικιών. Το συγκεκριμένο πρόγραμμα παρέχει χρηματοπιστωτική υποστήριξη στους δικαιούχους του, μέσω τμηματικής επιδότησης συνδυασμένης με δανειοδότηση από ένα από τα συμβαλλόμενα με το πρόγραμμα χρηματοπιστωτικά ιδρύματα. Τα κριτήρια εκλεξιμότητας που εφαρμόζονται αφορούν τόσο την αρχική ενεργειακή κατηγορία της κατοικίας όσο και την εισοδηματική κατάσταση του δικαιούχου. Τέλος, οι δράσεις που υποστηρίζονται από το πρόγραμμα πρέπει να οδηγούν σε συγκεκριμένη ενεργειακή αναβάθμιση της κατοικίας και αφορούν τόσο παρεμβάσεις ενεργειακής αναβάθμισης του κελύφους των κατοικιών όσο και των συστημάτων θέρμανσης, ψύξης και ζεστού νερού χρήσης.

M2. Ενεργειακή αναβάθμιση δημοσίων κτιρίων

Το πρόγραμμα ενεργειακής αναβάθμισης δημοσίων κτιρίων αφορά σε παρεμβάσεις εξοικονόμησης ενέργειας σε υφιστάμενα δημόσια κτίρια. Ειδικότερα οι παρεμβάσεις αφορούν παρεμβάσεις ενεργειακή αναβάθμιση του κτιριακού κελύφους, ενεργειακή αναβάθμιση των Η/Μ εγκαταστάσεων, αναβάθμιση του συστήματος φυσικού τεχνητού φωτισμού και εγκατάσταση συστήματος ενεργειακής διαχείρισης, ενώ η χρηματοδότηση αφορά το 100% του συνολικού κόστους.

M3. Έργα ενεργειακής απόδοσης και επίδειξης σε ΜΜΕ και μέτρα στήριξης

Κεφάλαιο 6. Πολυστοχικό μοντέλο ανάλυσης χαρτοφυλακίου με αξιολόγηση κινδύνου και ανάλυση ευρωστίας για την προώθηση της ενεργειακής αποδοτικότητας στην Ελλάδα

Το πρόγραμμα έχει ως τελικούς δικαιούχους τις ΜΜΕ και στοχεύει στην ενεργειακή αναβάθμιση των κτιρίων τους. Ειδικότερα οι παρεμβάσεις αφορούν παρεμβάσεις ενεργειακή αναβάθμιση του κτιριακού κελύφους, ενεργειακή αναβάθμιση των Η/Μ εγκαταστάσεων, αναβάθμιση του συστήματος φυσικού τεχνητού φωτισμού και εγκατάσταση συστήματος ενεργειακής διαχείρισης. Το συγκεκριμένο πρόγραμμα παρέχει χρηματοδοτική υποστήριξη στους δικαιούχους του μέσω τμηματικής επιδότησης, το ποσοστό της οποίας κυμαίνεται ανάλογα με την γεωγραφική θέση του δικαιούχου καθώς και τον συνδυασμό των παρεμβάσεων.

M4. Εφαρμογή συστήματος ενεργειακής διαχείρισης με βάση το πρότυπο ISO 50001 σε φορείς του Δημόσιου και ευρύτερου δημόσιου τομέα

Το πρόγραμμα αφορά τη χρηματοδότηση των φορέων του Δημοσίου και ευρύτερου Δημοσίου τομέα με στόχο την εφαρμογή συστήματος ενεργειακής διαχείρισης στα κτίρια τους και πιστοποίησης του σύμφωνα με το διεθνές πρότυπο ISO 50001.

M5. Ενεργειακή αναβάθμιση σε κτίρια επαγγελματικής χρήσης μέσω Επιχειρήσεων Ενεργειακών Υπηρεσιών

Το πρόγραμμα στοχεύει στην περεταίρω ανάπτυξη της αγοράς των ενεργειακών υπηρεσιών μέσω συμβάσεων ενεργειακής απόδοσης. Ειδικότερα το πρόγραμμα παρέχει ευνοϊκές συνθήκες δανειοδότησης των εταιρειών ενεργειακής υπηρεσιών (ESCOs) μέσω επιδοτούμενων επιτοκίων ή παροχής εγγυήσεων, με στόχο την υλοποίηση έργων ενεργειακής αναβάθμισης σε κτίρια επαγγελματικής χρήσης τα οποία θα αποπληρώνονται σταδιακά μέσω της επιτευχθείσας εξοικονόμησης και σύμφωνα με τα οριζόμενα στην σύμβαση ενεργειακής απόδοσης.

M6. Ανάπτυξη ευφυών συστημάτων μέτρησης ενέργειας

Το πρόγραμμα αφορά την ευρείας κλίμακας αντικατάσταση υφιστάμενων συστημάτων μέτρησης της τελικής κατανάλωσης ενέργειας στο Δίκτυο Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας από τον Διαχειριστή (ΔΕΔΔΗΕ), με αντίστοιχα ευφυή

συστήματα, η οποία αποσκοπεί ιδίως στη δυνατότητα ενεργού συμμετοχής των καταναλωτών στην αγορά ενέργειας αλλά και γενικότερα στην αποτελεσματικότερη και οικονομικότερη διαχείρισης της.

M7. Δράσεις ΕΠΠΕΡΑΑ / ΥΜΕΠΠΕΡΑΑ

Το Επιχειρησιακό Πρόγραμμα «Περιβάλλον - Αειφόρος Ανάπτυξη» (ΕΠΠΕΡΑΑ) εντάσσεται στο ΕΣΠΑ 2007 – 2013 ενώ το αντίστοιχο ΕΠ «Υποδομές Μεταφορών, Περιβάλλον και Αειφόρος Ανάπτυξη» (ΥΜΕΠΠΕΡΑΑ) στο ΕΣΠΑ 2014 – 2020 και περιλαμβάνουν μια σειρά δράσεων, έργων περιβαλλοντικών υποδομών μεγάλης κλίμακας και δράσεις εθνικής εμβέλειας, η υλοποίηση των οποίων συμβάλει στην αειφορική διαχείριση των περιβαλλοντικών μέσων, του φυσικού αποθέματος και των αστικών κέντρων. Στρατηγικός στόχος τους είναι η προστασία και αναβάθμιση του περιβάλλοντος ώστε να αποτελέσει το υπόβαθρο για την άνοδο της ποιότητας ζωής των πολιτών καθώς και η βελτίωση της ανταγωνιστικότητας της οικονομίας. Οι συγκεκριμένες δράσεις του προγράμματος που εντάσσονται στο μέτρο αυτό αφορούν συγκεκριμένα παρεμβάσεις βελτίωσης ενεργειακής αποδοτικότητας.

M8. Συμψηφισμός προστίμων αυθαιρέτων

Το μέτρο αναφέρεται στις επιτευχθείσες εξοικονομήσεις ενέργειας από τις παρεμβάσεις που υλοποιούνται σύμφωνα με το καθεστώς που ορίζεται από το Άρθρο 20 του Νόμου 4178/2013. Ειδικότερα βάση του εν λόγω Άρθρου δίνεται η δυνατότητα να εφαρμόζεται συμψηφισμός των ποσών που καταβάλλονται για αμοιβές υπηρεσιών, εργασίες και υλικά για την ενεργειακή αναβάθμιση των κτιρίων με τα ποσά του ειδικού προστίμου που προβλέπονται στον προαναφερθέντα νόμο και έως το ποσοστό 50% του προβλεπόμενου ειδικού προστίμου.

M9. Ενεργειακοί υπεύθυνοι και ΣΔΕΑ

Το μέτρο αναφέρεται στην επιταχθείσα εξοικονόμηση ενέργειας από την εφαρμογή των καθηκόντων των ενεργειακών υπευθύνων των δημοσίων κτιρίων όπως αυτά ορίζονται στην Υπουργική Απόφαση Αριθμ. Δ6/Β/14826/ 2008

Κεφάλαιο 6. Πολυστοχικό μοντέλο ανάλυσης χαρτοφυλακίου με αξιολόγηση κινδύνου και ανάλυση ευρωστίας για την προώθηση της ενεργειακής αποδοτικότητας στην Ελλάδα

καθώς και μέσω της υλοποίησης των σχεδίων ενεργειακής απόδοσης για τα κτίρια των περιφερειών και δήμων σύμφωνα με τα οριζόμενα στο Άρθρο 7 παράγραφος 12 του Νόμου 4342/2015.

M10. Τηλεθέρμανση

Το μέτρο αφορά την επιτευχθείσα εξοικονόμηση ενέργειας από την επέκταση του δικτύου τηλεθέρμανσης πόλεων μέσω του προγράμματος ΕΠΠΕΡΡΑ και ΥΜΕΠΠΕΡΡΑ. Ειδικότερα αφορά τις εξοικονομήσεις ενέργειας από την ολοκληρωμένη επέκταση του δικτύου Πτολεμαΐδας και Αμυνταίου καθώς και τις σχεδιαζόμενες επεκτάσεις των δικτύων τηλεθέρμανσης Φλώρινας και Κοζάνης.

M11. Αντικατάσταση παλαιών ελαφριών φορτηγών δημοσίου και ιδιωτικού τομέα

Το μέτρο εντάσσεται στο ευρύτερο πλαίσιο δράσεων παροχής κινήτρων για την απόσυρση των οχημάτων παλαιάς τεχνολογίας ή μεγάλης ηλικίας με στόχο την εξοικονόμηση ενέργειας και την ανανέωση και εκσυγχρονισμό του στόλου ελαφριών φορτηγών δημοσίου και ιδιωτικού τομέα, ενώ τα κίνητρα απόσυρσης κλιμακώνονται με την κατηγορία και τον κυβισμό του οχήματος που αποσύρεται.

M12. Αντικατάσταση παλαιών επιβατικών οχημάτων ιδιωτικού τομέα

Το μέτρο εντάσσεται στο ευρύτερο πλαίσιο δράσεων παροχής κινήτρων για την απόσυρση των οχημάτων παλαιάς τεχνολογίας ή μεγάλης ηλικίας με στόχο την εξοικονόμηση ενέργειας και την ανανέωση και εκσυγχρονισμό του στόλου επιβατικών οχημάτων ιδιωτικού τομέα, ενώ τα κίνητρα απόσυρσης κλιμακώνονται με την κατηγορία και τον κυβισμό του οχήματος που αποσύρεται.

M13. Οδοφωτισμός

Το πρόγραμμα στοχεύει στην μείωση της αυξημένης ενεργειακής κατανάλωσης και του συσχετιζόμενου λειτουργικού κόστους που αντιμετωπίζουν οι ΟΤΑ για την κάλυψη των αναγκών του οδοφωτισμού. Το πρόγραμμα παρέχει χρηματοδότηση μέσω δανεισμού για την ενεργειακή αναβάθμιση των δικτύων του δημοτικού οδοφωτισμού και υλοποιείται από το Ταμείο Παρακαταθηκών και

Δανείων (ΤΠΔ) σε συνεργασία με την Ευρωπαϊκή Τράπεζα Επενδύσεων (ΕΤΕπ) καθώς και με την τεχνική υποστήριξη του Κέντρου Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΚΑΠΕ).

M14. Αντλιοστάσια

Το πρόγραμμα στοχεύει στην μείωση της αυξημένης ενεργειακής κατανάλωσης και του συσχετιζόμενου λειτουργικού κόστους που αντιμετωπίζουν οι Δήμοι και οι Δημοτικές υπηρεσίες ύδρευσης για την άντληση των υδάτων. Ειδικότερα το πρόγραμμα παρέχει χρηματοδότηση μέσω δανεισμού για την ενεργειακή αναβάθμιση των αντλιοστασίων.

M15. Πιστοποιητικά Ενεργειακής Απόδοσης

Το συγκεκριμένο μέτρο αναφέρεται στην εξοικονόμηση ενέργειας που επιτυγχάνεται μέσω της ενημέρωσης και αλλαγής της συμπεριφοράς των ιδιοκτητών ή ενοικιαστών κτιρίων που εκδίδουν ενεργειακά πιστοποιητικά, μη έχοντας υποχρέωση, επηρεαζόμενοι από την διάδοση του μέτρου μέσω των δράσεων προώθησης του υπουργείου.

Σε συνέχεια της επιλογής των δράσεων επόμενο ζητούμενο αποτέλεσε η συλλογή των δεδομένων που χρησιμοποιήθηκαν για την μοντελοποίηση του προβλήματος. Τα δεδομένα προήλθαν από εκτιμήσεις και υπολογισμούς του ΥΠΕΝ. Η μεθοδολογία προσδιορισμού για την επιτευχθείσα εξοικονόμηση ενέργειας διαφέρει ανά μέτρο πολιτικής και ανά περίπτωση χρησιμοποιούνται οι μεθοδολογίες της κλιμακωτή είτε της προβλεπόμενης εξοικονόμησης. Η ποσοτική ανάλυση του σεναρίου για τον καθορισμό του εθνικού στόχου ενεργειακής απόδοσης πραγματοποιήθηκε με την βοήθεια των μαθηματικών μοντέλων TIMES, WASP IV και COST. Βασικό επόμενο βήμα αποτελεί η διατύπωση του μοντέλου που περιγράφει το πρόβλημα. Στο στάδιο αυτό γίνεται η δήλωση των παραμέτρων της κάθε πολιτικής και η διατύπωση των αντικειμενικών συναρτήσεων και των περιορισμών. Οι παράμετροι του προβλήματος προήλθαν από τα δεδομένα και τις εκτιμήσεις του ΥΠΕΝ, αλλά οπωσδήποτε περιλαμβάνουν αβεβαιότητα. Όσον αφορά τις αντικειμενικές συναρτήσεις, αυτές επιλέγονται με

βάση τα κριτήρια βελτιστοποίησης του προβλήματος. Σε προβλήματα πολυστοχικής βελτιστοποίησης, ο τελικός στόχος είναι η επιλογή του πλέον προτιμητέου μεταξύ των Pareto βέλτιστων λύσεων που παράγονται (Manrotas et al., 2015b). Ωστόσο, στην περίπτωση της αβεβαιότητας, τα αποτελέσματα τυπικά παρουσιάζουν υψηλά επίπεδα αστάθειας, τα οποία σε ορισμένες περιπτώσεις καταλήγουν σε λύσεις που απέχουν πολύ από το βέλτιστο (Manrotas et al., 2015a). Έτσι, αυτό το βήμα αποσκοπεί στον προσδιορισμό του βαθμού ευρωστίας του συνόλου Pareto και του καθενός Pareto βέλτιστου χαρτοφυλακίου, στην περίπτωση μεταβολών στις παραμέτρους του μοντέλου. Αναλυτική περιγραφή των επιμέρους μεθόδων και μοντέλων που χρησιμοποιούνται στα πλαίσια της παρούσας ανάλυσης δίνονται στα επόμενα.

6.2.1 Συγκέντρωση δεδομένων για τα υπό εξέταση μέτρα πολιτικής

Τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν στη μοντελοποίηση του προβλήματος προήλθαν από εκτιμήσεις και υπολογισμούς του Υπουργείου Περιβάλλοντος και Ενέργειας. Συγκεκριμένα, για τον υπολογισμό του εθνικού ενδεικτικού στόχου λήφθηκαν υπόψη οι συνθήκες που επηρεάζουν την κατανάλωση πρωτογενούς και τελικής ενέργειας, καθώς και οι εκτιμήσεις εξέλιξης των βασικών μεγεθών της ελληνικής οικονομίας μέχρι το 2020 και του ενεργειακού μείγματος, όπως είχαν διαμορφωθεί κατά την περίοδο προετοιμασίας του τρίτου ΕΣΔΕΑ. Στην προσπάθεια υπολογισμού του στόχου εκτιμήθηκε η εξέλιξη της οικονομικής αποτελεσματικότητας των τεχνολογιών βελτίωσης της ενεργειακής απόδοσης έως το 2020, καθώς και η εφαρμογή συγκεκριμένων πολιτικών και δράσεων για το σύνολο των ενεργειακών τομέων. Συγκεκριμένα χρησιμοποιήθηκε ένα «από κάτω προς τα πάνω, οδηγούμενο από τη ζήτηση» ενεργειακό μοντέλο βελτιστοποίησης, το μοντέλο TIMES. Το μοντέλο TIMES χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό του συνδυασμού του ελαχίστου κόστους τεχνολογιών και μορφών ενέργειας που εξυπηρετεί τη ζήτηση ωφέλιμης ενέργειας υπό περιορισμούς, όπως είναι για παράδειγμα το επίπεδο διείσδυσης των ΑΠΕ και οι εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου από τον ενεργειακό τομέα. Αυτό επιτυγχάνεται ενσωματώνοντας υποθέσεις για την εξέλιξη των μακροοικονομικών στοιχείων της χώρας, των διεθνών τιμών της ενέργειας των διαθέσιμων ενεργειακών τεχνολογιών και της

Κεφάλαιο 6. Πολυστοχικό μοντέλο ανάλυσης χαρτοφυλακίου με αξιολόγηση κινδύνου και ανάλυση ευρωστίας για την προώθηση της ενεργειακής αποδοτικότητας στην Ελλάδα

εξέλιξης του κόστους αυτών αλλά και την πορεία εφαρμογής μέτρων βελτίωσης ενεργειακής απόδοσης και τελικά περιγράφοντας το σύνολο του ενεργειακού τομέα της χώρας. Το σύνολο των τεχνικών δεδομένων για τις προς εξέταση πολιτικές ταυτίζονται με τα επίσημα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν για την προετοιμασία του σχετικού τμήματος του τέταρτου ΕΣΔΕΑ.

Αυτά αφορούν:

- Το κόστος κάθε μέτρου (Euro)
- Την εξοικονόμηση τελικής ενέργειας (kTOE) ανά παρέμβαση
- Την οικονομική αποδοτικότητα των μέτρων (Euro/kTOE)
- Το συνολικό διαθέσιμο προϋπολογισμό από πλευράς υπουργείου
- Τη μόχλευση ιδιωτικών κεφαλαίων ανά μέτρο
- Τον αριθμό εφικτών παρεμβάσεων / έτος
- Το συνολικό αριθμό παρεμβάσεων
- Τον χρονισμό στην υλοποίηση των μέτρων

Παρακάτω παρουσιάζονται αναλυτικά τα δεδομένα για την οικονομική αποδοτικότητα των μέτρων και τον αριθμό των εφικτών παρεμβάσεων.

Πίνακας 6-4: Κεφάλαιο ανά μονάδα εξοικονόμησης ενέργειας.

| A/A | Πολιτικές που επιλέχθηκαν | Κεφάλαιο ανά μονάδα εξοικονόμησης - συμμετοχή υπουργείου (€/kTOE) |
|-----|--|---|
| M1 | 2 ^ο πρόγραμμα «Εξοικονόμηση κατ'οίκον» | 4,56 εκατ. |
| M2 | Ενεργειακή αναβάθμιση δημοσίων κτιρίων | 13,6 εκατ. |
| M3 | Έργα ενεργειακής απόδοσης και επίδειξης σε ΜΜΕ και μέτρα στήριξης | 4,76 εκατ. |
| M4 | Εφαρμογή συστήματος ενεργειακής διαχείρισης με βάση το πρότυπο ISO 50001 σε φορείς του Δημόσιου και ευρύτερου δημόσιου τομέα | 1,66 εκατ. |
| M5 | Ενεργειακή αναβάθμιση σε κτίρια επαγγελματικής χρήσης μέσω Επιχειρήσεων Ενεργειακών Υπηρεσιών | 1,47 εκατ. |
| M6 | Ανάπτυξη ευφών συστημάτων μέτρησης ενέργειας | 49,04 εκατ. |
| M7 | Δράσεις ΕΠΠΕΡΑΑ | 28,79 εκατ. |
| M8 | Συμφηφισμός προστίμων αυθαιρέτων | 1,25 εκατ. |
| M9 | Ενεργειακοί υπεύθυνοι και ΣΔΕΑ | 0,92 εκατ. |
| M10 | Τηλεθέρμανση | 78,94 εκατ. |
| M11 | Αντικατάσταση παλαιών ελαφριών φορτηγών δημοσίου και ιδιωτικού τομέα | 5,42 εκατ. |
| M12 | Αντικατάσταση παλαιών επιβατικών οχημάτων ιδιωτικού τομέα | 7,38 εκατ. |
| M13 | Οδοφωτισμός | 0 |
| M14 | Αντλιοστάσια | 0 |
| M15 | ΠΕΑ | 0 |

Κεφάλαιο 6. Πολυστοχικό μοντέλο ανάλυσης χαρτοφυλακίου με αξιολόγηση κινδύνου και ανάλυση ευρωστίας για την προώθηση της ενεργειακής αποδοτικότητας στην Ελλάδα

Πίνακας 6-5: Μέγιστος αριθμός παρεμβάσεων

| A/A | Πολιτικές που επιλέχθηκαν | Μέγιστος αριθμός παρεμβάσεων ανά έτος | Συνολικός αριθμός παρεμβάσεων |
|-----|--|---------------------------------------|-------------------------------|
| M1 | 2 ^ο πρόγραμμα «Εξοικονόμηση κατ'οίκον» | 20000 | 3000000 |
| M2 | Ενεργειακή αναβάθμιση δημοσίων κτιρίων | 360 | 65000 |
| M3 | Έργα ενεργειακής απόδοσης και επίδειξης σε ΜΜΕ και μέτρα στήριξης | 5000 | 150000 |
| M4 | Εφαρμογή συστήματος ενεργειακής διαχείρισης με βάση το πρότυπο ISO 50001 σε φορείς του Δημόσιου και ευρύτερου δημόσιου τομέα | 300 | 65000 |
| M5 | Ενεργειακή αναβάθμιση σε κτίρια επαγγελματικής χρήσης μέσω Επιχειρήσεων Ενεργειακών Υπηρεσιών | 100 | 20000 |
| M6 | Ανάπτυξη ευφών συστημάτων μέτρησης ενέργειας | 1000000 | 5540000 |
| M7 | Δράσεις ΕΠΠΕΡΑΑ | 69 | 1000000 |
| M8 | Συμφηφισμός προστίμων αυθαιρέτων | 174 | 1000000 |
| M9 | Ενεργειακοί υπεύθυνοι και ΣΔΕΑ | 30000 | 65000 |
| M10 | Τηλεθέρμανση | 1100 | 2000 |
| M11 | Αντικατάσταση παλαιών ελαφριών φορτηγών δημοσίου και ιδιωτικού τομέα | 4500 | 469200 |
| M12 | Αντικατάσταση παλαιών επιβατικών οχημάτων ιδιωτικού τομέα | 65000 | 3195300 |
| M13 | Οδοφωτισμός | 20 | 235 |
| M14 | Αντλιοστάσια | 1500 | 8125 |
| M15 | ΠΕΑ | 286 | 3000000 |

6.2.2 Ανάλυση Χαρτοφυλακίου με τη μέθοδο AUGMECON 2

Η επιλογή του βέλτιστου συνόλου μέτρων κλιματικής πολιτικής ή εξοικονόμησης ενέργειας σε ένα ευρύτερο πλαίσιο αντιμετώπισης της κλιματικής αλλαγής, καθώς και των ποσών που πρέπει να επενδυθούν σε αυτά προκειμένου να βελτιστοποιηθεί η απόδοση του συνόλου αυτού, μπορεί να θεωρηθεί ως ένα πρόβλημα επιλογής ενός βέλτιστου χαρτοφυλακίου που απαρτίζεται από περιουσιακά στοιχεία («assets»). Ο σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η προσέγγιση του προβλήματος προσδιορισμού ενός βέλτιστου χαρτοφυλακίου μέτρων ενεργειακής αποδοτικότητας με τη χρήση της θεωρίας χαρτοφυλακίου. Μία τέτοια προσέγγιση περιλαμβάνει την πραγματοποίηση στοχαστικών εκτιμήσεων για τη μελλοντική απόδοση των διαθέσιμων επιλογών, τον

προσδιορισμό ενός αποδοτικού συνόλου χαρτοφυλακίων βάσει αυτών των εκτιμήσεων, και την επιλογή ενός χαρτοφυλακίου που ανταποκρίνεται στις προτιμήσεις του επενδυτή (Markowitz, 1952).

Η αξιοποίηση της θεωρίας στο πλαίσιο της αξιολόγησης επενδυτικών σχεδίων για την ενεργειακή αποδοτικότητα και την κλιματική πολιτική αποτελεί μια αρκετά δημοφιλή προσέγγιση. Συγκεκριμένα, πολυάριθμες μελέτες έχουν αξιοποιήσει μεθοδολογίες της θεωρίας χαρτοφυλακίου με σκοπό την βελτιστοποίηση του μείγματος ηλεκτροπαραγωγής (π.χ. Allan et al., 2011, McLoughlin and Bazilian, 2006, Zon and Fuss, 2006 και Adabi et al., 2016). Ορισμένες εξ αυτών δίνουν έμφαση στις αγορές ηλεκτρισμού (π.χ. Siddiqui et al., 2016), ενώ άλλες στην προώθηση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (π.χ. Albrecht, 2007 για φωτοβολταϊκά και Santos-Alamillos et al., 2017 για αιολικά) ή την αξιολόγηση επενδύσεων σε προγράμματα έρευνας και ανάπτυξης (π.χ. Lemoine et al., 2012). Πιο σχετικά με το αντικείμενο της παρούσας εργασίας, σημαντικό μέρος της βιβλιογραφίας αφορά στη χρησιμοποίηση της θεωρίας χαρτοφυλακίου με σκοπό την αξιολόγηση μέτρων πολιτικής σχετικών με την εξοικονόμηση ενέργειας στον κτιριακό τομέα (π.χ. Westner and Madlener, 2010, Laurikka and Springer, 2003, Pugh et al., 2011 και Shakouri et al., 2015) ή τις μεταφορές (π.χ. Marrero et al., 2015 και Romejko and Nakano, 2017).

Ένα σημαντικό χαρακτηριστικό της θεωρίας χαρτοφυλακίου, το οποίο συνήθως εμποδίζει την περαιτέρω διάχυσή της σε αυτό τον χώρο προβλήματος, αφορά στον ακριβή προσδιορισμό των περιουσιακών στοιχείων και την πραγματοποίηση εκτιμήσεων σχετικών με την απόδοση αυτών στο μέλλον. Συνήθως, η υποστήριξη διαμόρφωσης πολιτικής στο συγκεκριμένο πλαίσιο απαιτεί κατάστρωση στρατηγικών με μεγάλο χρονικό ορίζοντα. Αντίθετα, η δυνατότητα προσδιορισμού συγκεκριμένων και αυστηρά καθορισμένων μέτρων πολιτικής, καθώς και πραγματοποίησης εκτιμήσεων ως προς την απόδοσή των, είναι περιορισμένη σε προβλήματα μακροπρόθεσμου χρονικού ορίζοντα. Εν προκειμένω, η παρούσα μελέτη αφορά στον προσδιορισμό ενός βέλτιστου χαρτοφυλακίου βραχυπρόθεσμων μέτρων πολιτικής (2018–2020), με αποτέλεσμα να επιτρέπεται η επίλυση του προβλήματος με τη χρήση

προσεγγίσεων βασισμένων στη θεωρία χαρτοφυλακίου. Τέλος, μία σπουδαία διάσταση της επιλεγμένης μεθοδολογίας σχετίζεται με την χαρακτηριστική της δυνατότητα να επιτρέπει την αξιολόγηση της αβεβαιότητας και του κινδύνου, εννοιών που αποκτούν ιδιαίτερη έκταση στον χώρο της κλιματικής πολιτικής και της ενεργειακής απόδοσης.

Στο συγκεκριμένο πρόβλημα ανάλυσης χαρτοφυλακίου, βελτιστοποιείται μία από τις δύο αντικειμενικές συναρτήσεις (π.χ. μεγιστοποίηση της εξοικονομούμενης ενέργειας), ενώ η άλλη (ρίσκο) μετατρέπεται σε περιορισμό. Για τους σκοπούς της μελέτης δομούνται και επιλύονται δυο προβλήματα βελτιστοποίησης, με διαφορετικές αντικειμενικές συναρτήσεις. Στόχος του πρώτου προβλήματος είναι να προσδιοριστεί το κατάλληλο χαρτοφυλάκιο μέτρων πολιτικής που επιτυγχάνει εξ ολοκλήρου τον στόχο εξοικονόμησης ενέργειας, με κριτήριο την ελαχιστοποίηση του κόστους και του ρίσκου που ενέχει, ενώ στόχος του δεύτερου προβλήματος είναι να προσδιοριστεί το κατάλληλο χαρτοφυλάκιο μέτρων πολιτικής που, για δεδομένο διαθέσιμο προϋπολογισμό, επιτυγχάνει τη βέλτιστη κατανομή πόρων, με κριτήριο τη μεγιστοποίηση της εξοικονομούμενης ενέργειας και την ελαχιστοποίηση του ρίσκου που ενέχει. Για το πρώτο πρόβλημα βελτιστοποίησης όπου θεωρείται ένα δεδομένο διαθέσιμο κεφάλαιο η πρώτη αντικειμενική του μοντέλου μαθηματικού προγραμματισμού εκφράζει τη μεγιστοποίηση της εξοικονόμησης ενέργειας μετρούμενη σε ktoe και έχει μοντελοποιηθεί ως εξής:

Αντικειμενική 1: Μεγιστοποίηση της εξοικονόμησης ενέργειας μετρούμενη σε ktoe

$$\begin{aligned} & \sum_{i=1}^{12} b(i, 1) * Sav(i, j) + 2 * \sum_{i=1}^{12} b(i, 2) * Sav(i, 2) + 3 * \sum_{i=1}^{12} b(i, 3) * Sav(i, 3) \\ & + \sum_{i=1}^{15} ktoe(i, 1) + 2 * \sum_{i=13}^{15} ktoe(i, 2) + 3 * \sum_{i=1}^{14} ktoe(i, 3) + 2 \\ & * ktoe(15,3) = \max Z_1 \end{aligned}$$

Η εξοικονόμηση ενέργειας που επιτυγχάνει κάθε μέτρο ($i = 1 \dots 15$) υπολογίζεται πολλαπλασιάζοντας την εξοικονόμηση ανά μονάδα κεφαλαίου $Sav(i, j)$ που αντιστοιχεί σε κάθε μέτρο με το ύψος του κεφαλαίου που θα επενδυθεί στην πολιτική $b(i, j)$. Το μοντέλο λαμβάνει υπόψη την σωρευτικότητα στην ποσοτικοποίηση της εξοικονόμησης κάθε μέτρου ανάλογα με τον αριθμό των ετών υλοποίησης του μέτρου βάση της διάρκειας ζωής του ($j = 1, 2, 3$ για τα έτη 2018, 2019, 2020 αντιστοίχως). Με την έννοια της σωρευτικότητας θεωρείται ότι εάν ένα έργο υλοποιηθεί κατά το τελευταίο έτος της ανάλυσης, τότε οι συσσωρευτικές εξοικονομήσεις που αντιστοιχούν στο μέτρο περιλαμβάνουν τις εξοικονομήσεις του μέτρου και για τα τρία έτη. Για τις πολιτικές που δεν απαιτούν οικονομική επένδυση προστίθεται η εξοικονόμηση ενέργειας σε κτοε όπως αυτή ορίζεται από τους εκάστοτε περιορισμούς που αναλύονται στη συνέχεια.

Η δεύτερη αντικειμενική του προβλήματος μοντελοποιείται ως εξής:

Αντικειμενική 2: Ελαχιστοποίηση του συνολικού κινδύνου του χαρτοφυλακίου

$$\sum_{i=1}^{15} \sum_{j=1}^3 Risk(i, j) = \min Z_2$$

Η δεύτερη αντικειμενική περιγράφει την ελαχιστοποίηση του ρίσκου να αποτύχουν οι κλιματικές πολιτικές που επιλέγονται να εφαρμοστούν. Σε κάθε πολιτική έχει αντιστοιχηθεί ένας δείκτης ρίσκου $RI(i)$ που προέκυψε από κατάλληλη επεξεργασία εκτιμήσεων εμπειρογνομόνων. Συγκεκριμένα οι εμπειρογνώμονες κλήθηκαν να αξιολογήσουν την πιθανή αρνητική επίδραση διαφόρων ρυθμιστικών, πολιτικών, κοινωνικών και οικονομικών ρίσκων στην ευόδωση των επιλεγμένων ενεργειακών-κλιματικών πολιτικών. Κατά την εισαγωγή τους στο μοντέλο οι προκύπτοντες δείκτες ρίσκου κάθε πολιτικής πολλαπλασιάζονται με κατάλληλους συντελεστές $d(i, j)$ που αντικατοπτρίζουν τη μεταβολή του ρίσκου ανάλογα με τη τελική συνεισφορά του μέτρου σε σχέση με το θεωρητικό δυναμικό υλοποίησης του μέτρου ανά έτος. Τελικά, ως κίνδυνος του χαρτοφυλακίου υπολογίζεται το άθροισμα των κινδύνων όλων των

επιμέρους μέτρων πολιτικής που το απαρτίζουν. Οι συντελεστές $d(i, j)$ έχουν την μορφή:

$$\frac{\text{Ετήσιες τελικές εξοικονομήσεις του μέτρου (kTOE)}}{\text{μέγιστες δυνατές παρεμβάσεις ανά έτος}}$$

Κατ' αντιστοιχία μοντελοποιείται και το δεύτερο πρόβλημα βελτιστοποίησης, με την πρώτη αντικειμενική συνάρτηση να αναφέρεται στην ελαχιστοποίηση του κόστους υλοποίησης των πολιτικών, αναζητούνται δηλαδή οι πολιτικές που επιτυγχάνουν την απαιτούμενη εξοικονόμηση με το ελάχιστο οικονομικό κόστος. Η δεύτερη αντικειμενική συνάρτηση ταυτίζεται με αυτή του πρώτου προβλήματος.

Ως μεταβλητές απόφασης $b(i, j)$ για τα μέτρα ($i = 1..12$) ορίζονται για κάθε έτος στην χρονική περίοδο 2018-2020 το κεφάλαιο που απαιτείται να επενδυθεί σε κάθε πολιτική από το Υπουργείο, ώστε να βελτιστοποιηθούν οι κατά περίπτωση αντικειμενικές συναρτήσεις. Για τα μέτρα $i = 13..15$ δεν απαιτείται η συνεισφορά του Υπουργείου και η υλοποίησή τους βασίζεται σε ιδιωτικά κεφάλαια. Για τα μέτρα αυτά ως μεταβλητές απόφασης ορίζονται οι εξοικονομήσεις ενέργειας σε kTOE ($ktoe(i, j)$) που προβλέπεται να επιτευχθούν κατά το εκάστοτε έτος της ανάλυσης.

Οι περιορισμοί που καθορίζουν τον εφικτό χώρο του προβλήματος βελτιστοποίησης είναι οι ακόλουθοι:

1. Περιορισμός συνολικού διαθέσιμου κεφαλαίου (περιορισμός ενεργός για το πρώτο πρόβλημα βελτιστοποίησης)

Ο περιορισμός βασίζεται στο γεγονός ότι το συνολικό διαθέσιμο κεφάλαιο για την εφαρμογή κλιματικών πολιτικών είναι περιορισμένο. Επομένως στην προκειμένη ορίζεται ένα μέγιστο διαθέσιμο κεφάλαιο το οποίο δεν επιτρέπεται να ξεπερνούν αθροιστικά οι μεταβλητές απόφασης, όπως ορίστηκαν παραπάνω.

$$b(i, j) \leq \text{MaxBudg}(i, j), \quad \forall i, j$$

2. Περιορισμός συνολικής εξοικονόμησης ενέργειας (περιορισμός ενεργός για το δεύτερο πρόβλημα βελτιστοποίησης)

Κεφάλαιο 6. Πολυστοχικό μοντέλο ανάλυσης χαρτοφυλακίου με αξιολόγηση κινδύνου και ανάλυση ευρωστίας για την προώθηση της ενεργειακής αποδοτικότητας στην Ελλάδα

Ο περιορισμός λαμβάνει υπόψη ένα συνολικό στόχο εξοικονόμησης ενέργειας που πρέπει να επιτευχθεί την χρονική περίοδο 2018-2020. Επομένως το σύνολο των εξοικονομήσεων των πολιτικών που θα επιλεγθούν από το μοντέλο πρέπει να ισούται με τον δεδομένο στόχο. Ο στόχος για την τριετία 2018-2020 τέθηκε ίσος με 1.819,4 ktoe.

$$\begin{aligned} & \sum_{i=1}^{12} b(i, 1) * Sav(i, j) + 2 * \sum_{i=1}^{12} b(i, 2) * Sav(i, 2) + 3 * \sum_{i=1}^{12} b(i, 3) * Sav(i, 3) \\ & + \sum_{i=1}^{15} ktoe(i, 1) + 2 * \sum_{i=13}^{15} ktoe(i, 2) + 3 * \sum_{i=1}^{14} ktoe(i, 3) + 2 \\ & * ktoe(15,3) = 1.819,4 \text{ ktoe} \end{aligned}$$

3. Περιορισμός κεφαλαίου για το Μέτρο 6 (ενεργός και στα δύο προβλήματα βελτιστοποίησης)

Το συγκεκριμένο μέτρο θεωρείται ότι δεσμεύει ένα συγκεκριμένο χρηματικό ποσό το οποίο δεν μπορεί να διατεθεί σε κάποιο από τα υπόλοιπα μέτρα. Επομένως, από το συνολικό διαθέσιμο κεφάλαιο, ένα ποσό αφορά αποκλειστικά την υλοποίηση του μέτρου M6 και το υπόλοιπο μοιράζεται για την υλοποίηση των υπολοίπων μέτρων M1-M15, πλην του M6.

$$\sum_{j=1}^3 b(M6, j) \leq BudgM6$$

1. Περιορισμός δυνατών παρεμβάσεων ανά έτος (ενεργός και στα δύο προβλήματα βελτιστοποίησης)

Η υλοποίηση κάθε μέτρου αντιστοιχεί σε συγκεκριμένο αριθμό παρεμβάσεων. Ο συγκεκριμένος περιορισμός θέτει ένα άνω όριο στον αριθμό παρεμβάσεων που είναι δυνατόν να επιτευχθούν ανά έτος για κάθε μέτρο και αφορά περισσότερο το τεχνικό δυναμικό για την υλοποίηση του μέτρου.

$$Interv(i, j) \leq MaxInterv(i, j), \quad \forall i, j$$

4. Περιορισμός συνολικών μέγιστων δυνατών παρεμβάσεων (ενεργός και στα δύο προβλήματα βελτιστοποίησης)

Ο περιορισμός αναφέρεται στο σύνολο των εν δυνάμει παρεμβάσεων που μπορούν να υλοποιηθούν θεωρητικά για το κάθε μέτρο (για παράδειγμα συνολικός αριθμός δημοσίων κτιρίων για ένα μέτρο αντίστοιχο με την ενεργειακή αναβάθμιση δημοσίων κτιρίων).

$$ThInterv(M2, j) \leq MaxThInterv(M2, j), \quad \forall j$$

6.2.3 Προτεινόμενο πλαίσιο ανάλυσης αβεβαιότητας

Με στόχο τη μεγιστοποίηση της ευρωστίας των αποτελεσμάτων της παρούσας μελέτης, οι έννοιες της αβεβαιότητας και του κινδύνου ενσωματώνονται με δύο διακριτούς αλλά συμπληρωματικούς τρόπους. Αρχικά, υπολογίζεται ένας δείκτης κινδύνου, συναρτήσει συγκεκριμένων ρίσκων που αφορούν σε διαφορετικό βαθμό το εκάστοτε μέτρο πολιτικής και απορρέουν από την συνολική αβεβαιότητα. Ο δείκτης αυτός αξιοποιείται σε μία σχετική αντικειμενική συνάρτηση κινδύνου. Επιπλέον, πραγματοποιείται στοχαστική ανάλυση ευαισθησίας των αποτελεσμάτων σε συνθήκες αβεβαιότητας ως προς την απόδοση των διαθέσιμων μέτρων προς υλοποίηση σε όρους εξοικονόμησης ενέργειας. Οι προσεγγίσεις αυτές έχουν ως στόχο την ανάλυση ευρωστίας των αποτελεσμάτων, δηλαδή να μελετηθούν οι συνέπειες που υφίσταται η βέλτιστη λύση του πολυκριτηριακού μοντέλου, ως συνέπεια των αλλαγών στις τιμές των παραμέτρων του.

Συγκεκριμένα, η πρώτη διάσταση αφορά σε κινδύνους που με γνώμονα τη σχετική βιβλιογραφία και συνεντεύξεις με εμπειρογνώμονες έχουν αναγνωριστεί και μπορούν να αξιολογηθούν ποιοτικά από εμπειρογνώμονες (ως προς την πιθανότητα να εμφανιστούν και την έκταση της επίδρασής τους). Η δεύτερη διάσταση αφορά στο ευρύτερο πλαίσιο αβεβαιότητας ως προς την απόδοση των μέτρων πολιτικής, η οποία ενδέχεται να επηρεαστεί από «a priori» άγνωστους κινδύνους. Με τον τρόπο αυτό, επιτυγχάνεται η ανάλυση της αβεβαιότητας συνολικά, τόσο στοχευμένα ως προς τη διάσταση των ορατών κινδύνων που ενδέχεται να επηρεάσουν την αποδοτικότητα του χαρτοφυλακίου, όσο και σε ένα γενικευμένο πλαίσιο αβεβαιότητας από το οποίο απορρέουν κίνδυνοι που δεν είναι ορατοί σε μία «ex-ante» ανάλυση.

6.2.3.1 Υπολογισμός δεικτών κινδύνου για κάθε μέτρο παρέμβασης

Προκειμένου να υπολογιστεί ένας δείκτης κινδύνου για κάθε μέτρο παρέμβασης, απαιτείται η αξιολόγηση κάθε ενός εκ των μέτρων με κριτήριο τους διαφορετικούς ορατούς κινδύνους που έχουν αναγνωρισθεί, μετά από λεπτομερή βιβλιογραφική ανασκόπηση και συνεντεύξεις με εμπειρογνώμονες. Έτσι, διαμορφώνεται ένα πολυκριτηριακό πρόβλημα, στο οποίο τα μέτρα πολιτικής αποτελούν τις εναλλακτικές μορφές δράσεις και οι αναγνωρισμένοι κίνδυνοι τα διαφορετικά κριτήρια αξιολόγησης. Ταυτόχρονα, αποτελεί ένα πρόβλημα για την επίλυση του οποίου απαιτείται η αξιοποίηση της γνώσης και αντίληψης ενός συνόλου ανθρώπων που είναι έμπειροι στον χώρο και τη φύση του προβλήματος απόφασης. Για να προσδιοριστούν και να αξιολογηθούν τα ρίσκα που σχετίζονται με την παρούσα μελέτη πραγματοποιήθηκαν συζητήσεις με εμπειρογνώμονες του Υπουργείου Περιβάλλοντος και Ενέργειας. Οι συζητήσεις αυτές κατέληξαν στην αποτύπωση των σημαντικότερων κινδύνων που απορρέουν από τις αβεβαιότητες της ελληνικής πραγματικότητας και απειλούν την επιτυχή υλοποίηση των επιλεγθέντων μέτρων. Στις αρχικές συζητήσεις οι εμπειρογνώμονες εστίασαν σε εξωγενείς παράγοντες που αποτελούν κίνδυνο για την επιτυχία των μέτρων. Σε αυτό το επίπεδο ως σημαντικός κίνδυνος αναγνωρίζεται η κοινωνική ανταπόκριση στην υλοποίηση των μέτρων του οικιακού τομέα, που αποτελεί και το μεγαλύτερο ποσοστό του κτιριακού τομέα της χώρας (79%) (Gaglia et al., 2017). Οι πολίτες καλούνται να αναγνωρίσουν τα οφέλη των ενεργειακά βιώσιμων λύσεων, και η πολιτεία να ενθαρρύνει την υιοθέτησή τους προσφέροντας οικονομικά κίνητρα και διατηρώντας το σχετικό ρυθμιστικό πλαίσιο σταθερό. Έπειτα είναι σημαντικό να αξιοποιηθεί η εμπειρία από προηγούμενες αρνητικές εμπειρίες του κοινού σχετικά με τα εξεταζόμενα μέτρα, όπως παραδείγματος χάριν αυτές που σχετίζονται με το μέτρο «Εξοικονόμηση κατ' οίκον». Τα πιο συχνά εμπόδια που συναντώνται σε σχετικά προγράμματα είναι η επιβαρυσμένη γραφειοκρατία κατά τη διαδικασία αιτήσεων καθώς και η αδυναμία των χρηματοπιστωτικών ιδρυμάτων να υποστηρίξουν οικονομικά αντίστοιχες παρεμβάσεις, ειδικά κατά τα προηγούμενα έτη της εκτεταμένης οικονομικής ύφεσης. Στις παρατηρήσεις των ειδικών προστίθεται και ο κίνδυνος οι προτεραιότητες των τοπικών αρχών να μην συνδέονται με τις

οδηγίες της κεντρικής διοίκησης για την περίπτωση μέτρων που αναφέρονται σε πόρους (οχήματα και κτίρια) του δημοσίου τομέα, καθώς και η σημαντικότητα της διαμόρφωσης του ρυθμιστικό πλαίσιο με βάση τις συνθήκες της αγοράς και λαμβάνοντας υπόψη την ωριμότητα της. Οι εν λόγω κίνδυνοι δίνονται στον Πίνακα 6-6. Η συλλογή των εκτιμήσεων των εμπειρογνομώνων ως προς την έκθεση κάθε μέτρου πολιτικής σε κάθε έναν από τους ορατούς κινδύνους πραγματοποιείται με τη συμπλήρωση ερωτηματολογίων, όπου ο ερωτηθείς καλείται να καταγράψει τον βαθμό στον οποίο θεωρεί ότι ο εκάστοτε κίνδυνος απειλεί την επιτυχία υλοποίησης της εκάστοτε εναλλακτικής, με τη χρήση μίας πενταβάθμιας κλίμακας. Προκειμένου να συναθροιστούν οι εκτιμήσεις όλων των εμπειρογνομώνων και να αξιοποιηθούν από τα μοντέλα, τα δεδομένα μεταφράζονται σε αριθμητικές τιμές.

Πίνακας 6-6: Σύνολο αναγνωρισμένων κινδύνων από την ομάδα των εμπειρογνομώνων

| Κίνδυνοι υλοποίησης | |
|----------------------------|--|
| R1 | Δυσκολίες ευθυγράμμισης ενδιαφερόντων τοπικής αυτοδιοίκησης με εθνικές υποχρεώσεις |
| R2 | Πολιτική αστάθεια |
| R3 | Γραφειοκρατία |
| R4 | Ιδιαίτερα απαιτητικό ρυθμιστικό πλαίσιο συγκριτικά με την ωριμότητα της αγοράς |
| R5 | Ανεπαρκής χρηματοπιστωτικός/τραπεζικός τομέας |
| R6 | Κοινωνική εναντίωση |
| R7 | Ανεπίδεκτο προσωπικό – Περιορισμένες τεχνικές δεξιότητες |
| R8 | Δυσμενείς οικονομικές συνθήκες (οικονομική κρίση/ύφεση) |

Η αξιολόγηση ρίσκων στο πλαίσιο της παρούσας μελέτης πραγματοποιείται με τη μέθοδο πολυκριτήριας υποστήριξης αποφάσεων TOPSIS ή Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution (Hwang and Yoon, 1981), η οποία αποτελεί μία μέθοδο αντισταθμιστικής συνάθροισης που βασίζεται στο αξίωμα ότι η επιλεχθείσα δράση θα πρέπει να έχει την ελάχιστη γεωμετρική απόσταση από την ιδανική λύση και τη μέγιστη γεωμετρική απόσταση από την χειρίστη λύση. Η TOPSIS περιλαμβάνει τη διαμόρφωση και κανονικοποίηση του πίνακα απόφασης [εναλλακτικές x κριτήρια] ή, εν προκειμένω, [μέτρα πολιτικής x κίνδυνοι], τον υπολογισμό του σταθμισμένου πίνακα απόφασης, τον προσδιορισμό της ιδανικής και της χειρίστης λύσης, και τον υπολογισμό της απόστασης κάθε εναλλακτικής (σ.σ. μέτρου πολιτικής) από αυτές τις λύσεις, προτού καταλήξει σε μία τελική κατάταξη. Αξίζει να σημειωθεί ότι η TOPSIS

Κεφάλαιο 6. Πολυστοχικό μοντέλο ανάλυσης χαρτοφυλακίου με αξιολόγηση κινδύνου και ανάλυση ευρωστίας για την προώθηση της ενεργειακής αποδοτικότητας στην Ελλάδα

επεκτάθηκε με την εισαγωγή μίας τριγωνικής μεθόδου για τον υπολογισμό της απόστασης μεταξύ δύο τριγωνικών ασαφών αριθμών, δημιουργώντας έτσι την Fuzzy TOPSIS (Chen, 2000), η οποία αργότερα επεκτάθηκε περαιτέρω ώστε να διαχειρίζεται διαφορετικούς τύπους δεδομένων (Chen and Tsao, 2008). Η επιλογή της TOPSIS οφείλεται στην ευρεία αξιοποίησή της στη βιβλιογραφία που αφορά στον συγκεκριμένο χώρο προβλήματος, και τη δυνατότητα αντιμετώπισης προβλημάτων πολλαπλών κριτηρίων από πολλαπλούς αποφασίζοντες. Αντίστοιχες μελέτες πολυκριτήριας υποστήριξης αποφάσεων με πολλαπλούς εμπειρογνώμονες, οι οποίες βασίζονται στη μέθοδο TOPSIS, παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα.

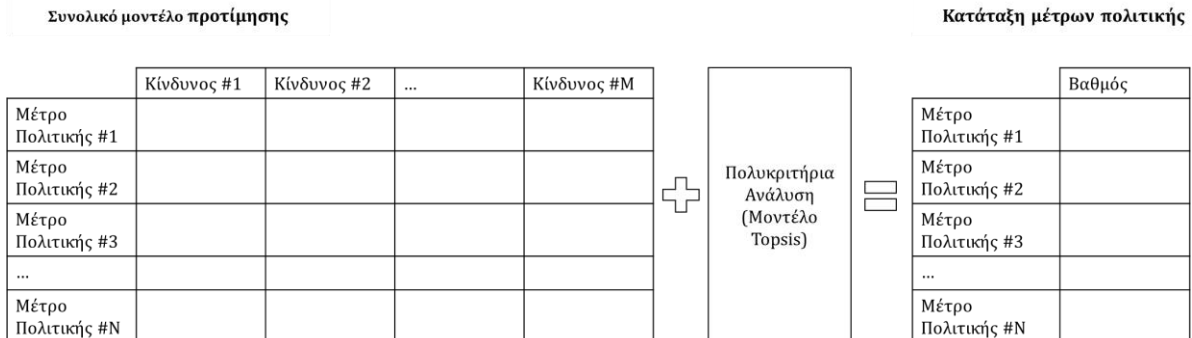
Πίνακας 6-7: Εφαρμογές TOPSIS με πολλαπλούς αποφασίζοντες στη σχετική βιβλιογραφία

| Μελέτη | Κριτήρια Αξιολόγησης | | | | | | | Τομέας | Πεδίο Εφαρμογής | Μελέτη Περίπτωσης |
|--------------------------------|----------------------|------|-------|------|------|------|------|----------------------|------------------------|-------------------|
| | ΟΙΚΟΝ | ΕΝΕΡ | ΠΕΡΙΒ | ΡΥΘΜ | ΚΟΙΝ | ΤΕΧΝ | ΑΛΛΑ | | | |
| (Brand & Missaoui, 2014) | X | X | X | | X | | | Ενέργεια | Αξιολόγηση τεχνολογίας | Τυνησία |
| (Büyükoçkan & Güleriyüz, 2017) | X | | X | X | X | X | | Ενέργεια | Αξιολόγηση τεχνολογίας | Τουρκία |
| (Jun et al., 2013) | X | | X | | X | | X | Κτίρια | Ανάλυση σεναρίων | N. Κορέα |
| (Montanari, 2004) | X | | X | | | X | | Ενέργεια | Επιλογή έργου | Ιταλία |
| (Mourhir et al., 2016) | | X | X | X | X | X | X | Περιβάλλον | Αξιολόγηση πολιτικής | Μαρόκο |
| (Sakthivel et al., 2015) | | | X | | | X | | Μεταφορές | Αξιολόγηση τεχνολογίας | - |
| (Kaya & Kahraman, 2011) | X | | X | | X | X | | Ενέργεια | Αξιολόγηση τεχνολογίας | - |
| (Onu et al., 2017) | X | | X | X | X | X | | Περιβάλλον; Ενέργεια | Αξιολόγηση πολιτικής | Νιγηρία |

Για τους σκοπούς της εργασίας, θα αξιοποιηθεί το μεθοδολογικό πλαίσιο που βασίζεται στην εκτέλεση του μοντέλου TOPSIS δύο φορές, μία για την συνάθροιση των ατομικών μοντέλων προτίμησης των εμπειρογνομόνων σε ένα καθολικό, και άλλη μία για την αξιολόγηση του καθολικού μοντέλου, όπως παρουσιάζεται στο (Krohling and Campanharo, 2011). Ως αποτέλεσμα της εφαρμογής της μεθόδου TOPSIS προκύπτει η κατάταξη των μέτρων πολιτικής με κριτήριο την έκθεσή τους στους αναγνωρισμένους κινδύνους και σύμφωνα με τις εκτιμήσεις όλης της ομάδας των εμπειρογνομόνων. Οι βαθμοί που αντιστοιχούν

Κεφάλαιο 6. Πολυστοχικό μοντέλο ανάλυσης χαρτοφυλακίου με αξιολόγηση κινδύνου και ανάλυση ευρωστίας για την προώθηση της ενεργειακής αποδοτικότητας στην Ελλάδα

σε κάθε μέτρο πολιτικής αποτελούν τον δείκτη κινδύνου τους που θα αξιοποιηθεί εν τέλει στην ανάλυση χαρτοφυλακίου, όπως φαίνεται στο επόμενο σχήμα.



Σχήμα 6-2: Κατάταξη των μέτρων πολιτικής με κριτήριο την έκθεσή τους στους αναγνωρισμένους κινδύνους

6.2.3.2 Αξιολόγηση ευστάθειας βέλτιστων χαρτοφυλακίων

Έχοντας ως στόχο την αντιμετώπιση της εγγενούς αβεβαιότητας στους συντελεστές των αντικειμενικών συναρτήσεων, βασικό στόχο της παρούσα ανάλυσης αποτελεί η σύνδεση της μεθόδου AUGMECON-2 με την τεχνική των προσομοιώσεων Monte Carlo (Vose, 1997; 2008). Το μοντέλο επιλύεται επαναληπτικά ώστε να εξεταστεί η ευστάθεια των λύσεων σε πιθανές μεταβολές των παραμέτρων του προβλήματος. Η αβεβαιότητα στις παραμέτρους του προβλήματος θεωρείται στοχαστικής φύσεως, δηλαδή ποσοτικοποιείται με την μορφή κατανομών πιθανότητας. Ως αβέβαιες παράμετροι θεωρούνται οι εκτιμήσεις της σωρευτικής εξοικονόμησης ενέργειας που προκύπτει από την διαφοροποίηση στον χρονισμό υλοποίησης ορισμένων μέτρων πολιτικής εντός της εξεταζόμενης περιόδου. Χρησιμοποιώντας ανάλυση Monte Carlo, μπορούν να σχεδιασθούν διάφορες πιθανοτικές κατανομές για τις παραμέτρους αβεβαιότητας (πχ ομοιόμορφη κατανομή για μεταβλητές που παρουσιάζουν υψηλό βαθμό αβεβαιότητας, χωρίς όμως ταυτόχρονα να παρουσιάζουν κεντρική τάση, κανονική κατανομή για μεταβλητές των οποίων η κατανομή παρουσιάζει συμμετρία γύρω από το μέσο). Καταρχήν ορίζεται ο τύπος και οι παράμετροι των συναρτήσεων κατανομής πιθανότητας που εκφράζουν τις αβέβαιες παραμέτρους, οπού στο συγκεκριμένο πρόβλημα ως αβέβαιοι παράμετροι θεωρούνται οι τιμές των αναμενόμενων εξοικονομήσεων που αποφέρει το κάθε μέτρο. Στη συνέχεια χρησιμοποιώντας την τεχνική Monte Carlo γίνεται

δειγματοληψία για τους συντελεστές των αντικειμενικών συναρτήσεων και παράγεται το μέτωπο Pareto με την μέθοδο AUGMECON2 (Mavrotas and Florios, 2013). Η διαδικασία εκτελείτε επαναληπτικά με αποτέλεσμα την παραγωγή ενός συνόλου μετώπων Pareto. Ο αριθμός των διεξαγόμενων επαναλήψεων έστω T λαμβάνει μια μεγάλη τιμή (πχ $T = ,1000$) έτσι ώστε να λαμβάνεται ένα επαρκές δείγμα για την εξαγωγή εύρωστων συμπερασμάτων. Αυτό το ζεύγος δειγματοληψίας και βελτιστοποίησης αποτελεί τον πυρήνα των υπολογισμών. Για παράδειγμα, εάν ο αριθμός των προσομοιώσεων Monte Carlo τεθεί ίσος με 1,000, τότε θα πραγματοποιηθούν 1,000 εκτελέσεις δειγματοληψίας και βελτιστοποίησης. Ως αποτέλεσμα αυτής της διαδικασίας θα παραχθούν 1,000 διαφορετικά μέτωπα Pareto βέλτιστων χαρτοφυλακίων, με βάση τη δειγματοληψία των παραμέτρων του μοντέλου.

Από το σύνολο των μετώπων Pareto μπορεί να οριστεί ένα «μέσο» μέτωπο Pareto ως το πιο αντιπροσωπευτικό, το οποίο εδώ επιλέγεται να είναι το μέτωπο Pareto που προκύπτει από την επίλυση του προβλήματος χωρίς αβεβαιότητα. Στη συνέχεια σε κάθε μέτωπο Pareto και για κάθε Pareto βέλτιστη λύση παρατηρείται η απόστασή της από την αντίστοιχη Pareto βέλτιστη λύση του αντιπροσωπευτικού μετώπου Pareto. Με τον τρόπο αυτό μπορεί να υπολογιστεί η διασπορά για κάθε Pareto της βέλτιστης λύσης γύρω από την αντίστοιχη λύση του αντιπροσωπευτικού μετώπου Pareto. Η ευστάθεια του μετώπου Pareto αξιολογείται εύκολα παρατηρώντας στο γράφημα περιοχές με μεγαλύτερη και μικρότερη διασπορά. Η ευστάθεια επομένως του μετώπου Pareto εκφράζεται με τη διασπορά γύρω από το «αντιπροσωπευτικό μέτωπο Pareto». Με τον τρόπο αυτό, κατέστη εφικτό να ταυτοποιηθούν περιοχές πάνω στο μέτωπο Pareto, οι οποίες ήταν πολύ πιο ευσταθείς σε σχέση με άλλες και να αξιολογηθεί περαιτέρω η ευστάθεια των διακριτών μέτρων-πολιτικών. Αναφορικά με την ευρωστία των μέτρων πολιτικής καθαυτών στα βέλτιστα χαρτοφυλάκια, καταμετράται πόσες φορές λαμβάνεται κάθε πολιτική ως βέλτιστη ανά τις επαναλήψεις Monte Carlo. Όσο υψηλότερη είναι η συχνότητα για μία πολιτική, τόσο πιο εύρωστη η συγκεκριμένη πολιτική είναι. Έτσι, αξιολογείται η ευρωστία του μετώπου Pareto ως σύνολο, καθώς και η ευρωστία των επιμέρους κατά Pareto βέλτιστων μέτρων-πολιτικών.

6.3 Αποτελέσματα

6.3.1 Αποτελέσματα πολυκριτηριακής ανάλυσης ρίσκου

Οι εμπειρογνώμονες του Υπουργείου Περιβάλλοντος και Ενέργειας κλήθηκαν να συμπληρώσουν ένα εξειδικευμένο ερωτηματολόγιο, σχετικά με την πιθανή αρνητική επίδραση οχτώ ρυθμιστικών, πολιτικών, κοινωνικών και οικονομικών ρίσκων στην ευόδωση των εξεταζόμενων δεκαπέντε ενεργειακών-κλιματικών πολιτικών που αφορούν στην Ελλάδα. Οι κίνδυνοι αφορούσαν στην αδυναμία τοπικής αυτοδιοίκησης και λοιπών φορέων να εναρμονιστούν με τις υποχρεώσεις που θέτει η κυβέρνηση, την πολιτική αστάθεια, την παρακώλυση λόγω περίπλοκων γραφειοκρατικών διαδικασιών, το ιδιαίτερα απαιτητικό ρυθμιστικό πλαίσιο συγκριτικά με την ωριμότητα της αγοράς, τη μειωμένη κοινωνική αποδοχή των μέτρων, την έλλειψη εξειδικευμένου προσωπικού για την υλοποίηση του μέτρου, καθώς και τις μη ευνοϊκές συνθήκες αγοράς. Τα σημαντικότερα αποτελέσματα της ανάλυσης των εκτιμήσεων των εμπειρογνομόνων, όπως προέκυψαν από το μοντέλο Πολυκριτηριακού Συστήματος Υποστήριξης Αποφάσεων, παρουσιάζονται στη συνέχεια.

Ο παρακάτω πίνακας δίνει μια εικόνα σχετικά με τα σημαντικότερα ρίσκα ανά πολιτική, όπως αυτά αξιολογήθηκαν από το σύνολο των εμπειρογνομόνων. Παρατηρείται ότι οι πιο κίνδυνοι που αναφέρθηκαν με μεγαλύτερη συχνότητα ανά τους εμπειρογνώμονες και σε μεγάλο αριθμό μέτρων πολιτικής αφορούν στη μη επάρκεια του ισχύοντος χρηματοπιστωτικού συστήματος, τη γραφειοκρατία, και την πιθανότητα δυσκολίας εναρμόνισης μεταξύ των προτεραιοτήτων της τοπικής διοίκησης με τις εθνικές υποχρεώσεις.

Πίνακας 6-8: Σημαντικότερα ρίσκα ανά πολιτική

| Μέτρο Πολιτικής | Ρίσκο 1 | Ρίσκο 2 |
|-----------------|---|------------------------------------|
| M1 | Παρακώλυση λόγω περίπλοκων γραφειοκρατικών διαδικασιών | Ανεπαρκές χρηματοπιστωτικό σύστημα |
| M2 | Αδυναμία τοπικής αυτοδιοίκησης και λοιπών φορέων να εναρμονιστούν με τις υποχρεώσεις της κυβέρνησης | Ανεπαρκές χρηματοπιστωτικό σύστημα |
| M3 | Παρακώλυση λόγω περίπλοκων γραφειοκρατικών διαδικασιών | Ανεπαρκές χρηματοπιστωτικό σύστημα |

Κεφάλαιο 6. Πολυστοχικό μοντέλο ανάλυσης χαρτοφυλακίου με αξιολόγηση κινδύνου και ανάλυση ευρωστίας για την προώθηση της ενεργειακής αποδοτικότητας στην Ελλάδα

| | | |
|-----|---|--|
| M4 | Αδυναμία τοπικής αυτοδιοίκησης και λοιπών φορέων να εναρμονιστούν με τις υποχρεώσεις της κυβέρνησης | Έλλειψη εξειδικευμένου προσωπικού υλοποίησης του μέτρου |
| M5 | Ανεπαρκές χρηματοπιστωτικό σύστημα | Μη ευνοϊκές συνθήκες αγοράς |
| M6 | Παρακώλυση λόγω περίπλοκων γραφειοκρατικών διαδικασιών | Μη ευνοϊκές συνθήκες αγοράς |
| M7 | Παρακώλυση λόγω περίπλοκων γραφειοκρατικών διαδικασιών | Αδυναμία τοπικής αυτοδιοίκησης και λοιπών φορέων να εναρμονιστούν με τις υποχρεώσεις που θέτει η κυβέρνηση |
| M8 | Παρακώλυση λόγω περίπλοκων γραφειοκρατικών διαδικασιών | Μειωμένη κοινωνική αποδοχή |
| M9 | Αδυναμία τοπικής αυτοδιοίκησης και λοιπών φορέων να εναρμονιστούν με τις υποχρεώσεις της κυβέρνησης | Έλλειψη εξειδικευμένου προσωπικού υλοποίησης του μέτρου |
| M10 | Παρακώλυση λόγω περίπλοκων γραφειοκρατικών διαδικασιών | Ιδιαίτερα απαιτητικό ρυθμιστικό πλαίσιο σχετικά με την ωριμότητα της αγοράς |
| M11 | Παρακώλυση λόγω περίπλοκων γραφειοκρατικών διαδικασιών | Ανεπαρκές χρηματοπιστωτικό σύστημα |
| M12 | Παρακώλυση λόγω περίπλοκων γραφειοκρατικών διαδικασιών | Ανεπαρκές χρηματοπιστωτικό σύστημα |
| M13 | Παρακώλυση λόγω περίπλοκων γραφειοκρατικών διαδικασιών | Ανεπαρκές χρηματοπιστωτικό σύστημα |
| M14 | Παρακώλυση λόγω περίπλοκων γραφειοκρατικών διαδικασιών | Ανεπαρκές χρηματοπιστωτικό σύστημα |
| M15 | Αδυναμία τοπικής αυτοδιοίκησης και λοιπών φορέων να εναρμονιστούν με τις υποχρεώσεις της κυβέρνησης | Έλλειψη εξειδικευμένου προσωπικού υλοποίησης του μέτρου |

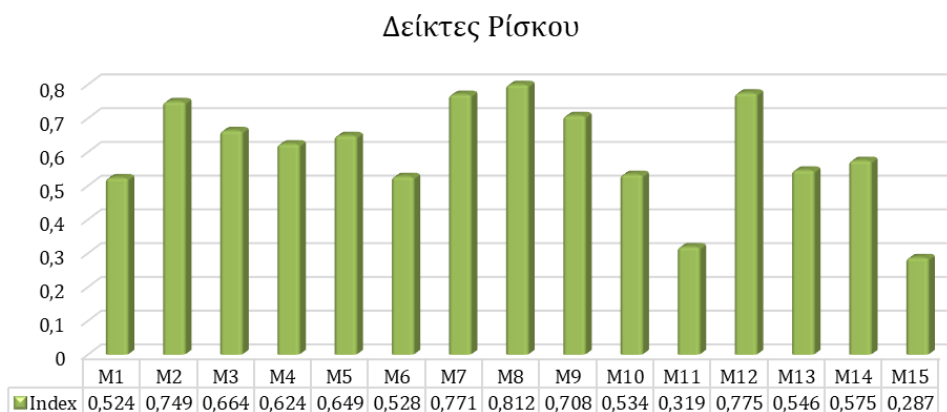
Ενδεικτικά, στο ακόλουθο σχήμα απεικονίζονται οι εκτιμήσεις κάθε εμπειρογνώμονα σχετικά με τη συνολική αξιολόγηση ρίσκου στις πολιτικές *M1: 2^ο πρόγραμμα «Εξοικονόμηση κατ' οίκον»* και *M9: Ενεργειακοί υπεύθυνοι και ΣΔΕΑ*, όπως προκύπτει από την εφαρμογή της πολυκριτηριακής ανάλυσης μέσω των ερωτηματολογίων. Σε σύγκριση των δύο μέτρων, το μέτρο «*Ενεργειακοί υπεύθυνοι και ΣΔΕΑ*» αξιολογείται ως πιο επικίνδυνο από όλους τους εμπειρογνώμονες, ενώ παρατηρούμε ότι ορισμένοι εξ αυτών είναι πιο συντηρητικοί στις εκτιμήσεις τους (πχ. Expert 1), σε σχέση με άλλους (πχ. Expert 3).

Κεφάλαιο 6. Πολυστοχικό μοντέλο ανάλυσης χαρτοφυλακίου με αξιολόγηση κινδύνου και ανάλυση ευρωστίας για την προώθηση της ενεργειακής αποδοτικότητας στην Ελλάδα



Σχήμα 6-3: Αξιολόγηση Ρίσκου για τις πολιτικές M1 και M9.

Ως τελικό αποτέλεσμα της πολυκριτηριακής ανάλυσης, το οποίο θα χρησιμοποιηθεί και ως είσοδος στο μοντέλο, λαμβάνεται η συνολική απεικόνιση του ρίσκου κάθε μέτρου (δείκτης ρίσκου). Από το Σχήμα 6-4 φαίνεται ότι τα μέτρα «Ενεργειακή αναβάθμιση δημοσίων κτιρίων», «Δράσεις ΕΠΠΕΡΑΑ», «Συμφηφισμός προστίμων αυθαιρέτων» και «Αντικατάσταση παλαιών επιβατικών οχημάτων ιδιωτικού τομέα» αξιολογήθηκαν ως μέτρα με υψηλό δείκτη κινδύνου, ενώ τα μέτρα «Αντικατάσταση παλαιών ελαφριών φορτηγών δημοσίου και ιδιωτικού τομέα» και «ΠΕΑ-Άλλος λόγος» έχουν αισθητά χαμηλότερο ρίσκο συγκριτικά με τα υπόλοιπα μέτρα.



Σχήμα 6-4: Συνολική απεικόνιση του ρίσκου κάθε μέτρου

Κατά την εισαγωγή τους στο μοντέλο οι δείκτες ρίσκου που προκύπτουν για κάθε πολιτική πολλαπλασιάζονται με κατάλληλους συντελεστές που αντικατοπτρίζουν τη μεταβολή του ρίσκου ανάλογα με την τελική συνεισφορά του μέτρου, σε σχέση με το τεχνικό δυναμικό υλοποίησης του μέτρου.

$$\frac{\text{Τελική ετήσια συνεισφορά μέτρου σε ktOE}}{\text{Μέγιστο ετήσιο τεχνικό δυναμικό υλοποίησης μέτρου}}$$

6.3.1.1 Κανονικοποίηση ρίσκου

Προκειμένου τα τελικά αποτελέσματα του μοντέλου να εκφραστούν με τρόπο εύληπτο από τους εμπειρογνώμονες, το ρίσκο κανονικοποιείται σύμφωνα με τα παρακάτω. Αρχικά, για κάθε ένα από τα δύο προβλήματα (*Πρόβλημα 1^ο: Δεδομένο διαθέσιμο κεφάλαιο από πλευράς Υπουργείου, Πρόβλημα 2^ο: Δεδομένη εξοικονόμηση ενέργειας*) το μοντέλο επιλύεται με μόνο κριτήριο τη μεγιστοποίηση του συνολικού δείκτη ρίσκου του χαρτοφυλακίου. Έτσι βρίσκεται το μέγιστο δυνατό ρίσκο του εκάστοτε χαρτοφυλακίου. Στη συνέχεια, και πάλι για κάθε ένα από τα δύο προβλήματα, το μοντέλο επιλύεται με μόνο κριτήριο την ελαχιστοποίηση του συνολικού δείκτη ρίσκου του χαρτοφυλακίου. Με αυτόν τον τρόπο υπολογίζεται το ελάχιστο δυνατό ρίσκο του εκάστοτε χαρτοφυλακίου. Η υλοποίηση έγινε με κατάλληλο αλγόριθμο που αναπτύχθηκε σε περιβάλλον GAMS.

Πίνακας 6-9: Μέγιστα και ελάχιστα ρίσκα χαρτοφυλακίων

| Δεδομένος στόχος | Δεδομένος Προϋπολογισμός |
|------------------|--------------------------|
| Max risk: 36.044 | Max risk: 21.108 |
| Min risk: 8.17 | Min risk: 1.945 |

Ο τελικός δείκτης ρίσκου κανονικοποιείται σύμφωνα με την κλίμακα:

| | |
|---------------------|----------------------|
| 0 - none | 2.5 - High |
| 0.5 - Extremely Low | 3 - Very High |
| 1 - Very Low | 3.5 - Extremely high |
| 1.5 - Low | 4 - Catastrophic |
| 2 - Medium | |

6.3.2 Αποτελέσματα μοντέλου ανάλυσης χαρτοφυλακίου

Πρόβλημα 1^ο: Δεδομένο διαθέσιμο κεφάλαιο – Λύση με μοναδικό κριτήριο τη μεγιστοποίηση της εξοικονόμησης

Στη συνέχεια, το «Πρόβλημα 1^ο: Δεδομένο διαθέσιμο κεφάλαιο από πλευράς Υπουργείου» λύθηκε έχοντας ως μοναδικό στόχο τη μέγιστη εξοικονόμηση ενέργειας, χωρίς δηλαδή να λαμβάνεται υπόψη η δεύτερη αντικειμενική συνάρτηση που αφορά στην ελαχιστοποίηση του ρίσκου. Η επίλυση έγινε με χρήση κατάλληλου αλγορίθμου που υλοποιήθηκε σε περιβάλλον GAMS. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης φαίνονται στους επόμενους πίνακες, όπου δίνεται, για κάθε χρόνο της τριετίας 2018-2020, η εξοικονόμηση σε κΤΟΕ που προτείνεται να επιτευχθεί από κάθε μέτρο και η αντίστοιχη επένδυση σε ευρώ που απαιτείται από το Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας. Όπως προκύπτει, η μέγιστη δυνατή εξοικονόμηση που μπορεί να επιτευχθεί για το συγκεκριμένο πρόβλημα δεδομένου προϋπολογισμού ισούται με 1.256,29 κΤΟΕ (69% του συνολικού στόχου 1.819,4 κΤΟΕ).

Πίνακας 6-10: Κατανομή εξοικονόμησης ανά μέτρο τα έτη 2018-2020

| Max εξοικονόμηση: 1.256,29 κΤΟΕ | 2018 (κΤΟΕ / %) | 2019 (κΤΟΕ / %) | 2020 (κΤΟΕ / %) |
|---------------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| M1 | 32,85 / 7.84% | 32,85 / 5.23% | - |
| M2 | - | - | - |
| M3 | 45 / 10.75% | 11,12 / 1.77% | - |
| M4 | 1,44 / 0.34% | 1,44 / 0.23% | 1,44 / 0.11% |
| M5 | 1,7 / 0.41% | 1,7 / 0.275% | 1,7 / 0.14% |
| M6 | 6,3 / 1.50% | 6,3 / 1.00% | - |
| M7 | - | - | - |
| M8 | 0,104 / 0.025% | 0,104 / 0.017% | 0,104 / 0.0083% |
| M9 | 138 / 32.95% | 138 / 21.97% | 138 / 10.98% |
| M10 | - | - | - |
| M11 | 1,35 / 0.32% | - | - |
| M12 | - | - | - |
| M13 | 3,9 / 0.93% | 3,9 / 0.62% | 3,9 / 0.31% |
| M14 | 2,55 / 0.61% | 2,55 / 0.41% | 2,55 / 0.20% |
| M15 | 2,62 / 0.42% | 2,62 / 0.42% | 2,62 / 0.21% |

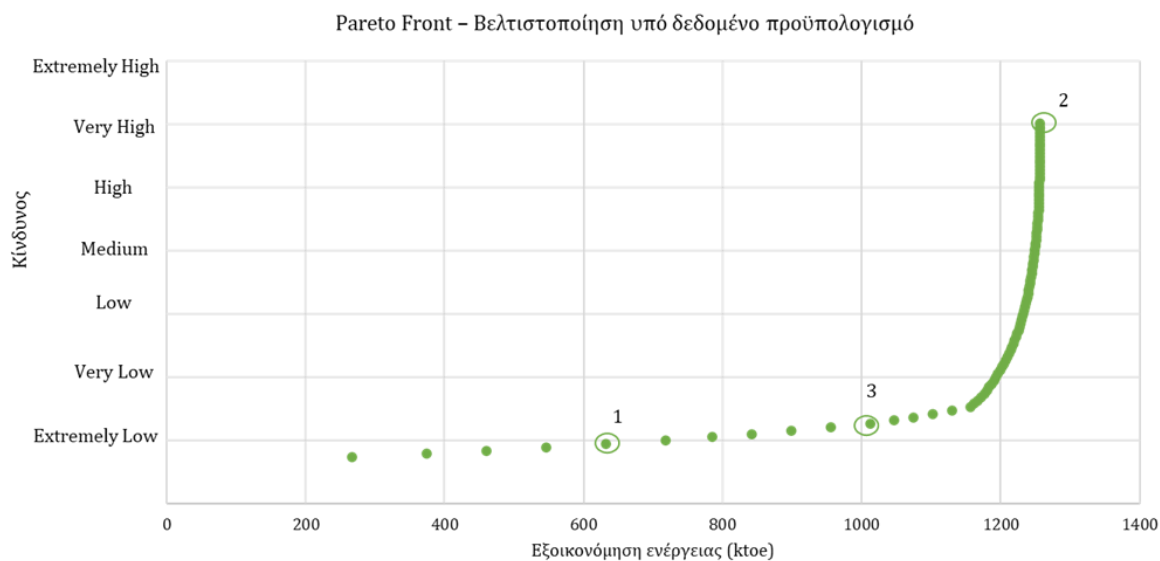
Πίνακας 6-11: Κατανομή προϋπολογισμού ανά μέτρο τα έτη 2018-2020

| Μαx εξοικονόμηση: 1.256,29 κΤΟΕ | 2018 (%) | 2019 (%) | 2020 (%) |
|---------------------------------|-------------|-------------|-------------|
| M1 | 12.04% | 12.04% | - |
| M2 | - | - | - |
| M3 | 17.20% | 4.25% | - |
| M4 | 0.19% | 0.19% | 0.19% |
| M5 | 0.20% | 0.20% | 0.20% |
| M6 | 24.81% | 24.81% | - |
| M7 | - | - | - |
| M8 | 0 | 0 | 0 |
| M9 | 1.02% | 1.02% | 1.02% |
| M10 | - | - | - |
| M11 | 0.59% | - | - |
| M12 | - | - | - |
| M13 | 0 | 0 | 0 |
| M14 | 0 | 0 | 0 |
| M15 | 0 | 0 | 0 |

Πρόβλημα 1^ο: Δεδομένο διαθέσιμο κεφάλαιο από πλευράς Υπουργείου – Επίλυση με κριτήριο την ελαχιστοποίηση του κινδύνου και την επίτευξη της μέγιστης δυνατή εξοικονόμηση (Pareto front)

Τελικά, το πρόβλημα λύνεται λαμβάνοντας υπόψη και τις δυο αντικειμενικές συναρτήσεις, δηλαδή τη μεγιστοποίηση εξοικονόμησης και την παράλληλη ελαχιστοποίηση ρίσκου, οπότε και λαμβάνεται το μέτωπο των διαφορετικών λύσεων (Pareto front) που ανταποκρίνονται βέλτιστα στα δύο αυτά κριτήρια βελτιστοποίησης. Η τεχνική που χρησιμοποιείται στην επίλυση είναι η μέθοδος πολυκριτήριας τεχνικής βελτιστοποίησης augmented ϵ -constraint (AUGMECON 2), η οποία υλοποιήθηκε σε περιβάλλον GAMS.

Κεφάλαιο 6. Πολυστοχικό μοντέλο ανάλυσης χαρτοφυλακίου με αξιολόγηση κινδύνου και ανάλυση ευρωστίας για την προώθηση της ενεργειακής αποδοτικότητας στην Ελλάδα

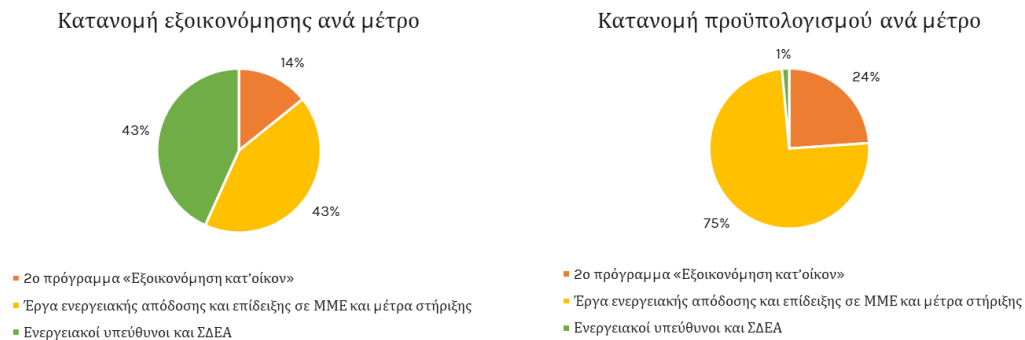


Σχήμα 6-5: Βέλτιστα χαρτοφυλάκια πολιτικών ενεργειακής αποδοτικότητας για δεδομένο προϋπολογισμό

Όλα τα σημεία που φαίνονται στο παραπάνω διάγραμμα αντιστοιχούν σε διαφορετικά χαρτοφυλάκια πολιτικών, τα οποία αποτελούν βέλτιστες λύσεις στο 1^ο πρόβλημα πολυκριτήριου προγραμματισμού. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν τρία σημεία της καμπύλης, τα οποία έχουν επισημανθεί με τους αριθμούς 1, 2 και 3. Το σημείο 1 δίνει ένα σύνολο πολιτικών—χαρτοφυλάκιο—που επιτυγχάνει συνολική εξοικονόμηση κοντά στην πρόταση του Υπουργείου, αλλά με πολύ χαμηλότερο ρίσκο. Η λύση 2 δίνει τη μέγιστη εξοικονόμηση ενέργειας που μπορεί να επιτευχθεί στο συγκεκριμένο πρόβλημα περιορισμένου προϋπολογισμού, η οποία όμως παρουσιάζει και το μέγιστο ρίσκο. Τέλος, το σημείο 3 δίνει μια λύση που επιτυγχάνει υψηλή εξοικονόμηση ενέργειας με εξαιρετικά χαμηλό ρίσκο. Όπως φαίνεται από το διάγραμμα τα σημεία δεξιά του σημείου 3 δίνουν μεγαλύτερη εξοικονόμηση, αλλά με κατακόρυφη αύξηση του ρίσκου. Επίσης, όπως θα διαπιστωθεί και από την ανάλυση ευστάθειας που παρουσιάζεται στην υποενότητα 2.2, το Pareto Front για λύσεις δεξιά του σημείου 3 φαίνεται να επηρεάζεται αρκετά από την αβεβαιότητα και άρα να μην οδηγεί σε ευσταθείς λύσεις.

Κεφάλαιο 6. Πολυστοχικό μοντέλο ανάλυσης χαρτοφυλακίου με αξιολόγηση κινδύνου και ανάλυση ευρωστίας για την προώθηση της ενεργειακής αποδοτικότητας στην Ελλάδα

Σημείο 1



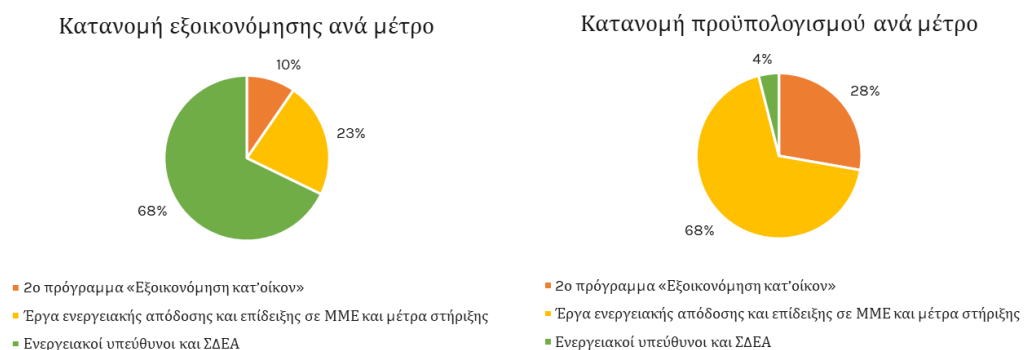
Σχήμα 6-6: Κατανομή εξοικονόμησης και προϋπολογισμού ανά μέτρο τα έτη 2018-2020, Σημείο 1

Σημείο 2



Σχήμα 6-7: Κατανομή εξοικονόμησης και προϋπολογισμού ανά μέτρο τα έτη 2018-2020, Σημείο 2

Σημείο 3



Σχήμα 6-8: Κατανομή εξοικονόμησης και προϋπολογισμού ανά μέτρο τα έτη 2018-2020, Σημείο 3

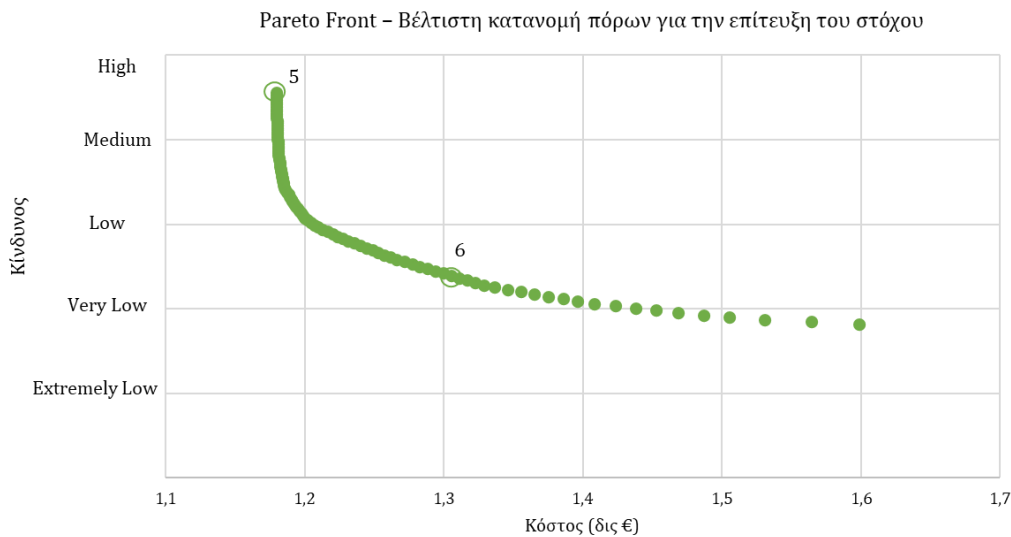
Πρόβλημα 2^ο: Δεδομένη εξοικονόμηση ενέργειας

Στα επόμενα αναλύονται τα αποτελέσματα που δίνει το τρέξιμο του μοντέλου για το 2^ο πρόβλημα προς επίλυση. Υπενθυμίζεται ότι το πρόβλημα 2 αφορά στην εύρεση κατάλληλου χαρτοφυλακίου μέτρων πολιτικής που επιτυγχάνει εξ ολοκλήρου τον στόχο εξοικονόμησης ενέργειας, με κριτήριο την ελαχιστοποίηση του κόστους και του ρίσκου που ενέχει.

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, ο εθνικός στόχος για την τριετία 2018-2020 τέθηκε ίσος με 1.819,4 kTOE και υπολογίστηκε λαμβάνοντας υπόψη το συνολικό προς επίτευξη στόχο για την περίοδο 2014-2020 που ισούται με 3.332,7 kTOE, την εξοικονόμηση που έχει επιτευχθεί από αντίστοιχα μέτρα εξοικονόμησης που υλοποιήθηκαν την περίοδο 2014-2017 (1.281,3 kTOE) και την προκαθορισμένη συνεισφορά για τα έτη 2018-2020. Τα αποτελέσματα της μελέτης υποδεικνύουν ότι οι εθνικοί στόχοι για το 2020 δεν δύναται να επιτευχθούν με τους ετήσιους τεχνικούς περιορισμούς που έχουν τεθεί. Η μέγιστη εξοικονόμηση που μπορεί να επιτευχθεί με τους δεδομένους περιορισμούς είναι 1.510,58 kTOE (83% του στόχου των 1.819,4 kTOE). Το κενό αυτό καλύπτεται, με βάση το μοντέλο που αναπτύχθηκε στο πλαίσιο της παρούσας μελέτης, μόνο με μία αύξηση κατά 20% των τεχνικών περιορισμών που έχουν τεθεί και λαμβάνοντας υπόψη ως μόνη αντικειμενική συνάρτηση την ελαχιστοποίηση του κόστους. Από το τρέξιμο του αλγορίθμου προκύπτει ότι η κάλυψη των εθνικών στόχων, με αυτήν την «χαλάρωση» των τεχνικών περιορισμών, μπορεί να πραγματοποιηθεί και απαιτεί επένδυση 3 δις. € κατ' ελάχιστο.

Στη συνέχεια, μελετάται πώς ανταποκρίνεται το μοντέλο σε μία υποθετική αύξηση κατά 40% στους ετήσιους τεχνικούς περιορισμούς που αρχικά τέθηκαν. Τα αποτελέσματα του δυστοχικού μοντέλου προγραμματισμού, με κριτήρια την ελαχιστοποίηση του κόστους των πολιτικών και του ρίσκου που ενέχει η επιτυχής υλοποίησή τους, φαίνονται στο παρακάτω διάγραμμα βέλτιστων λύσεων.

Κεφάλαιο 6. Πολυστοχικό μοντέλο ανάλυσης χαρτοφυλακίου με αξιολόγηση κινδύνου και ανάλυση ευρωστίας για την προώθηση της ενεργειακής αποδοτικότητας στην Ελλάδα



Σχήμα 6-9: Βέλτιστα χαρτοφυλάκια πολιτικών ενεργειακής αποδοτικότητας για δεδομένο στόχο ενεργειακής αποδοτικότητας

Στο παραπάνω σχήμα έχουν επισημανθεί και απομονωθεί δύο χαρτοφυλάκια (Σημεία 5 και 6) που παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον προς περαιτέρω ανάλυση. Το χαρτοφυλάκιο 5 δίνει το ελάχιστο ποσό που απαιτείται να επενδυθεί από το Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας προκειμένου να επιτευχθεί ο εθνικός στόχος εξοικονόμησης. Προκύπτει ότι ο στόχος επιτυγχάνεται με 1,18 δις € κατ' ελάχιστο και με υψηλό προς μέτριο ρίσκο. Μια καλή εναλλακτική αποτελεί η επίτευξη του στόχου με 1,35 δις € και ρίσκο κοντά στο πολύ χαμηλό (χαρτοφυλάκιο 6). Τα σημεία στο διάγραμμα δεξιότερα του σημείου 6 απαιτούν αρκετά περισσότερα χρήματα, χωρίς να προσφέρουν σημαντική μείωση στο ρίσκο.

Αναλυτικά η συμμετοχή των μέτρων στα δύο απομονωμένα χαρτοφυλάκια (5 και 6) του διαγράμματος δίνεται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 6-12: Ανάλυση επιλεγμένων χαρτοφυλακίων σε κΤΟΕ - Πρόβλημα 2^ο

| Μέτρο Πολιτικής | Αποτελέσματα μοντέλου σε κΤΟΕ | | | Αποτελέσματα μοντέλου σε κΤΟΕ | | |
|-----------------|-------------------------------|-------|-------|-------------------------------|----|----|
| | 1.18 billion 2,275 risk | | | 1.35 billion 1,112 risk | | |
| M1 | 46 | 46 | - | - | 46 | 46 |
| M2 | - | - | - | - | - | - |
| M3 | 63 | 63 | - | - | 63 | 63 |
| M4 | 2,016 | 2,016 | 2,016 | - | - | - |
| M5 | 2,373 | 2,373 | 2,373 | - | - | - |
| M6 | - | - | - | - | - | - |
| M7 | - | - | - | - | - | - |

Κεφάλαιο 6. Πολυστοχικό μοντέλο ανάλυσης χαρτοφυλακίου με αξιολόγηση κινδύνου και ανάλυση ευρωστίας για την προώθηση της ενεργειακής αποδοτικότητας στην Ελλάδα

| | | | | | | |
|-----|-------|-------|-------|------|-------|-------|
| M8 | 0,146 | 0,146 | 0,146 | - | - | - |
| M9 | 193,2 | 193,2 | 193,2 | 0 | 193,2 | 193,2 |
| M10 | - | - | - | - | - | - |
| M11 | 1,89 | - | - | - | - | - |
| M12 | 10,18 | - | - | - | 15,07 | - |
| M13 | 3,9 | 3,9 | 3,9 | 3,9 | 3,9 | - |
| M14 | 2,55 | 2,55 | - | 2,55 | - | - |
| M15 | 2,62 | 2,62 | 2,62 | 2,62 | 2,62 | - |

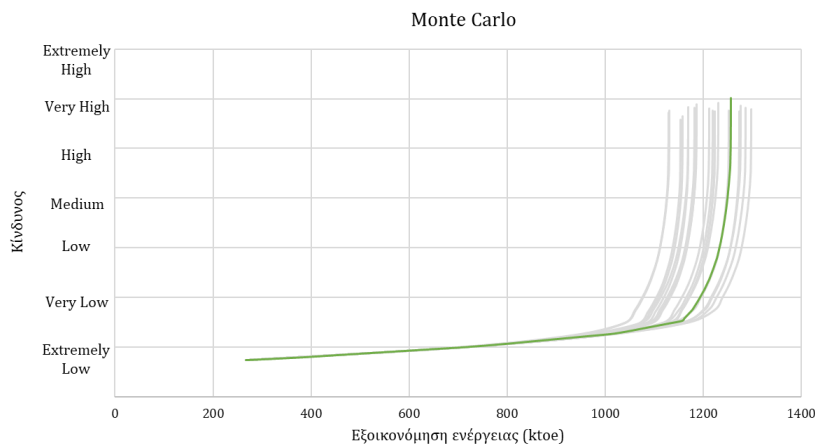
6.3.3 Αποτελέσματα με ενσωμάτωση αβεβαιότητας

Στην υποενότητα αυτή, εστίαση δίδεται στην ανάλυση, μοντελοποίηση και ερμηνεία της ευστάθειας του υποκείμενου προβλήματος. Συγκεκριμένα, αναπτύσσεται μια συστηματική προσέγγιση λήψης αποφάσεων με τη χρήση της προσομοίωσης Monte Carlo και του πολυστοχικού προγραμματισμού, με σκοπό την αντιμετώπιση της εγγενούς αβεβαιότητας στους συντελεστές των αντικειμενικών συναρτήσεων. Έτσι, αξιολογείται η ευρωστία του μετώπου Pareto ως σύνολο, καθώς και η ευρωστία των επιμέρους κατά Pareto βέλτιστων μέτρων-πολιτικών. Το μοντέλο επιλύεται επαναληπτικά ώστε να εξεταστεί η ευστάθεια των λύσεων σε πιθανές μεταβολές των παραμέτρων του προβλήματος. Με τον τρόπο αυτό, κατέστη εφικτό να ταυτοποιηθούν περιοχές επί του μετώπου Pareto, οι οποίες ήταν πολύ πιο ευσταθείς συγκριτικά με άλλες και να αξιολογηθεί περαιτέρω η ευστάθεια των διακριτών μέτρων-πολιτικών. Η αβεβαιότητα στις παραμέτρους του προβλήματος θεωρείται στοχαστικής φύσεως, δηλαδή ποσοτικοποιείται με τη μορφή κατανομών πιθανότητας. Ως αβέβαιες παράμετροι θεωρούνται οι εκτιμήσεις της σωρευτικής εξοικονόμησης ενέργειας που προκύπτει από την διαφοροποίηση στον χρονισμό υλοποίησης ορισμένων μέτρων πολιτικής εντός της εξεταζόμενης περιόδου.

6.3.3.1 Αξιολόγηση ευρωστίας μετώπου Pareto

Στο παρακάτω διάγραμμα φαίνονται πολλαπλά μέτωπα Pareto βέλτιστων χαρτοφυλακίων, τα οποία προκύπτουν ύστερα από την ενσωμάτωση της αβεβαιότητας στην σωρευτική εξοικονόμηση ενέργειας (€) των μέτρων-πολιτικών εξοικονόμησης. Με σκούρο πράσινο χρώμα φαίνεται το μέτωπο Pareto το οποίο προκύπτει από το αρχικό διστοχικό, μοντέλο γραμμικού προγραμματισμού χωρίς την ενσωμάτωση της αβεβαιότητας το οποίο και αναλύθηκε παραπάνω. Το μέτωπο Pareto αυτό θεωρείται ως

«αντιπροσωπευτικό» Pareto. Για κάθε μέτωπο Pareto που προκύπτει, ύστερα από την ενσωμάτωση της αβεβαιότητας και για κάθε Pareto βέλτιστη λύση, παρατηρείται η απόστασή της από την αντίστοιχη Pareto βέλτιστη λύση του αντιπροσωπευτικού μετώπου Pareto. Η διασπορά για κάθε Pareto βέλτιστη λύση γύρω από την αντίστοιχη λύση του αντιπροσωπευτικού μετώπου Pareto δίνει σημαντικά συμπεράσματα ως προς την αξιολόγηση της ευστάθειας του μετώπου βέλτιστων λύσεων. Στο διάγραμμα που προκύπτει, είναι εμφανές ότι τα σημεία-χαρτοφυλάκια που δίνουν εξοικονόμηση άνω των 1.000 kTOE παρουσιάζουν μεγαλύτερη αστάθεια, σε σχέση με όσα χαρτοφυλάκια συνεισφέρουν λιγότερο των 1.000 kTOE, τα οποία προκύπτουν ως αρκετά ευσταθή.



Σχήμα 6-10: Αποτελέσματα προσομοίωσης Monte Carlo για την αξιολόγηση της βέλτιστης λύσης υπό αβεβαιότητα

6.3.3.2 Αξιολόγηση ευρωστίας σε επίπεδο διακριτών μέτρων – πολιτικών

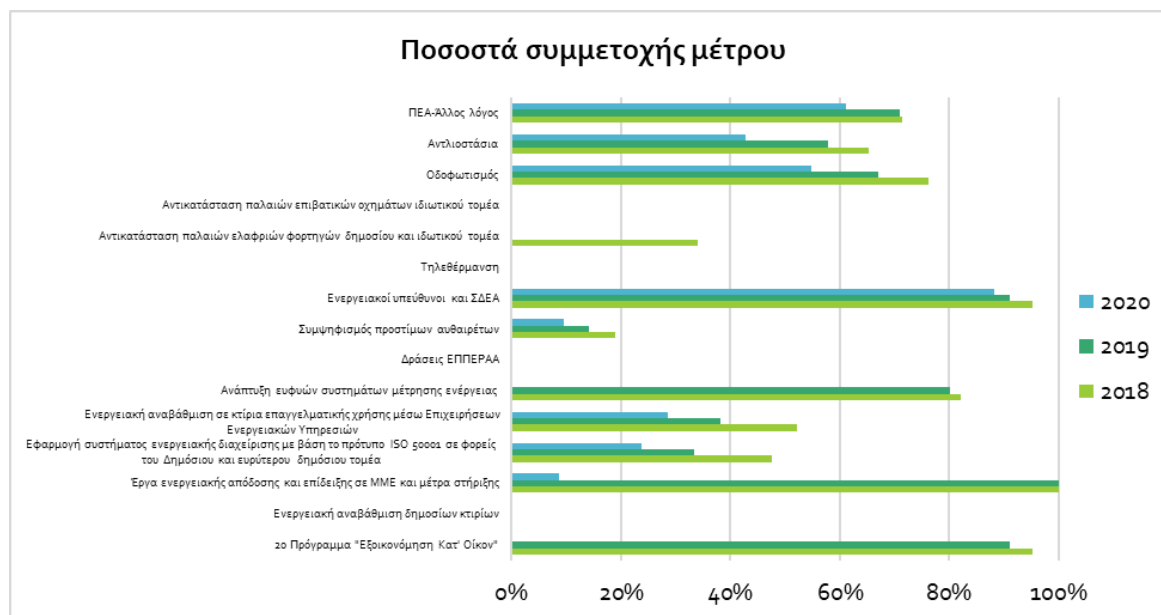
Ο παρακάτω πίνακας δείχνει τη συμμετοχή καθενός μέτρου πολιτικής στο σύνολο των 420 βέλτιστων χαρτοφυλακίων που προέκυψαν από το μοντέλο. Παρατηρείται ότι τα μέτρα (επισημασμένα με σκούρο πράσινο χρώμα) «2^ο Πρόγραμμα "Εξοικονόμηση Κατ' Οίκον"», «Έργα ενεργειακής απόδοσης και επίδειξης σε ΜΜΕ και μέτρα στήριξης» και «Ενεργειακοί υπεύθυνοι και ΣΔΕΑ» συμμετέχουν σχεδόν στο σύνολο των βέλτιστων λύσεων, ενώ τα μέτρα (ανοιχτό πράσινο χρώμα) «Οδοφωτισμός», «Αντλιοστάσια» και «ΠΕΑ-Άλλος λόγος» εμφανίζουν επίσης αυξημένη συχνότητα εμφάνισης στα βέλτιστα χαρτοφυλάκια. Επομένως αυτά τα έξι μέτρα πολιτικής προκύπτουν από την παρούσα ανάλυση ως πιο ευσταθή.

Κεφάλαιο 6. Πολυστοχικό μοντέλο ανάλυσης χαρτοφυλακίου με αξιολόγηση κινδύνου και ανάλυση ευρωστίας για την προώθηση της ενεργειακής αποδοτικότητας στην Ελλάδα

Πίνακας 6-13: Απόλυτη συχνότητα εμφάνισης μέτρων πολιτικής στο σύνολο των χαρτοφυλακίων

| | 2018 | 2019 | 2020 |
|--|------------|------------|------------|
| | εμφανίσεις | | |
| 2ο Πρόγραμμα "Εξοικονόμηση Κατ' Οίκον" | 400 | 383 | 0 |
| Ενεργειακή αναβάθμιση δημοσίων κτιρίων | 0 | 0 | 0 |
| Έργα ενεργειακής απόδοσης και επίδειξης σε ΜΜΕ και μέτρα στήριξης | 420 | 420 | 37 |
| Εφαρμογή συστήματος ενεργειακής διαχείρισης με βάση το πρότυπο ISO 50001 σε φορείς του Δημόσιου και ευρύτερου δημόσιου τομέα | 200 | 140 | 100 |
| Ενεργειακή αναβάθμιση σε κτίρια επαγγελματικής χρήσης μέσω Επιχειρήσεων Ενεργειακών Υπηρεσιών | 219 | 161 | 120 |
| Ανάπτυξη ευφών συστημάτων μέτρησης ενέργειας | 345 | 337 | 0 |
| Δράσεις ΕΠΠΕΡΑΑ | 0 | 0 | 0 |
| Συμψηφισμός προστίμων αυθαιρέτων | 80 | 60 | 40 |
| Ενεργειακοί υπεύθυνοι και ΣΔΕΑ | 400 | 383 | 371 |
| Τηλεθέρμανση | 0 | 0 | 0 |
| Αντικατάσταση παλαιών ελαφριών φορτηγών δημοσίου και ιδιωτικού τομέα | 143 | 0 | 0 |
| Αντικατάσταση παλαιών επιβατικών οχημάτων ιδιωτικού τομέα | 0 | 0 | 0 |
| Οδοφωτισμός | 320 | 282 | 230 |
| Αντλιοστάσια | 274 | 243 | 180 |
| ΠΕΑ-Άλλος λόγος | 300 | 298 | 257 |

Σχηματικά η σχετική συχνότητα (%) εμφάνισης κάθε μέτρου, ανά έτος, παρουσιάζεται στο επόμενο σχήμα.



Σχήμα 6-11: Σχετική συμμετοχή μέτρων - πολιτικών στο σύνολο των βέλτιστων χαρτοφυλακίων

6.4 Συμπεράσματα

Δεδομένων των εθνικών μεσοπρόθεσμων δεσμεύσεων για αύξηση της ενεργειακής αποδοτικότητας και μη παραβλέποντας τις αβεβαιότητες της ελληνικής πραγματικότητας που απειλούν την επιτυχή υλοποίηση των μέτρων που σχετίζονται με τις εν λόγω δεσμεύσεις, η παρούσα μελέτη προτείνει ένα ολοκληρωμένο πλαίσιο πολυκριτηριακής αξιολόγησης μέτρων πολιτικής ενεργειακής απόδοσης, το οποίο εμπλέκει άμεσα και αποτελεσματικά τον ανθρώπινο παράγοντα στη διαδικασία λήψης απόφασης. Η αβεβαιότητα που συνδέεται με τη διαδικασία λήψης απόφασης αξιολογείται εδώ υπό δύο μορφές. Η πρώτη εμπλέκει την ανθρώπινη γνώση και εμπειρία για την αποτύπωση και αξιολόγηση των σημαντικότερων κινδύνων που σχετίζονται με το υπό εξέταση πακέτο μέτρων. Οι αναγνωρισθέντες κίνδυνοι περιλαμβάνουν την πολύπλοκη γραφειοκρατία που απαιτείται στις διαδικασίες υλοποίησης των περισσότερων μέτρων, την αδυναμία των τοπικών αρχών (σε δημοτικό/περιφερειακό επίπεδο) να ευθυγραμμίσουν τις προτεραιότητές τους με τις κατευθύνσεις της κεντρικής διοίκησης, την πολιτική αστάθεια, το απαιτητικό ρυθμιστικό πλαίσιο σε σχέση με την ωριμότητα της αγοράς, την ανεπάρκεια χρηματοπιστωτικών ιδρυμάτων και την έλλειψη κοινωνικής αποδοχής, την ανεπαρκή κατάρτιση του προσωπικού και τις δυσμενείς συνθήκες της αγοράς. Όλα τα παραπάνω συνθέτουν μια ομάδα κινδύνων οι οποίοι διαμορφώνονται και αξιολογούνται στα πλαίσια της ανάλυσης χρησιμοποιώντας την ανθρώπινη γνώση. Αυτές οι παρατηρήσεις είναι ιδιαίτερα σημαντικές για τον σχεδιασμό των νέων μέτρων ενεργειακής αποδοτικότητας και η ενσωμάτωσή τους στον πυρήνα της μοντελικής διαδικασίας δίνει επιπλέον αξία στα προκύπτοντα αποτελέσματα της ανάλυσης. Στην προτεινόμενη μεθοδολογία ο παράγοντας του κινδύνου λαμβάνει σημαντικό μέρος της ανάλυσης καθώς αποτελεί ένα από τα δύο κριτήρια βελτιστοποίησης και στα δύο υπό εξέταση προβλήματα ανάλυσης χαρτοφυλακίου, τα οποία επιλύονται με την μέθοδο AUGMECON 2. Σε δεύτερο επίπεδο η υπολειπόμενη αβεβαιότητα θεωρείται ως μία έλλειψη γνώσης που δεν μπορεί να μεταφραστεί στην μορφή συγκεκριμένων κινδύνων και ως εκ τούτου συμπεριλαμβάνεται στο μοντέλο της βελτιστοποίησης ως στοχαστική αβεβαιότητα, έναντι της οποίας τα αποτελέσματα του μοντέλου δοκιμάζονται μέσω της τεχνικής προσομοίωσης

Monte Carlo. Ένα τέτοιο νέο πλαίσιο αξιολόγησης πολιτικών με τοποθέτηση του ανθρώπινου παράγοντα στην καρδιά των μοντελικών διεργασιών, προσανατολισμένο στην συν-σχεδίαση και την συμπαραγωγή γνώσης και χειριζόμενο επαρκώς τις αβεβαιότητες του συστήματος διασφαλίζει ότι οι δραστηριότητες μοντελοποίησης είναι ρεαλιστικές, καθώς επίσης αυξάνει την εμπιστοσύνη των εμπειρογνομώνων στα προκύποντα αποτελέσματα. Προκειμένου να ενισχυθεί περαιτέρω η προτεινόμενη μεθοδολογία προτείνεται να διευρυνθεί ο κύκλος των εμπλεκόμενων εμπειρογνομώνων και να συμπεριληφθούν, πέραν των φορέων χάραξης πολιτικής που εμπλέκει η παρούσα ανάλυση, ένα νέο σύνολο ενδιαφερόμενων φορέων όπως για παράδειγμα εκπρόσωποι κοινωνικών ομάδων, μη κυβερνητικών οργανισμών, θεσμών του ιδιωτικού και δημοσίου τομέα, φορείς που σχετίζονται με την τεχνολογική καινοτομία, ερευνητές κ.α. Επίσης το μοντέλο της βελτιστοποίησης μπορεί να ενισχυθεί με την ενσωμάτωση επιπλέον περιορισμών και κριτηρίων αξιολόγησης σχετικά με τις κοινωνικές προεκτάσεις των πολιτικών, όπως η ανεργία και άλλοι κοινωνικοί παράγοντες. Σχετικές αναλύσεις με βάση τις παραπάνω προτάσεις έχουν συμπεριληφθεί στις επόμενες εφαρμογές της διατριβής προκειμένου να διασφαλιστεί η πληρότητα του προτεινόμενου μεθοδολογικού πλαισίου.

Σε επίπεδο εφαρμογής, το πρώτο εκ των δύο μοντέλων να στοχεύει στον προσδιορισμό του βέλτιστου χαρτοφυλακίου μέτρων που πρέπει να υλοποιηθούν με βάση τους διαθέσιμους οικονομικούς πόρους, με κριτήριο τη μεγιστοποίηση της εξοικονομούμενης ενέργειας και την ελαχιστοποίηση του ρίσκου. Το δεύτερο πρόβλημα εξετάζει κατάλληλα χαρτοφυλάκια μέτρων πολιτικής που επιτυγχάνουν εξ ολοκλήρου τον στόχο εξοικονόμησης ενέργειας, με κριτήριο την ελαχιστοποίηση του κόστους και του ρίσκου που ενέχει. Στοχεύει με άλλα λόγια στον προσδιορισμό του βέλτιστου χαρτοφυλακίου μέτρων πολιτικής και του συνεπαγόμενου επιπρόσθετου κόστους που πρέπει να ανευρεθεί προκειμένου να επιτευχθεί ο στόχος εξοικονόμησης ενέργειας. Με αφετηρία τα μέτρα πολιτικής που ορίζονται στο τρίτο ΕΣΔΕΑ και την ενσωμάτωση του ρίσκου με βάση τις πραγματικές εκτιμήσεις των εμπειρογνομώνων - στελεχών του ΥΠΕΝ, λαμβάνεται υπόψη η οικονομική αποδοτικότητα του κάθε μέτρου, οι διαθέσιμοι οικονομικοί πόροι, και η αβεβαιότητα στην επιτυχία των επιλεγμένων μέτρων

πολιτικής προκειμένου επιπλέον να εξεταστεί η ευστάθεια των υποκειμένων λύσεων. Τα αποτελέσματα της μελέτης αναδεικνύουν τρία κύρια μέτρα πολιτικής που πρέπει να υλοποιηθούν με στόχο τη μεγιστοποίηση της οικονομικής αποδοτικότητας καθώς και την ελαχιστοποίηση του ρίσκου υλοποίησης, αυτά είναι: η ενεργειακή αναβάθμιση των κατοικιών, τα έργα ενεργειακής απόδοσης και επίδειξης σε ΜΜΕ και μέτρα στήριξης και οι ενεργειακοί υπεύθυνοι και σχέδια δράσης δημόσιων κτιρίων. Επίσης αξίζει να σημειωθεί ότι η ενσωμάτωση των συγκεκριμένων μέτρων στο τελικό χαρτοφυλάκιο διατηρεί την ευστάθεια της λύσης σε πολύ υψηλά επίπεδα, καθώς επαναλαμβάνονται με τη μεγαλύτερη συχνότητα μεταξύ των βέλτιστων χαρτοφυλακίων, ελαχιστοποιώντας την αβεβαιότητα επίτευξης των επιθυμητών εξοικονομήσεων ενέργειας. Όσον αφορά την αποτελεσματικότητά τους και την ευρωστία ως επόμενα πλέον κατάλληλα μέτρα προκύπτουν οι επενδύσεις σε οδοφωτισμό και αντλιοστάσια, καθώς και δράσεις που σχετίζονται με την προώθηση πιστοποιητικών ενεργειακής απόδοσης. Επιπρόσθετα γίνεται φανερό πως ο εθνικός στόχος εξοικονόμησης ενέργειας δε μπορεί να επιτευχθεί με το διαθέσιμο προϋπολογισμό, δοθέντων και των τεχνικών περιορισμών. Λαμβάνοντας υπόψη τα αποτελέσματα της μελέτης αναφορικά με το χρηματοδοτικό κενό προς την υλοποίηση του στόχου, σημειώνεται ότι για την υλοποίηση ενός εκ των βέλτιστων χαρτοφυλακίων και την παράλληλη διατήρηση του ρίσκου υλοποίησης σε χαμηλά επίπεδα, απαιτείται η ανεύρεση επιπρόσθετων οικονομικών πόρων της τάξεως των 800 εκατ. €. Απαιτείται ωστόσο προσοχή στην άμεση και αποτελεσματική υλοποίηση των μέτρων πολιτικής, ώστε να επιτευχθεί η εξάντληση των τεχνικών περιορισμών υλοποίησης των μέτρων. Τέλος, υπενθυμίζεται ότι η ενδεχόμενη καθυστέρηση στην υλοποίηση των προτεινόμενων μέτρων πολιτικής θα οδηγήσει σε αυξημένο κόστος συμμόρφωσης με το συνολικό στόχο εξοικονόμησης ενέργειας το 2020. Επομένως είτε νέα, πιο οικονομικώς αποδοτικά και με χαμηλό ρίσκο, μέτρα πρέπει να σχεδιαστούν, είτε να μέσω κατάλληλων ρυθμίσεων να διευρυνθούν τα όρια των τεχνικών περιορισμών. Στα πλαίσια αυτά, το τέταρτο ΕΣΔΕΑ ορίζει τέσσερα νέα μέτρα στο πλαίσιο του άρθρου 7 της Οδηγία 2012/27/ΕΕ, τα οποία περιλαμβάνουν 1) την θεσμοθέτηση του ενεργειακού υπευθύνου στο δημόσιο και ευρύτερο δημόσιο τομέα ή εναλλακτικά την εκπόνηση σχεδίων ενεργειακής

Κεφάλαιο 6. Πολυστοχικό μοντέλο ανάλυσης χαρτοφυλακίου με αξιολόγηση κινδύνου και ανάλυση ευρωστίας για την προώθηση της ενεργειακής αποδοτικότητας στην Ελλάδα

απόδοσης, τα οποία περιέχει συγκεκριμένους στόχους και δράσεις εξοικονόμησης ενέργειας και βελτίωσης της ενεργειακής απόδοσης για τα κτίρια του δημόσιου και ευρύτερου δημόσιου τομέα 2) την επέκταση του μέτρου των πιστοποιητικών ενεργειακής απόδοσης 3) την χρηματοδότηση έργων για την ενεργειακή αναβάθμιση του οδοφωτισμού και 4) την εφαρμογή δράσεων βελτίωσης της ενεργειακής αποδοτικότητας σε εγκαταστάσεις αντλιοστασίων.

Κεφάλαιο 7

7 Πρόταση ολοκληρωμένου πλαισίου ανάλυσης αβεβαιότητας υπό διαφορετικά κοινωνικοοικονομικά σενάρια για τον προσδιορισμό βέλτιστων χαρτοφυλακίων ενεργειακών τεχνολογιών στην ανατολική Αφρική στο πλαίσιο επίτευξης των Στόχων Βιώσιμης Ανάπτυξης.

7.1 Εισαγωγή

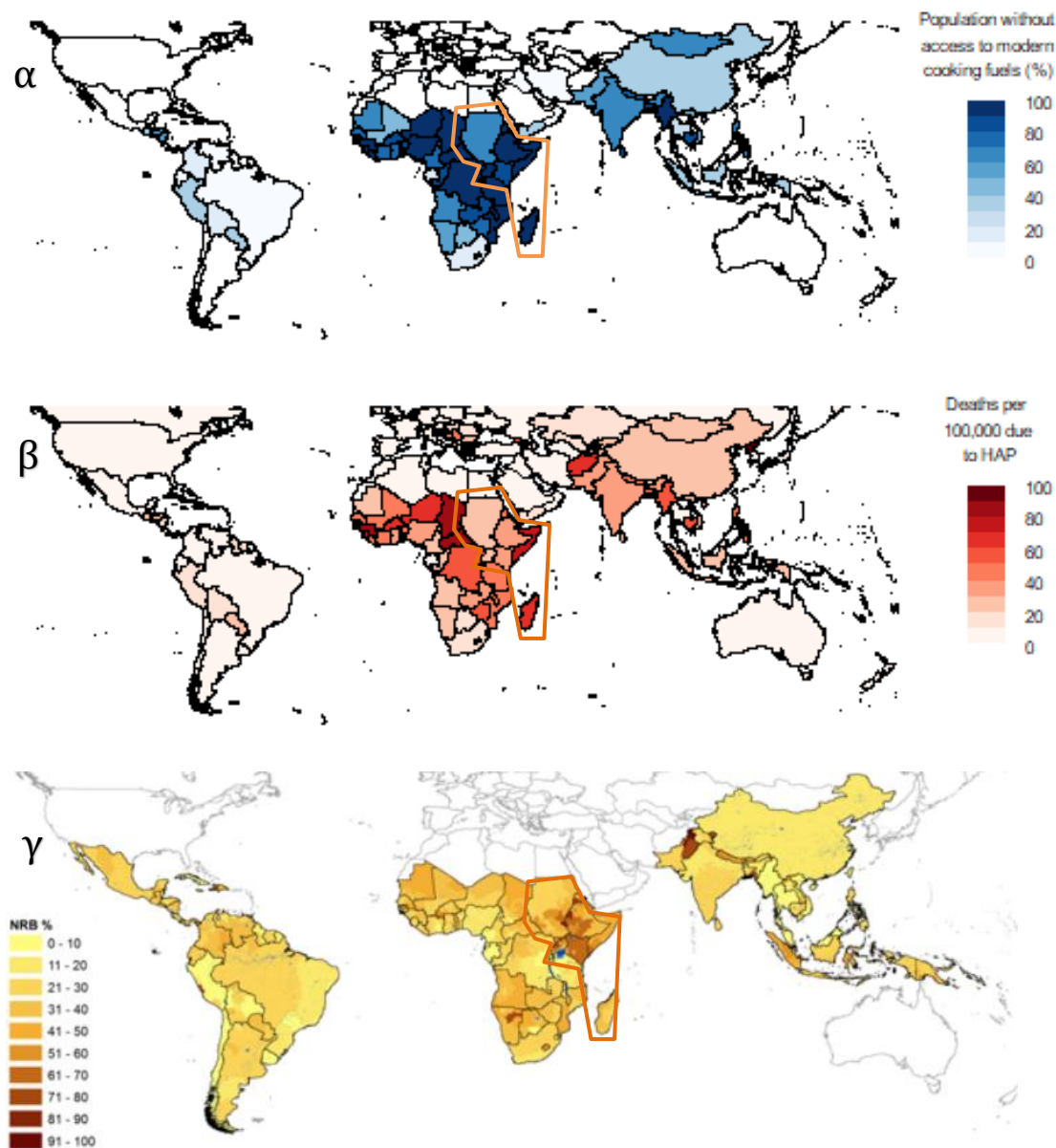
Η υψηλή εξάρτηση των αναπτυσσόμενων χωρών από την παραδοσιακή βιομάζα ως καύσιμο για την κάλυψη των οικιακών αναγκών σε ενέργεια έχει ισχυρό αρνητικό αντίκτυπο στην υγεία και το περιβάλλον (Masera *et al.*, 2015), ένα πρόβλημα που είναι ιδιαίτερα έντονο στην υποσαχάρια Αφρική. Σε παγκόσμιο επίπεδο, η ατμοσφαιρική ρύπανση που προκαλείται από την χρήση στερεών καυσίμων για την κάλυψη των αναγκών του οικιακού τομέα σε μαγείρεμα συγκαταλέγεται μεταξύ των τριών κυριότερων περιβαλλοντικών παραγόντων κινδύνου για την πρόκληση ασθενειών και θανάτων. Ειδικά, οι χώρες της υποσαχάριας Αφρικής εμφανίζουν τα υψηλότερα ποσοστά θανάτων σε παιδιά κάτω των πέντε ετών λόγω της έκθεση στην ατμοσφαιρική ρύπανση από χρήσεις του οικιακού τομέα συγκριτικά με οποιαδήποτε άλλη περιοχή του κόσμου

(Forouzanfar *et al.*, 2016). Στις χώρες της ανατολικής Αφρικής, όπως και σε πολλές χώρες της νότιας Ασίας, ο αριθμός των προαναφερόμενων θανάτων είναι

Κεφάλαιο 7. Πρόταση ολοκληρωμένου πλαισίου ανάλυσης αβεβαιότητας υπό διαφορετικά κοινωνικοοικονομικά σενάρια για τον προσδιορισμό βέλτιστων χαρτοφυλακίων ενεργειακών τεχνολογιών στην ανατολική Αφρική στο πλαίσιο επίτευξης των Στόχων Βιώσιμης Ανάπτυξης.

πενήντα (50) ανά εκατό χιλιάδες (100.000) κατοίκους (Σχήμα 7-1β). Παράλληλα στην υποσαχάρια Αφρική παρατηρούνται υψηλά επίπεδα εξάρτησης από την ξυλεία, τον γαιάνθρακα και τον ξυλάνθρακα για τη θέρμανση και το μαγείρεμα, από τα οποία ένα μεγάλο μέρος - άνω του πενήντα έξι τα εκατό (56%) - συγκομίζεται με μη βιώσιμο τρόπο (Σχήμα 7-1γ), προκαλώντας σημαντικές εκπομπές αερίων θερμοκηπίου (Bailis *et al.*, 2015) και υποβάθμιση των δασών (Ndegwa *et al.*, 2016; Kiruki *et al.*, 2017). Ιδιαίτερα, η εκτεταμένη χρήση παραδοσιακών εγκαταστάσεων μαγειρέματος που χρησιμοποιούν στερεά βιομάζα προκαλεί, πέραν των εκπομπών λόγω των μη βιώσιμων πρακτικών για την παραγωγή της, μεγάλες ποσότητες εκπομπών κατά την καύση (Masera *et al.*, 2015). Ενδεικτικό αποτελεί πως περίπου το σαράντα τις εκατό (40%) των άμεσων και έμμεσων εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου το 2010, σχετιζόταν με τη συγκέντρωση, τον μετασχηματισμό και τη χρήση βιομάζας. Ως εκ τούτου, παρόλο που οι μέσες κατά κεφαλήν εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου στην ανατολική Αφρική είναι σχετικά χαμηλές (ισούνται με περίπου το 1/3 των αντίστοιχων εκπομπών της Κίνας και με περίπου το 1/6 των εκπομπών των Ηνωμένων Πολιτειών για το 2010), οι εκπομπές ανά μονάδα τελικής ενέργειας είναι σχετικά υψηλές (κατά προσέγγιση τρεις φορές υψηλότερες από αυτές της Κίνας και των Ηνωμένων Πολιτειών (IEA, 2017; Janssens-Maenhout *et al.*, 2017). Επιπλέον, τα επίπεδα πρόσβασης σε σύγχρονης μορφής ηλεκτρική ενέργεια στην περιοχή της υποσαχάριας Αφρικής είναι χαμηλότερα από οποιαδήποτε άλλη περιοχή σε παγκόσμιο επίπεδο, αντιστοιχώντας σε μόλις το είκοσι τις εκατό (20%) του πληθυσμού (World Bank and IEA, 2017). Αυτό συνδέεται με το ότι οι χώρες της περιοχής είναι από τις πιο φτωχές σε παγκόσμιο επίπεδο με το μεγαλύτερο ποσοστό του πληθυσμού να μένει σε αγροτικές και ως εκ τούτου τεχνολογικά υποβαθμισμένες περιοχές (ACCES, 2014) (Σχήμα 7-1α).

Κεφάλαιο 7. Πρόταση ολοκληρωμένου πλαισίου ανάλυσης αβεβαιότητας υπό διαφορετικά κοινωνικοοικονομικά σενάρια για τον προσδιορισμό βέλτιστων χαρτοφυλακίων ενεργειακών τεχνολογιών στην ανατολική Αφρική στο πλαίσιο επίτευξης των Στόχων Βιώσιμης Ανάπτυξης.



Σχήμα 7-1: Τρεις κύριες προκλήσεις στην Ανατολική Αφρική - η περιοχή επισημαίνεται σε πορτοκαλί πλαίσιο. α) Πρόσβαση πληθυσμού σε σύγχρονες εστίες μαγειρέματος (IEA, 2017α) β) Ποσοστό θνησιμότητας λόγω ατμοσφαιρικής ρύπανσης εσωτερικού χώρου ανά 100.000 κατοίκους (Forouzanfar et al., 2016) γ) Μη βιώσιμη χρήση ξυλείας ως ποσοστό της συνολικής παραγωγής (Bailis et al., 2015)

Η μεγάλη εξάρτηση από καύσιμη ύλη που μπορεί να συλλεχθεί σε τοπικό επίπεδο και να χρησιμοποιηθεί ως πηγή ενέργειας, η οποία παρατηρείται στις αγροτικές κοινότητες της υποσαχάριας Αφρικής και, όπως αναφέρθηκε, έχει συχνά ως αποτέλεσμα την υποβάθμιση των δασών και τη δημιουργία προβλημάτων στην υγεία, παρουσιάζει ομοιότητες με τις προβιομηχανικές εποχές των

Κεφάλαιο 7. Πρόταση ολοκληρωμένου πλαισίου ανάλυσης αβεβαιότητας υπό διαφορετικά κοινωνικοοικονομικά σενάρια για τον προσδιορισμό βέλτιστων χαρτοφυλακίων ενεργειακών τεχνολογιών στην ανατολική Αφρική στο πλαίσιο επίτευξης των Στόχων Βιώσιμης Ανάπτυξης.

αναπτυγμένων χωρών (Elias and Victor, 2005). Τα ενεργειακά συστήματα των, πλέον, αναπτυγμένων χωρών ακολούθησαν μια μακρά πορεία μετάβασης για την οποία χρειάστηκαν πολλές και ριζικές καινοτομίες (Geels and Schot, 2007) κάθε μία από τις οποίες συνέβαλε στην εξοικονόμηση κόστους και/ή στην βελτίωση της ποιότητας των ενεργειακών υπηρεσιών (Fouquet, 2010). Σήμερα οι τεχνολογικά φτωχές χώρες έχουν τη δυνατότητα υπέρβασης κάποιων σταδίων εξέλιξης («το πήδημα του βατράχου» ή “leapfrogging”), δηλαδή δίνεται οι δυνατότητα σε χώρες που δεν έχουν υιοθετήσει ένα κύμα τεχνολογιών, να προχωρήσουν άμεσα, χωρίς τεχνολογικά εμπόδια, στην υιοθέτηση του επόμενου τεχνολογικού κύματος. Τεχνολογίες που είναι πιο πιθανό να υιοθετηθούν με «το πήδημα του βατράχου» είναι τεχνολογίες χωρίς απαιτήσεις σε μεγάλες αλυσίδες εφοδιασμού ή υποδομές δικτύου (Tukker, 2005; Szabó *et al.*, 2013). Ως εκ τούτου το πλαίσιο για την επίτευξη της πρόσβασης σε σύγχρονης μορφής ηλεκτρική ενέργεια στην Αφρική διαφέρει από πρακτικές που παρατηρούνται ιστορικά σε άλλες χώρες. Σε αυτό σημαντικό ρόλο διαδραματίζει και το γεγονός ότι οι διάφορες προκλήσεις προς την επίτευξη της καθολικής πρόσβασης σε προσιτές, αξιόπιστες και σύγχρονες υπηρεσίες ενέργειας και την κατασκευή αντίστοιχων υποδομών έρχονται ταυτόχρονα με την ανάγκη αντιμετώπισης των σοβαρών επιπτώσεων που προκαλεί η κλιματική αλλαγή και την επακόλουθη υιοθέτηση υψηλών στόχων για το κλίμα (Agbemabiese and Nkomo, 2012). Επιπλέον, η αυξανόμενη εξάρτηση της υποσαχάριας Αφρικής από τον άνθρακα ενδέχεται να επιβάλλει σημαντικούς οικολογικούς περιορισμούς, εκτός εάν η συνολική εξάρτηση από την παραδοσιακή βιομάζα μειωθεί υπέρ των σύγχρονων πηγών και υπηρεσιών ενέργειας (Santos *et al.*, 2017). Κατά συνέπεια, απαιτούνται καινοτόμα πλαίσια τα οποία θα μπορούν να υποστηρίξουν ταυτόχρονα τους στόχους για πρόσβαση σε αξιόπιστη και σύγχρονη μορφή ηλεκτρικής ενέργειας, καλή υγεία και δράση για το κλίμα εντός ενός εφικτού αλλά ταυτόχρονα φιλόδοξου χρονοδιαγράμματος.

Και τα τρία προαναφερθέντα προβλήματα – οι επιπτώσεις στην υγεία και στο κλίμα και η έλλειψη πρόσβασης σε αξιόπιστες και σύγχρονες υπηρεσίες ενέργειας

Κεφάλαιο 7. Πρόταση ολοκληρωμένου πλαισίου ανάλυσης αβεβαιότητας υπό διαφορετικά κοινωνικοοικονομικά σενάρια για τον προσδιορισμό βέλτιστων χαρτοφυλακίων ενεργειακών τεχνολογιών στην ανατολική Αφρική στο πλαίσιο επίτευξης των Στόχων Βιώσιμης Ανάπτυξης.

-αναγνωρίζονται από την Ατζέντα 2030 των Ηνωμένων Εθνών για τη Βιώσιμη Ανάπτυξη (Desa, U. N., 2016), η οποία θέτει συγκεκριμένους στόχους για την επίλυσή τους. Πιο συγκεκριμένα, μεταξύ των δεκαεφτά (17) Στόχων Βιώσιμης Ανάπτυξης - ΣΒΑ (Sustainable Development Goals - SDGs) που προτείνονται στην Ατζέντα, τρεις από αυτούς συνδέονται άμεσα με την επίλυση καθενός εκ των τριών προβλημάτων έως το 2030. Αυτοί είναι: ο Στόχος 3 – Καλή υγεία και ευημερία (SDG 3), ο Στόχος 7 – Φθηνή και καθαρή ενέργεια (SDG 7), και ο Στόχος 13 - Δράση για το κλίμα (SDG 13). Η εστίαση στη βελτίωση της πρόσβασης σε σύγχρονες πηγές ενέργειας αποτελεί μια δράση η οποία αποδεικνύεται ότι πέραν της συμβολής στον Στόχο 7 βοηθάει στην πρόοδο πολλαπλών από τους ΣΒΑ, συμπεριλαμβανομένων εκείνων που αφορούν την υγεία (Στόχος 3) και τη δράση για το κλίμα (Στόχος 13) (Nerini *et al.*, 2017). Ωστόσο, ειδικά για τις χώρες της υποσαχάριας Αφρικής η πρόοδος που απαιτείται ώστε να επιτευχθεί καθολική πρόσβαση σε προσιτές, αξιόπιστες και σύγχρονες υπηρεσίες ενέργειας μέσα στην επόμενη δεκαετία, όπως προτείνεται από τον Στόχο 7, ξεπερνά τα όρια του εφικτού (Rao and Pachauri, 2017).

Σε τέτοιες περιοχές, όπου η έλλειψη πρόσβασης σε σύγχρονες πηγές ενέργειας και η επακόλουθη υψηλή εξάρτηση από την παραδοσιακή βιομάζα είναι οι κύριες αιτίες εκπομπών αερίων θερμοκηπίου και πρόωρης θνησιμότητας, οι πολιτικές γης και οι επιδοτήσεις νέων τεχνολογιών πιθανώς να αποτελέσουν αποτελεσματικά μέσα πολιτικής προς τη βιώσιμη ανάπτυξη. Για παράδειγμα στην περίπτωση της υποσαχάριας Αφρικής μια οικονομικά αποδοτική εναλλακτική λύση για την αντιμετώπιση της υποβάθμισης των δασών και της ατμοσφαιρικής ρύπανσης από την χρήση ξυλείας και ξυλάνθρακα για κάλυψη αναγκών ενέργειας του οικιακού τομέα σε βραχυπρόθεσμο ορίζοντα είναι η βελτίωση της αποδοτικότητας των ενεργειακών συστημάτων βιομάζας (Smeets, Johnson and Ballard-Tremeeer, 2012; Nerini, Ray and Boulkaid, 2017). Εναλλακτική λύση θα μπορούσαν να αποτελέσουν μέθοδοι όπως η αγροδασοκομία, οι οποίες αυξάνουν την παραγωγή βιομάζας ανά μονάδα γης και αποτελούν υποσχόμενες και οικονομικά αποδοτικές επιλογές για την αντιμετώπιση της αποψίλωσης και

Κεφάλαιο 7. Πρόταση ολοκληρωμένου πλαισίου ανάλυσης αβεβαιότητας υπό διαφορετικά κοινωνικοοικονομικά σενάρια για τον προσδιορισμό βέλτιστων χαρτοφυλακίων ενεργειακών τεχνολογιών στην ανατολική Αφρική στο πλαίσιο επίτευξης των Στόχων Βιώσιμης Ανάπτυξης.

υποβάθμισης των δασών (Nyadzi *et al.*, 2003; Smeets, Johnson and Ballard-Tremeer, 2012; Iiyama *et al.*, 2014). Στην προκειμένη ωστόσο οι συγκεκριμένες λύσεις μειονεκτούν, καθώς αδυνατούν να συμβάλλουν στην αντιμετώπιση των προβλημάτων της πρόσβασης σε σύγχρονης μορφής ενέργεια και της μείωσης των επιβλαβών επιδράσεων στην υγεία. Αντίθετα θα μπορούσε να θεωρηθεί πως η μεγαλύτερη αφθονία βιομάζας, λόγω των βελτιωμένων μεθόδων παραγωγής, μεταφράζεται σε υψηλότερη κατανάλωση και επακόλουθη έκθεση στην ρύπανση και τις επιβλαβείς της επιδράσεις. Επομένως, τεχνικές οι οποίες βελτιώνουν την αποτελεσματικότητα στην χρήση και όχι στην παραγωγή της βιομάζας, όπως οι καθαρές εγκαταστάσεις μαγειρέματος (ACCES, 2014; Nerini, Ray and Boulkaid, 2017) και ο βελτιωμένος σχεδιασμός κλιβάνων με κάρβουνο (Bailis *et al.*, 2013; Iiyama *et al.*, 2014), αποτελούν τις βέλτιστες λύσεις όσον αφορά τη συνεισφορά στη βελτίωση της ποιότητας του μαγειρέματος και τη μείωση της έκθεσης στη σχετική ατμοσφαιρική ρύπανση. Ωστόσο εδώ επισημαίνεται πως ακόμα και η χρήση καθαρών εγκαταστάσεων μαγειρέματος με βιομάζα δεν ανταποκρίνεται πάντα στα πρότυπα για την ποιότητα του αέρα που θέτει ο Παγκόσμιος Οργανισμός Υγείας (Pope *et al.*, 2017). Ως εκ τούτου θα πρέπει συμπληρωματικά να εξεταστεί η υιοθέτηση τεχνολογιών οι οποίες υποκαθιστούν τη βιομάζα ως πηγή ενέργειας, ειδικά για τις ανάγκες μαγειρέματος. Μία τέτοια τεχνολογία είναι το υγραέριο (υγροποιημένο αέριο πετρελαίων), γνωστό διεθνώς και ως LPG (Liquified Petroleum Gas). Το υγραέριο έχει αποδειχθεί πως μπορεί να αντικαταστήσει αποτελεσματικά ένα μέρος της χρήσης βιομάζας ως καύσιμο για το μαγείρεμα στις αναπτυσσόμενες χώρες, ενώ ταυτόχρονα συμβάλλει στη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου και της αέριας ρύπανσης εσωτερικού χώρου (Singh, Pachauri and Zerriffi, 2017; Bruce *et al.*, 2018). Οι εστίες μαγειρέματος αιθανόλης έχουν επίσης σαφή οφέλη στη βελτίωση της αέριας ρύπανσης εσωτερικού χώρου, παρόλο που τα οφέλη από τη μείωση των εκπομπών εξαρτώνται από την πρώτη ύλη που χρησιμοποιείται για την παραγωγή της αιθανόλης (Gopal and Kammen, 2009), ενώ ταυτόχρονα η εφαρμογή της συγκεκριμένης τεχνολογίας σε μεγάλη κλίμακα είναι περιορισμένη

Κεφάλαιο 7. Πρόταση ολοκληρωμένου πλαισίου ανάλυσης αβεβαιότητας υπό διαφορετικά κοινωνικοοικονομικά σενάρια για τον προσδιορισμό βέλτιστων χαρτοφυλακίων ενεργειακών τεχνολογιών στην ανατολική Αφρική στο πλαίσιο επίτευξης των Στόχων Βιώσιμης Ανάπτυξης.

(Benka-Coker *et al.*, 2018; Mudombi *et al.*, 2018). Μια άλλη τεχνολογία που έχει αποδειχθεί επιτυχής στην βελτίωση της πρόσβασης σε σύγχρονη ενέργεια, στην αποφυγή της υποβάθμισης των δασών και στη βελτίωση της υγείας είναι τα συστήματα βιοαερίου. Η συγκεκριμένη τεχνολογία είναι εύκολο να εφαρμοστεί στα αγροτικά νοικοκυριά της ανατολικής Αφρικής, δεδομένου ότι λειτουργεί με τοπικούς πόρους, όπως κατά κύριο λόγο με κοπριά ζώων (Gwanuuya *et al.*, 2012; Mengistu *et al.*, 2015). Ταυτόχρονα δεν πρέπει να παραληφθεί η αναφορά στο μαγειρέμα με χρήση ηλεκτρισμού, το οποίο αποτελεί τον καθαρότερο δυνατό τρόπο μαγειρέματος, δεδομένου ότι δεν ελκύονται εκπομπές κατά τη διαδικασία μαγειρέματος. Ανάμεσα στις πιο καθαρές μορφές ηλεκτρικής ενέργειας από άποψη μείωσης εκπομπών είναι τα φωτοβολταϊκά συστήματα, τα οποία λόγω της ευελιξίας που προσφέρουν, επιτρέπουν την πρόσβαση σε προσιτή ηλεκτρική ενέργεια σε νοικοκυριά εκτός του κεντρικού δικτύου (Mandelli *et al.*, 2016). Παρόλο που μέχρι σήμερα η χρήση ηλεκτρικής ενέργειας για μαγειρέμα δεν είναι διαδεδομένη σε νοικοκυριά εκτός δικτύου λόγω των απαιτήσεων για λειτουργία σε υψηλή τάση (World Bank, 2015), τα αγροτικά φωτοβολταϊκά, όπως και σε μικρότερο βαθμό το βιοαέριο, μπορούν να βελτιώσουν την πρόσβαση σε καθαρή ενέργεια μέσω πολλών εφαρμογών όπως οι ηλιακές εστίες (Szabó *et al.*, 2011; Rahman *et al.*, 2014; Dalla Longa *et al.*, 2018).

Τις τελευταίες δεκαετίες, έχουν αναπτυχθεί πολλά έργα σχετικά με την προώθηση της χρήσης καθαρών εγκαταστάσεων μαγειρέματος, όπως κουζίνες βελτιωμένης στέρεας βιομάζας, συστήματα βιοαερίου, εστίες υγροποιημένου αερίου, εστίες αιθανόλης και ηλιακές εστίες (Usmani, Steele and Jeuland, 2017; Clemens *et al.*, 2018; Quinn *et al.*, 2018), πολλά από τα οποία είναι επιδοτούμενα από το Πράσινο Ταμείο για το Κλίμα. Το Πράσινο Ταμείο για το Κλίμα (Green Climate Fund - GCF) ιδρύθηκε για τη χρηματοδότηση τέτοιων πρωτοβουλιών σε αναπτυσσόμενες χώρες, οι οποίες ενώ είναι οικονομικά αποδοτικές προς τον μετριασμό των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου, συχνά δεν πραγματοποιούνται λόγω έλλειψης οικονομικών μέσων. Ως εκ τούτου, η αποτελεσματική άσκηση πολιτικής για το κλίμα και οι σχετικές μελέτες θα πρέπει

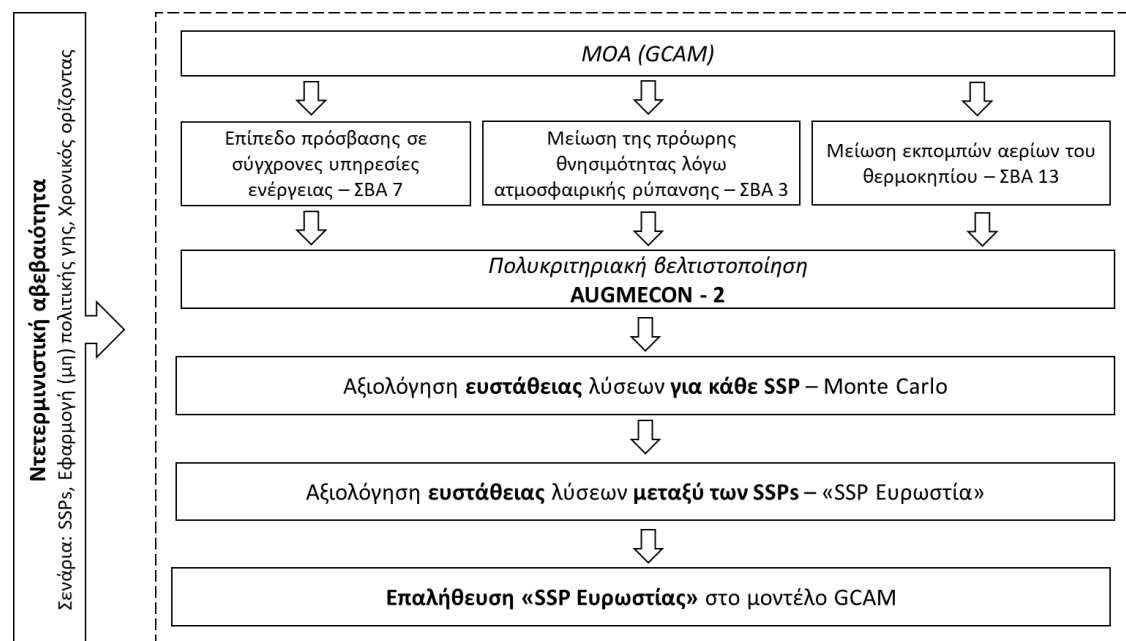
Κεφάλαιο 7. Πρόταση ολοκληρωμένου πλαισίου ανάλυσης αβεβαιότητας υπό διαφορετικά κοινωνικοοικονομικά σενάρια για τον προσδιορισμό βέλτιστων χαρτοφυλακίων ενεργειακών τεχνολογιών στην ανατολική Αφρική στο πλαίσιο επίτευξης των Στόχων Βιώσιμης Ανάπτυξης.

να λαμβάνουν υπόψη τις συνέργειες της κλιματικής δράσης με τους υπόλοιπους ΣΒΑ και την οικονομική αποδοτικότητα. Επίσης είναι σημαντική η ανάλυση αβεβαιότητας όσον αφορά την αποτελεσματικότητα των εξεταζόμενων πολιτικών και σχετικών συνεργειών υπό το πρίσμα διαφορετικών σεναρίων (Doukas *et al.*, 2018).

Προς αυτή την κατεύθυνση, η παρούσα μελέτη εφαρμόζεται στην Ανατολική Αφρική και χρησιμοποιεί το MOA GCAM για να προσομοιώσει την επίδραση που έχουν διαφορετικές πολιτικές γης και διαφορετικά επίπεδα επιδοτήσεων τεχνολογιών παραγωγής ενέργειας, στη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου, στον περιορισμό της ατμοσφαιρικής ρύπανσης και στην επίτευξη πρόσβασης σε σύγχρονες υπηρεσίες ενέργειας υπό διαφορετικά σενάρια πραγματοποίησης τριών κοινωνικοοικονομικών μονοπατιών. Σημειώνεται σε αυτό το σημείο πως ως Ανατολική Αφρική θεωρείται η περιοχή που δίνεται με την ονομασία “Eastern Africa” στο MOA GCAM στην οποία περιλαμβάνονται οι ακόλουθες χώρες: το Μπουρούντι, οι Κομόρες, το Τζιμπουτί, η Ερυθραία, η Αιθιοπία, η Κένυα, η Μαδαγασκάρη, η Ρουάντα, η Σομαλία, το Σουδάν, το Νότιο Σουδάν και η Ουγκάντα. Στη συνέχεια, χρησιμοποιείται η μέθοδος AUGMECON 2 προκειμένου να υλοποιηθεί η ανάλυση χαρτοφυλακίου για τη βέλτιστη κατανομή ενός προϋπολογισμένου ποσού επιδότησης σε διαφορετικές τεχνολογίες για την ταυτόχρονη βέλτιστη επίτευξη των τριών προαναφερθέντων αλληλεξαρτώμενων στόχων, οι οποίοι σχετίζονται με τρεις από τους ΣΒΑ του ΟΗΕ. Η ανάλυση ευρωστίας επιτυγχάνεται τόσο ντετερμινιστικά, με την προσομοίωση διαφορετικών σεναρίων κοινωνικοοικονομικής μετάβασης και διαφορετικών πολιτικών γης, όσο και στοχαστικά με την εφαρμογή προσομοιώσεων Monte Carlo στις παραμέτρους του προς βελτιστοποίηση προβλήματος. Στα καινοτόμα στοιχεία της μελέτης περιλαμβάνεται η πρόταση και εφαρμογή ενός μέσου σεναρίου κοινωνικοοικονομικής μετάβασης το οποίο χρησιμοποιεί τα αποτελέσματα της στοχαστικής ανάλυσης αβεβαιότητας για κάθε κοινωνικοοικονομικό σενάριο, για να προσομοιώσει ένα δεύτερο επίπεδο ανάλυσης αβεβαιότητας μεταξύ των κοινωνικοοικονομικών σεναρίων. Επιπλέον

Κεφάλαιο 7. Πρόταση ολοκληρωμένου πλαισίου ανάλυσης αβεβαιότητας υπό διαφορετικά κοινωνικοοικονομικά σενάρια για τον προσδιορισμό βέλτιστων χαρτοφυλακίων ενεργειακών τεχνολογιών στην ανατολική Αφρική στο πλαίσιο επίτευξης των Στόχων Βιώσιμης Ανάπτυξης.

υλοποιείται ένα δεύτερο βήμα στη διαδικασία ενοποίησης των MOA και AUGMECON 2, το οποίο επιτυγχάνεται με την ανατροφοδότηση των αποτελεσμάτων της ανάλυσης χαρτοφυλακίου ως είσοδο στο μοντέλο GCAM. Συγκεκριμένα, τα χαρτοφυλάκια επιδοτήσεων τα οποία προκύπτουν βέλτιστα στην ανάλυση ευρωστίας μεταξύ των κοινωνικοοικονομικών σεναρίων τρέχουν ξανά στο μοντέλο GCAM, για να ελεγχθεί αν τα συγκεκριμένα χαρτοφυλάκια αντιστοιχούν σε ομοιογενή μεταξύ των σεναρίων αποτελέσματα όσον αφορά τον αντίκτυπο του χαρτοφυλακίου στους ΣΒΑ. Το Σχήμα 7-2 δίνει μια περίληψη του σχεδιασμού της μελέτης, ενώ η αναλυτική περιγραφή της προτεινόμενης μεθοδολογίας δίνεται στην ακριβώς ακόλουθη ενότητα.



Σχήμα 7-2: Σχηματική αναπαράσταση της προτεινόμενης μεθοδολογίας

7.2 Μέθοδοι και μοντέλα

Όπως εξηγήθηκε, ο βασικός στόχος της παρούσας μελέτης είναι να προσδιοριστούν βέλτιστοι συνδυασμοί πολιτικών επιδότησης τεχνολογιών παραγωγής ενέργειας υπό την μορφή χαρτοφυλακίων, τα οποία αξιολογούνται με βάση την επίδοσή τους στην ταυτόχρονη βελτιστοποίηση τριών παραμέτρων των στόχων ΣΒΑ. Αυτοί είναι α) η μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου

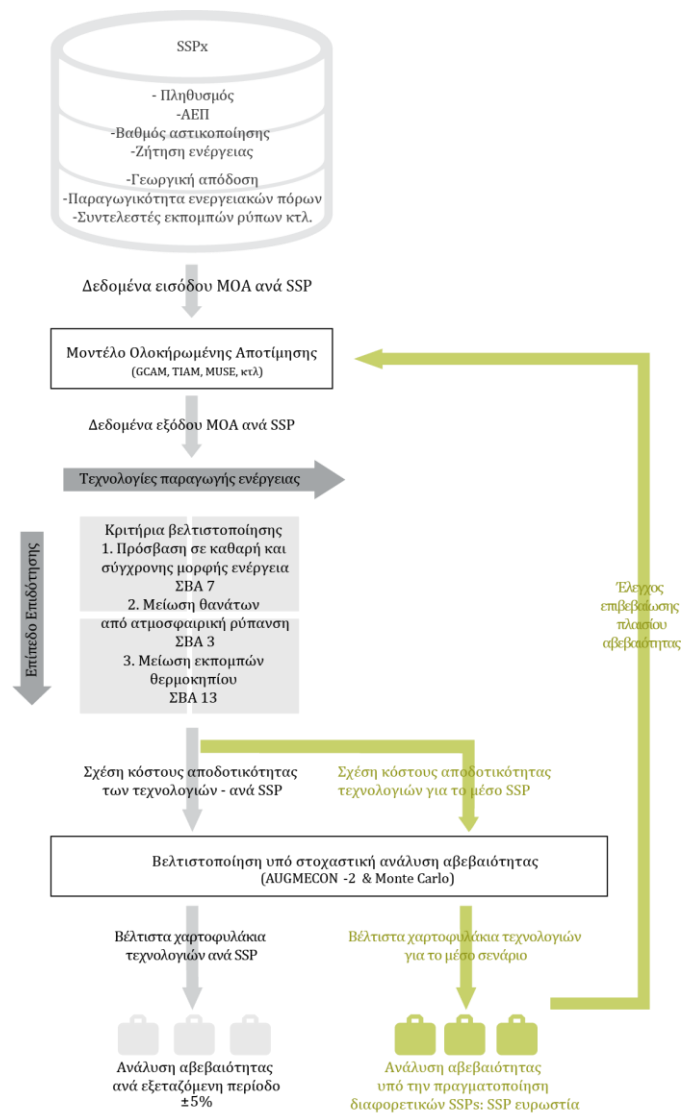
Κεφάλαιο 7. Πρόταση ολοκληρωμένου πλαισίου ανάλυσης αβεβαιότητας υπό διαφορετικά κοινωνικοοικονομικά σενάρια για τον προσδιορισμό βέλτιστων χαρτοφυλακίων ενεργειακών τεχνολογιών στην ανατολική Αφρική στο πλαίσιο επίτευξης των Στόχων Βιώσιμης Ανάπτυξης.

- ΣΒΑ 13, β) η μείωση των επιβλαβών επιπτώσεων στην υγεία λόγω της έκθεσης στην ατμοσφαιρική ρύπανση - ΣΒΑ 3 και γ) η βελτίωση των επιπέδων πρόσβασης σε σύγχρονης μορφής ηλεκτρική ενέργεια - ΣΒΑ 7.

Στον πυρήνα αυτής της ανάλυσης χρησιμοποιείται το MOA GCAM για την προσομοίωση μελλοντικών πολιτικών επιδότησης γης και κοινωνικοοικονομικών σεναρίων για την ανατολική Αφρική. Επισημαίνεται ότι το GCAM είναι ένα δυναμικό-αναδρομικό, μερικής ισορροπίας μοντέλο με τεχνολογικά πλούσιες αναπαραστάσεις της οικονομίας, του ενεργειακού τομέα, του υδάτινου συστήματος, του αγροτικού τομέα και της χρήσης γης. Το μοντέλο GCAM συνδέεται με ένα κλιματικό μοντέλο που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη ανάλυση πολιτικών μετριασμού της κλιματικής αλλαγής, συμπεριλαμβανομένων των τελών εκπομπών άνθρακα και της εμπορίας εκπομπών άνθρακα, για την ανάλυση της επιρροής σχετικών κανονισμών και την ανάλυση της ταχείας ανάπτυξης τεχνολογιών ενέργειας. Για τους σκοπούς της παρούσας μελέτης έχει χρησιμοποιηθεί μια ενημερωμένη έκδοση του μοντέλου GCAM, όπου έχει γίνει χρήση μιας ποικιλίας πηγών δεδομένων για να αναπαρασταθούν με τον κατά το βέλτιστο τρόπο οι αλληλεπιδράσεις μεταξύ ενέργειας, χρήσης γης και εκπομπών στην ανατολική Αφρική. Για την εκτίμηση του αριθμού των πρόωρων θανάτων από ατμοσφαιρικούς ρύπους εσωτερικού και εξωτερικού χώρου, όπως δίνονται από το μοντέλο GCAM, χρησιμοποιούνται δύο διαφορετικές μέθοδοι. Για τη θνησιμότητα που σχετίζεται με τους ρύπους εσωτερικού χώρου, αξιοποιήθηκε η ημι-γραμμική σχέση που ορίζει τις ιστορικές τιμές της σωματιδιακής ρύπανσης (αερολύματα με μικρή διάμετρο - PM_{2.5}). Για τον δείκτη θνησιμότητας που σχετίζεται με την ατμοσφαιρική ρύπανση εξωτερικών χώρων, χρησιμοποιείται το μοντέλο ποιότητας αέρα TM5-FASST, το οποίο είναι ένα μοντέλο ποιότητας αέρα πηγής-υποδοχέα που αποτυπώνει τη θνησιμότητα που σχετίζεται με την ατμοσφαιρική ρύπανση από ένα καθορισμένο σύνολο εκπομπών και εφαρμόζεται για μια συγκεκριμένη εκτίμηση πληθυσμού (Van Dingenen *et al.*, 2018). Το μοντέλο τελικά αθροίζει τα δύο παραπάνω είδη εκπομπών λαμβάνοντας παράλληλα υπόψη τις μεταξύ τους αλληλεπιδράσεις. Αναφέρεται

Κεφάλαιο 7. Πρόταση ολοκληρωμένου πλαισίου ανάλυσης αβεβαιότητας υπό διαφορετικά κοινωνικοοικονομικά σενάρια για τον προσδιορισμό βέλτιστων χαρτοφυλακίων ενεργειακών τεχνολογιών στην ανατολική Αφρική στο πλαίσιο επίτευξης των Στόχων Βιώσιμης Ανάπτυξης.

εδώ πως η βελτίωση και το τρέξιμο του συγκεκριμένου μοντέλου δεν αποτελεί αντικείμενο της παρούσας διατριβής και ο ενδιαφερόμενος αναγνώστης παραπέμπεται στην ενότητα 1 του παραρτήματος της δημοσίευσης των Van de Ven et al. (2019) για μια αναλυτική περιγραφή του μοντέλου.



Σχήμα 7-3: Επισκόπηση προτεινόμενης μεθοδολογίας

Τα αποτελέσματα από κάθε σενάριο πολιτικής και κοινωνικοοικονομικό σενάριο μεταφράζονται σε παραμέτρους βελτιστοποίησης που σχετίζονται με τους στόχους ΣΒΑ. Ουσιαστικά τα αποτελέσματα του MOA αφορούν τις επιδόσεις των εξεταζόμενων τεχνολογιών παραγωγής ενέργειας σε διαφορετικά επίπεδα

Κεφάλαιο 7. Πρόταση ολοκληρωμένου πλαισίου ανάλυσης αβεβαιότητας υπό διαφορετικά κοινωνικοοικονομικά σενάρια για τον προσδιορισμό βέλτιστων χαρτοφυλακίων ενεργειακών τεχνολογιών στην ανατολική Αφρική στο πλαίσιο επίτευξης των Στόχων Βιώσιμης Ανάπτυξης.

χρηματοδότησης, όπως αυτές επηρεάζονται υπό τα εξεταζόμενα σενάρια (πολιτικής γης και κοινωνικοοικονομικά). Τα αποτελέσματα του ΜΟΑ τροφοδοτούνται ως είσοδοι στην μέθοδο AUGMECON 2 με βάση την οποία εκτελείται μια τριστοχική ανάλυση χαρτοφυλακίου, ώστε κάθε ένα από τα προκύπτοντα χαρτοφυλάκια να είναι βέλτιστο ως προς τη μεγιστοποίηση της προόδου σε καθέναν από τους ΣΒΑ.

Επιπλέον, αναγνωρίζοντας ότι η αβεβαιότητα είναι ένα στοιχείο που εμφανίζεται σε κάθε προσπάθεια διαχείρισης και κατανόησης περιβαλλοντικών προβλημάτων (Uusitalo et al., 2015), το προτεινόμενο πλαίσιο ενσωματώνει μια ανάλυση ευρωστίας επί των βέλτιστων χαρτοφυλακίων. Ανάλογα με τον κλάδο και το πλαίσιο εφαρμογής, η αβεβαιότητα των παραμέτρων του μοντέλου μπορεί να αποτυπωθεί με διαφορετικούς τρόπους, που ποικίλλουν από μέτρα απόδοσης, όρια, εναλλακτικά σενάρια (Fuss et al., 2012; Trachanas et al., 2018) ή κατανομές πιθανοτήτων (Lin and Beck, 2012). Στην παρούσα μελέτη, η ενσωμάτωση της αβεβαιότητας στα επιμέρους μοντέλα υλοποιείται με τον προσδιορισμό της επίδρασης που έχουν στα αποτελέσματα, τυχούσες μεταβολές στα δεδομένα εισόδου και εκφράζεται στοχαστικά, μέσω κατανομής πιθανοτήτων, και ντετερμινιστικά, με τη χρήση σεναρίων. Η πιθανοτική αβεβαιότητα ενσωματώνεται στο μοντέλο ανάλυσης χαρτοφυλακίου για την εύρεση κατά Pareto βέλτιστων και εύρωστων χαρτοφυλακίων τεχνολογιών για καθένα από τα κοινωνικοοικονομικά σενάρια SSP. Η ντετερμινιστική αβεβαιότητα, η οποία αναφέρεται στη θεώρηση συγκεκριμένων σεναρίων με σαφώς καθορισμένα σύνολα δεδομένων (Nikas et al., 2019), χρησιμοποιείται για την αξιολόγηση της ευρωστίας των αποτελεσμάτων της μοντελοποίησης υπό την επιρροή διαφορετικών κοινωνικοοικονομικών συνθηκών και για διαφορετικά χρονικά πλαίσια (Van Groenendaal and Kleijnen, 2002). Αυτό επιτυγχάνεται κυρίως με την εξέταση διαφορετικών κοινών κοινωνικοοικονομικών σεναρίων (SSPs), τα οποία αντιπροσωπεύουν γνωσιολογική αβεβαιότητα (epistemic uncertainty) (Hanger-Kopp et al., 2019), αλλά μεμονωμένα προσομοιώνουν μελλοντικούς κόσμους αναφοράς ντετερμινιστικής φύσης, πάνω στους οποίους βασίζονται οι ασκήσεις

Κεφάλαιο 7. Πρόταση ολοκληρωμένου πλαισίου ανάλυσης αβεβαιότητας υπό διαφορετικά κοινωνικοοικονομικά σενάρια για τον προσδιορισμό βέλτιστων χαρτοφυλακίων ενεργειακών τεχνολογιών στην ανατολική Αφρική στο πλαίσιο επίτευξης των Στόχων Βιώσιμης Ανάπτυξης.

μοντελοποίησης για να καλύψουν ένα ευρύ φάσμα πιθανών μελλοντικών κοινωνικοοικονομικών καταστάσεων του κόσμου (van Ruijven et al., 2014). Ένας επόμενος στόχος της παρούσας εργασίας είναι η προσομοίωση ενός σεναρίου «ευρωστίας SSP», στο οποίο χρησιμοποιούνται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων των διαφορετικών SSPs για να οριστούν τα εύρη μεταβολής της πιθανοτικής κατανομής για μια νέα προσομοίωση στοχαστικής αβεβαιότητας μεταξύ των κοινωνικοοικονομικών οδών. Τα αποτελέσματα του σεναρίου «ευρωστίας SSP» συγκρίνονται με τα αποτελέσματα της ανάλυσης που προκύπτει από την εφαρμογή διακριτών κοινωνικοοικονομικών οδών. Με τον τρόπο αυτό προτείνεται ένα βέλτιστο ως προς την εκπλήρωση των ΣΒΑ Pareto, το οποίο είναι εύρωστο για μια σειρά κοινωνικοοικονομικών μονοπατιών.

Η πολυστοχική αξιολόγηση της παρούσας μελέτης αφορά τεχνολογικά φτωχές χώρες – εφαρμογή στην ανατολική Αφρική, οι οποίες βρίσκονται σε προγενέστερο στάδιο εξέλιξης συγκριτικά με τις ώριμες τεχνολογίες των ευρωπαϊκών χωρών που αξιολογήθηκαν στο Κεφάλαιο 6. Επιπρόσθετα ως επέκταση της μεθοδολογίας του Κεφαλαίου 6 η παρούσα μελέτη εισάγει ένα επιπλέον κριτήριο βελτιστοποίησης, μετατρέποντας το δυστοχικό πρόβλημα του Κεφαλαίου 6 σε τριστοχικό, ενώ παράλληλα συνδέει τους στόχους της πολυστοχικής βελτιστοποίησης με τρεις ΣΒΑ, αυξάνοντας την αξία της ανάλυσης σε επίπεδο πολιτικής. Στις καινοτομίες της παρούσας μελέτης προστίθεται επιπλέον η εισαγωγή ντετερμινιστικών σεναρίων με τη μορφή διαφορετικών πολιτικών γης και κοινωνικοοικονομικών μονοπατιών και η προσομοίωση ενός νέου σεναρίου μετάβασης ως ένα μέσο σενάριο κοινωνικοοικονομικής μετάβασης το οποίο προκύπτει από την ανάλυση ευρωστίας μεταξύ των διαφορετικών κοινωνικοοικονομικών μονοπατιών. Επιπλέον υλοποιείται ένα δεύτερο βήμα στη διαδικασία ενοποίησης των MOA και AUGMECON 2, το οποίο επιτυγχάνεται με την ανατροφοδότηση των αποτελεσμάτων της ανάλυσης χαρτοφυλακίου ως είσοδο στο μοντέλο GCAM. Συγκεκριμένα, τα χαρτοφυλάκια επιδοτήσεων τα οποία προκύπτουν βέλτιστα στην ανάλυση «ευρωστίας SSP» τρέχουν ξανά στο μοντέλο GCAM για κάθε SSP, για να ελεγχθεί αν τα συγκεκριμένα χαρτοφυλάκια

Κεφάλαιο 7. Πρόταση ολοκληρωμένου πλαισίου ανάλυσης αβεβαιότητας υπό διαφορετικά κοινωνικοοικονομικά σενάρια για τον προσδιορισμό βέλτιστων χαρτοφυλακίων ενεργειακών τεχνολογιών στην ανατολική Αφρική στο πλαίσιο επίτευξης των Στόχων Βιώσιμης Ανάπτυξης.

αντιστοιχούν σε ομοιογενή μεταξύ των SSPs αποτελέσματα όσον αφορά τον αντίκτυπο του χαρτοφυλακίου στους ΣΒΑ. Ο εντοπισμός χαρτοφυλακίων τεχνολογιών που είναι ευσταθή μεταξύ των διαφορετικών SSPs έχει ιδιαίτερη αξία για τους εμπειρογνώμονες, αφού τους βοηθάει να λάβουν αποφάσεις και να διαμορφώσουν πολιτικές που θα είναι βέλτιστες, ανεξάρτητα από το σενάριο SSPs που ενδέχεται να υλοποιηθεί στο μέλλον, παρέχοντας με αυτόν τον τρόπο ένα χρήσιμο εργαλείο για τη διαχείριση της αβεβαιότητας που βασίζεται στα SSPs.

7.2.1 Περιγραφή σεναρίων

Στη μελέτη εξετάζονται τρία διαφορετικά κοινωνικοοικονομικά σενάρια και δύο σενάρια που προσομοιώνουν την εφαρμογή ή μη εφαρμογή πολιτικών γης, προκειμένου να διερευνηθεί το αντίκτυπο μιας βιώσιμης διαχείρισης γης στην επιλογή των βέλτιστων τεχνολογιών μετάβασης. Ως εκ τούτου συνολικά διερευνήθηκαν έξι διαφορετικά σενάρια για να αξιολογηθούν οι αλληλεπιδράσεις των δύο παραπάνω παραγόντων. Τα έξι σενάρια εφαρμόζονται για την αξιολόγηση της επίδοσης έξι τεχνολογιών μετάβασης υπό την επιρροή είκοσι (20) διαφορετικών επιπέδων επιδότησης, τα οποία δίνουν ένα σύνολο εφτακοσίων είκοσι (720) σεναρίων πολιτικής τα οποία εφαρμόστηκαν στο μοντέλο για τη διερεύνηση της επίδρασης των πολιτικών γης και των επιπέδων επιδότησης στο τρίπτυχο των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου, της υγείας και της πρόσβαση σε σύγχρονης μορφής ηλεκτρική ενέργεια.

Ως κοινωνικοοικονομικά μονοπάτια επιλέγεται μια σειρά από σενάρια - «μονοπάτια» που εξετάζουν πώς η παγκόσμια κοινότητα, τα δημογραφικά και τα οικονομικά στοιχεία ενδέχεται να μεταβληθούν κατά τη διάρκεια του επόμενου αιώνα. Τα «μονοπάτια» αυτά, κοινώς γνωστά ως «κοινά κοινωνικοοικονομικά μονοπάτια» (Shared Socioeconomic Pathways - SSPs) αναπτύχθηκαν από μια διεθνή ομάδα επιστημόνων του κλίματος, οικονομολόγων και μοντελιστών ενεργειακών συστημάτων στο πλαίσιο μιας ευρείας προσπάθειας ερευνητών κατά τα τέλη της δεκαετίας του 2000 σχετικά με την ανάπτυξη νέων σεναρίων

*Κεφάλαιο 7. Πρόταση ολοκληρωμένου πλαισίου ανάλυσης αβεβαιότητας υπό
διαφορετικά κοινωνικοοικονομικά σενάρια για τον προσδιορισμό βέλτιστων
χαρτοφυλακίων ενεργειακών τεχνολογιών στην ανατολική Αφρική στο πλαίσιο επίτευξης
των Στόχων Βιώσιμης Ανάπτυξης.*

διερεύνησης της πορείας εξέλιξης του κόσμου κατά το υπόλοιπο του εικοστού πρώτου αιώνα. Σχετικές προσπάθειες είχαν πραγματοποιηθεί και κατά τη διάρκεια της δεκαετίας του χίλια εννιακόσια ενενήντα, με τη σημαντικότερη από αυτές να οδηγεί στην ανάπτυξη των σεναρίων της IPCC, SRES - Special Report on Emissions Scenarios (Nakicenovic *et al*, 2000). Τα σενάρια SRES εξετάζουν τέσσερις διαφορετικές πιθανές μελλοντικές εκβάσεις στην αύξηση του πληθυσμού, την οικονομική ανάπτυξη και την αύξηση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου. Ωστόσο, τα συγκεκριμένα σενάρια είναι πλέον ξεπερασμένα και μη εφαρμόσιμα, δεδομένου των νέων μεγάλων αλλαγών στην κοινωνία και την παγκόσμια οικονομία οι οποίες έχουν συμβεί κατά τα τελευταία είκοσι χρόνια.

Σε συνέχεια των σεναρίων SRES, μια ομάδα ερευνητών πρότεινε τα αντιπροσωπευτικά μονοπάτια συγκέντρωσης, RCPs - Representative Concentration Pathways, τα οποία επικεντρώνονται στην μοντελοποίηση των μελλοντικών επιπέδων αερίων του θερμοκηπίου και της μέσης θερμοκρασίας της γης. Τα RCPs χρησιμοποιήθηκαν στην 5^η Έκθεση Αξιολόγησης της IPCC (IPCC, 2014). Μεθοδολογικά τα RCPs κάνουν χρήση αναβαθμισμένων ολοκληρωμένων μοντέλων εκτίμησης και έχουν ως αποτέλεσμα να αποδώσουν μια ευέλικτη, διαδραστική και επαναληπτική προσέγγιση των σεναρίων κλιματικής αλλαγής (Moss *et al.*, 2010). Η ονομασία των επιμέρους σεναρίων (RCP2.6, RCP4.5, RCP6, και RCP8.5) πηγάζει από τη θεώρηση διαφορετικών επιπέδων πιθανής μεταβολής στην επιβαλλόμενη ακτινοβολία (radiative forcing) με τιμές αναφοράς τις τιμές του έτους 2100, σε σύγκριση με αυτές της προ-βιομηχανικής περιόδου (+2.6, +4.5, +6.0 και +8.5 W/m² αντίστοιχα). Ταυτόχρονα με τα RCPs έγιναν προσπάθειες μοντελοποίησης του τρόπου με τον οποίο οι κοινωνικοοικονομικοί παράγοντες μπορούν να αλλάξουν κατά τον επόμενο αιώνα, οι οποίες οδήγησαν στον προσδιορισμό των κοινών κοινωνικοοικονομικών μονοπατιών (SSPs). Ως κοινωνικοοικονομικοί παράγοντες θεωρούνται μεγέθη όπως ο πληθυσμός, η οικονομική ανάπτυξη, το επίπεδο εκπαίδευσης, ο βαθμός αστικοποίησης, ο ρυθμός τεχνολογικής ανάπτυξης, η χρήση της γης, η διακυβέρνηση και η συγκέντρωση πλούτου. Με βάση τα παραπάνω μεγέθη, τα SSPs εξετάζουν πέντε

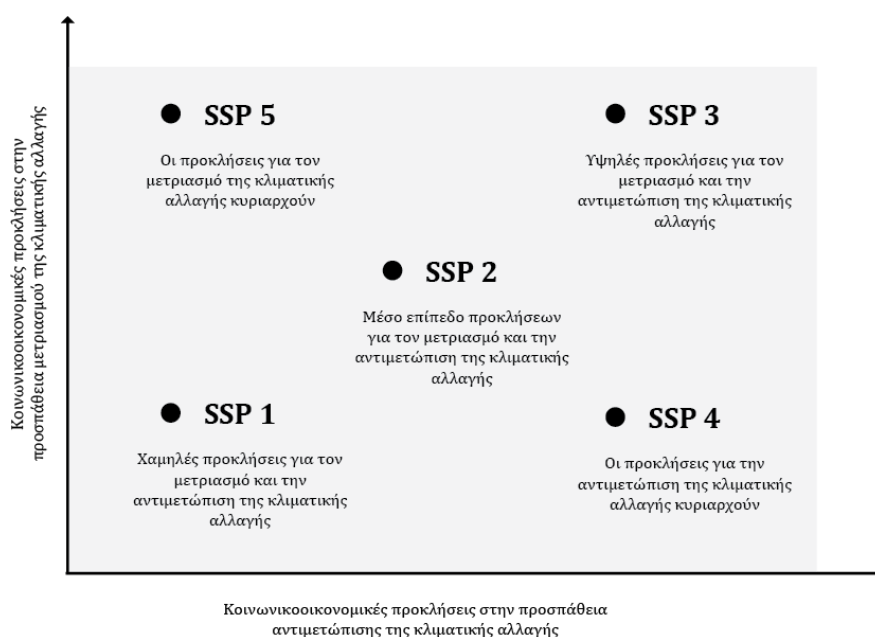
Κεφάλαιο 7. Πρόταση ολοκληρωμένου πλαισίου ανάλυσης αβεβαιότητας υπό διαφορετικά κοινωνικοοικονομικά σενάρια για τον προσδιορισμό βέλτιστων χαρτοφυλακίων ενεργειακών τεχνολογιών στην ανατολική Αφρική στο πλαίσιο επίτευξης των Στόχων Βιώσιμης Ανάπτυξης.

διαφορετικούς τρόπους με τους οποίους η παγκόσμια κοινότητα θα μπορούσε να εξελιχθεί στην περίπτωση απουσίας πολιτικής για το κλίμα και πώς στην περίπτωση εφαρμογής διαφορετικών επιπέδων μετριασμού της κλιματικής αλλαγής, τα οποία σχετίζονται με τους στόχους μετριασμού που θέτουν τα RCPs. Οι δύο προσπάθειες (SSPs και RCPs) σχεδιάστηκαν για να είναι συμπληρωματικές ως προς την ανάλυση της αλληλεπίδρασης της κλιματικής αλλαγής με κοινωνικούς και οικονομικούς παράγοντες. Τα RCPs θέτουν τα μονοπάτια για τις μελλοντικές συγκεντρώσεις αερίων του θερμοκηπίου και τα επίπεδα της μέσης θερμοκρασίας της γης με ορίζοντα το τέλος του αιώνα, ενώ τα SSPs θέτουν το βαθμό στο οποίο οι μειώσεις των εκπομπών θα επιτευχθούν ή όχι. Συγκεκριμένα, κάθε SSP εξετάζει τον τρόπο με τον οποίο θα μπορούσε να επιτευχθεί κάθε διαφορετικό RCP στο πλαίσιο των υποκείμενων κοινωνικοοικονομικών χαρακτηριστικών και των κοινών πολιτικών παραδοχών αυτού του κόσμου. Τα SSPs επίσης καθορίζουν διαφορετικούς κόσμους βάσης που μπορεί να προκύψουν ελλείψει οποιασδήποτε συντονισμένης διεθνούς προσπάθειας για την αντιμετώπιση της κλιματικής αλλαγής, πέραν εκείνων που έχουν ήδη υιοθετηθεί από τις χώρες. Σε αυτές εξαιρούνται οι δεσμεύσεις για τη θέσπιση νέων πολιτικών, όπως αυτές που περιλαμβάνονται στη συμφωνία του Παρισιού μέχρι το δύο χιλιάδες εικοσιπέντε (2025) και το δύο χιλιάδες τριάντα (2030). Οι διαφορετικοί κόσμοι βάσης των SSPs προκύπτουν λόγω του ότι οι υποκείμενοι παράγοντες όπως ο πληθυσμός, η τεχνολογική και οικονομική ανάπτυξη θα μπορούσαν να οδηγήσουν σε πολύ διαφορετικές μελλοντικές εκπομπές και αποτελέσματα αύξησης της θερμοκρασίας, ακόμη και χωρίς να εξεταστεί η εφαρμογή κάποιας πολιτικής για το κλίμα. Λόγω της υψηλότερης συνθετότητάς τους, η πλήρης ανάπτυξη των SSPs ακολούθησε μια πολύ μεγαλύτερη πορεία συγκριτικά με τα RCPs. Τα SSPs είχαν αρχικά δημοσιευθεί το 2016, αλλά αξιοποιήθηκαν αργότερα, στο πλαίσιο της προετοιμασίας για την 6^η Έκθεση Αξιολόγησης της IPCC (IPCC, 2021).

Οι πέντε αφηγήσεις στις οποίες βασίζονται τα SSPs και περιγράφουν ευρείες κοινωνικοοικονομικές τάσεις που θα μπορούσαν να διαμορφώσουν τις

Κεφάλαιο 7. Πρόταση ολοκληρωμένου πλαισίου ανάλυσης αβεβαιότητας υπό διαφορετικά κοινωνικοοικονομικά σενάρια για τον προσδιορισμό βέλτιστων χαρτοφυλακίων ενεργειακών τεχνολογιών στην ανατολική Αφρική στο πλαίσιο επίτευξης των Στόχων Βιώσιμης Ανάπτυξης.

ανθρώπινες κοινωνίες του επόμενου αιώνα περιλαμβάνουν: έναν κόσμο βιωσιμότητας με εστίαση στη συνολική ευημερία και τη μείωση της παγκόσμιας ανισότητας (Sustainability - SSP1), ένα κόσμο όπου οι κοινωνικές, οικονομικές και τεχνολογικές τάσεις ακολουθούν τα γενικά ιστορικά μοτίβα τους, διαμορφώνοντας ένα μέσο σενάριο (Middle of the road - SSP2), ένα κατακερματισμένο κόσμο ανισοτήτων με αργή πρόοδο προς τη βιωσιμότητα (Regional rivalry - SSP3), ένα κόσμο συνεχώς αυξανόμενης ανισότητας και ανταγωνισμού μεταξύ των χωρών (Inequality - SSP4), και έναν κόσμο ταχείας ανάπτυξης της οικονομίας, η οποία τροφοδοτείται από την χρήση ορυκτών καυσίμων και συνδέεται με αυξημένες απαιτήσεις σε κατανάλωση ενέργειας (Fossil – fueled development - SSP5) (O'Neill et al., 2014). Όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 7-4, τα SSPs αναπτύσσονται σε δύο άξονες, οι οποίοι αντιστοιχούν στην ένταση των πολιτικών για το κλίμα.



Σχήμα 7-4: Διαγραμματική απεικόνιση των κοινών κοινωνικοοικονομικών μονοπατιών

Ο κάθετος άξονας αναφέρεται στην ένταση πολιτικών για το κλίμα που τίθενται με σκοπό να αποτρέψουν ένα ορισμένο επίπεδο της κλιματικής αλλαγής (mitigation), ενώ ο οριζόντιος άξονας εκφράζει την επίδοση των σεναρίων υπό

Κεφάλαιο 7. Πρόταση ολοκληρωμένου πλαισίου ανάλυσης αβεβαιότητας υπό διαφορετικά κοινωνικοοικονομικά σενάρια για τον προσδιορισμό βέλτιστων χαρτοφυλακίων ενεργειακών τεχνολογιών στην ανατολική Αφρική στο πλαίσιο επίτευξης των Στόχων Βιώσιμης Ανάπτυξης.

την επιρροή κλιματικών πολιτικών με σκοπό την αντιμετώπιση της κλιματικής αλλαγής (adaptation). Επισημαίνεται εδώ πως και τα πέντε παραπάνω σενάρια είναι πιθανά, παρόλο που κάποια από αυτά απεικονίζουν ακραίες περιπτώσεις. Η διατύπωση διαφορετικών σεναρίων που εμφανίζουν μεγάλη μεταξύ τους απόκλιση δείχνουν το εύρος της αβεβαιότητας σχετικά με τη κατεύθυνση του κόσμου και αναδεικνύουν την αναγκαιότητα χειρισμού της.

Τα χαρακτηριστικά κάθε SSP περιγράφονται λεπτομερώς παρακάτω (O'Neill *et al.*, 2017):

SSP1: Χαμηλές προκλήσεις στην προσπάθεια μετριασμού και προσαρμογής στην κλιματική αλλαγή

Σε αυτό το σενάριο ο κόσμος μετατοπίζεται σταδιακά προς μια πιο βιώσιμη πορεία δίνοντας έμφαση στη συνολική ευημερία, η οποία σέβεται τους περιβαλλοντικούς παράγοντες. Η διαχείριση των διαφορών μεταξύ των αστικών τάξεων σε παγκόσμιο επίπεδο βελτιώνεται σταδιακά, οι επενδύσεις στην εκπαίδευση και την υγεία επιταχύνουν τη δημογραφική μετάβαση, και η έμφαση στην οικονομική ανάπτυξη μετατοπίζεται προς μια ευρύτερη έμφαση στην ανθρώπινη ευημερία. Ωθούμενη από μια έντονη δέσμευση για την επίτευξη των αναπτυξιακών στόχων, η ανισότητα μειώνεται τόσο μεταξύ των χωρών όσο και στο εσωτερικό τους. Παράλληλα η κοινωνία προσανατολίζεται σε χαμηλά επίπεδα κατανάλωσης, έχοντας ως αποτέλεσμα μια κοινωνία χαμηλότερης ενεργειακής έντασης. Ως εκ τούτου το συγκεκριμένο σενάριο αποτελεί το πιο αισιόδοξο σενάριο της IPCC, σύμφωνα με το οποίο δημιουργείται ένας κόσμος όπου οι παγκόσμιες εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα (CO₂) θα μειωθούν στο καθαρό μηδέν έως το 2050. Σε αυτό το πλαίσιο, παρόλο που οι ακραίες καιρικές συνθήκες θα είναι συχνότερες, οι χειρότερες επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής θα αποφευχθούν.

SSP2: Μεσαίες προκλήσεις στην προσπάθεια μετριασμού και προσαρμογής στην κλιματική αλλαγή

Κεφάλαιο 7. Πρόταση ολοκληρωμένου πλαισίου ανάλυσης αβεβαιότητας υπό διαφορετικά κοινωνικοοικονομικά σενάρια για τον προσδιορισμό βέλτιστων χαρτοφυλακίων ενεργειακών τεχνολογιών στην ανατολική Αφρική στο πλαίσιο επίτευξης των Στόχων Βιώσιμης Ανάπτυξης.

Το συγκεκριμένο σενάριο αποτελεί το αμέσως πιο αισιόδοξο σενάριο για την αντιμετώπιση της κλιματικής αλλαγής, προβλέποντας πως οι παγκόσμιες εκπομπές θα μειωθούν σε σημαντικό βαθμό, αλλά με αργότερο ρυθμό συγκριτικά με το σενάριο SSP1, φθάνοντας στο μηδέν μετά το 2050. Σε κοινωνικοοικονομικό επίπεδο, ο κόσμος ακολουθεί ένα μονοπάτι στο οποίο οι κοινωνικές, οικονομικές και τεχνολογικές τάσεις δεν μετακινούνται σημαντικά από τα ιστορικά μοτίβα. Οι ρυθμοί ανάπτυξης και αύξησης του εισοδήματος μεταβάλλονται άνισα μεταξύ των χωρών και των επιμέρους κοινωνικών ομάδων, κάτι που σημαίνει πως ενώ ορισμένες χώρες σημειώνουν σχετικά καλή πρόοδο, άλλες δεν καταφέρνουν να ανταποκριθούν στις προσδοκίες ανάπτυξης. Οι προσπάθειες των παγκόσμιων και εθνικών θεσμικών οργάνων κατευθύνονται προς την επίτευξη των αναπτυξιακών τους στόχων. Παράλληλα ενώ τα περιβαλλοντικά συστήματα συνεχίζουν να υποβαθμίζονται, παρατηρούνται βελτιώσεις στη συνολική ένταση χρήσης των πόρων και η χρήση της ενέργειας μειώνεται. Η παγκόσμια αύξηση του πληθυσμού ακολουθεί ένα μέσο ρυθμό. Συνολικά παρατηρείται ότι οι κοινωνικοοικονομικές μετατοπίσεις προς τη βιωσιμότητα είναι όμοιες με το πρώτο σενάριο (SSP1) και οι διαφορές μεταξύ των σεναρίων έγκεινται σε μια πιο απαισιόδοξη πρόβλεψη σχετικά με τη μέση παγκόσμια θερμοκρασία έως το τέλος του αιώνα.

SSP3: Υψηλές προκλήσεις στην προσπάθεια μετριασμού και προσαρμογής στην κλιματική αλλαγή

Πρόκειται για ένα «ενδιάμεσο/ μέτριο» σενάριο, όπου τα ορυκτά καύσιμα παίζουν σημαντικό ρόλο στην ισχυρή οικονομική ανάπτυξη. Στο συγκεκριμένο σενάριο προδιαγράφεται η πιθανότητα αναζωπύρωσης του εθνικισμού, η οποία δημιουργεί ανησυχίες για την ανταγωνιστικότητα και την ασφάλεια των χωρών. Η πρόβλεψη για περιφερειακές συγκρούσεις ωθεί τις χώρες να επικεντρωθούν όλο και περισσότερο στα εγχώρια ή περιφερειακά ζητήματα. Οι πολιτικές αλλάζουν με την πάροδο του χρόνου ώστε να προσανατολίζονται όλο και περισσότερο προς εθνικά και περιφερειακά θέματα ασφαλείας. Κατά συνέπεια οι

Κεφάλαιο 7. Πρόταση ολοκληρωμένου πλαισίου ανάλυσης αβεβαιότητας υπό διαφορετικά κοινωνικοοικονομικά σενάρια για τον προσδιορισμό βέλτιστων χαρτοφυλακίων ενεργειακών τεχνολογιών στην ανατολική Αφρική στο πλαίσιο επίτευξης των Στόχων Βιώσιμης Ανάπτυξης.

χώρες εστιάζουν στην επίτευξη των στόχων ενέργειας και ασφάλειας των προμηθειών τους εντός των περιφερειών τους σε βάρος μιας καθολικής - παγκόσμιας ανάπτυξης. Οι επενδύσεις στα χαμηλή πηρη εκπαίδευση και την τεχνολογική ανάπτυξη μειώνονται. Η οικονομική ανάπτυξη είναι αργή, τα επίπεδα κατανάλωσης υψηλά, και οι ανισότητες εξακολουθούν να υφίστανται ή και επιδεινώνονται με την πάροδο του χρόνου. Η πληθυσμιακή αύξηση είναι χαμηλή σε βιομηχανικές χώρες και υψηλή στις αναπτυσσόμενες χώρες. Δεδομένου ότι η αντιμετώπιση των περιβαλλοντικών ζητημάτων λαμβάνει χαμηλή προτεραιότητα σε διεθνές επίπεδο, το περιβάλλον αναμένεται να υποβαθμιστεί σημαντικά ειδικά σε ορισμένες περιοχές και οι θερμοκρασίες αναμένεται να αυξηθούν σε σημαντικό βαθμό έως το τέλος του αιώνα.

SSP4: Χαμηλές προκλήσεις στην προσπάθεια μετριασμού και υψηλές προκλήσεις στην προσπάθεια προσαρμογής στην κλιματική αλλαγή

Στο συγκεκριμένο σενάριο παρατηρείται σταθερή αύξηση των εκπομπών και των θερμοκρασιών, με τις εκπομπές CO₂ να διαμορφώνονται σε σχεδόν διπλάσια, συγκριτικά με τα σημερινά, επίπεδα έως το 2100. Η υψηλή ανισότητα στις επενδύσεις στο ανθρώπινο κεφάλαιο, σε συνδυασμό με τις αυξανόμενες ανισότητες στις οικονομικές ευκαιρίες και την πολιτική εξουσία, οδηγούν σε αυξανόμενες ανισότητες τόσο εκτός όσο και εντός των χωρών. Με την πάροδο του χρόνου, διευρύνεται το χάσμα μεταξύ μιας διεθνώς συνδεδεμένης κοινωνίας που συμβάλλει στην ανάπτυξη παραγωγικών κλάδων «έντασης γνώσης» και «έντασης κεφαλαίου», και ενός συνόλου κοινωνιών χαμηλού εισοδήματος, που χαρακτηρίζονται από ανεπαρκή εκπαίδευση και παραγωγικούς τομείς χαμηλής τεχνολογίας και «έντασης εργασίας». Στα πλαίσια αυτής της κοινωνικής πραγματικότητας η κοινωνική συνοχή υποβαθμίζεται και περιστατικά σύγκρουσης και αναταραχής γίνονται ολοένα και συχνότερα. Ο διεθνής ενεργειακός τομέας παρουσιάζει επενδύσεις τόσο στα καύσιμα υψηλής έντασης άνθρακα, όπως ο λιθάνθρακας και το μη συμβατικό πετρέλαιο, αλλά και σε ενεργειακές πηγές χαμηλών εκπομπών άνθρακα. Οι περιβαλλοντικές πολιτικές

Κεφάλαιο 7. Πρόταση ολοκληρωμένου πλαισίου ανάλυσης αβεβαιότητας υπό διαφορετικά κοινωνικοοικονομικά σενάρια για τον προσδιορισμό βέλτιστων χαρτοφυλακίων ενεργειακών τεχνολογιών στην ανατολική Αφρική στο πλαίσιο επίτευξης των Στόχων Βιώσιμης Ανάπτυξης.

εστιάζουν στις τοπικές προκλήσεις που λαμβάνουν χώρα κοντά στις περιοχές μέσης και υψηλής εισοδηματικής ανάπτυξης.

SSP5: Υψηλές προκλήσεις στην προσπάθεια μετριασμού και χαμηλές προκλήσεις στην προσπάθεια προσαρμογής στην κλιματική αλλαγή

Ο κόσμος που σχηματίζεται στο συγκεκριμένο σενάριο θέτει στο επίκεντρο τις ανταγωνιστικές αγορές, την καινοτομία και τις συμμετοχικές κοινωνίες προκειμένου να επιτευχθεί η ταχεία τεχνολογική πρόοδος και η ανάπτυξη του ανθρώπινου κεφαλαίου ως μέρος της πορείας προς τη βιώσιμη ανάπτυξη. Οι παγκόσμιες αγορές ενοποιούνται σε όλο και μεγαλύτερο βαθμό. Παρατηρούνται επίσης σημαντικές επενδύσεις στην υγεία, την εκπαίδευση και τους θεσμούς με σκοπό την ενίσχυση του ανθρώπινου και κοινωνικού κεφαλαίου. Ταυτόχρονα, η πορεία προς την οικονομική και κοινωνική ανάπτυξη συνδυάζεται με την αυξημένη εκμετάλλευση ορυκτών πόρων και την υιοθέτηση ενός τρόπου ζωής αυξημένης ενεργειακής έντασης σε όλο τον κόσμο. Όλοι αυτοί οι παράγοντες οδηγούν σε ραγδαία ανάπτυξη της παγκόσμιας οικονομίας, ενώ ο παγκόσμιος πληθυσμός αυξάνεται ραγδαία και αρχίζει να μειώνεται στον 21ο αιώνα. Τα τοπικά περιβαλλοντικά προβλήματα, όπως η ατμοσφαιρική ρύπανση, αντιμετωπίζονται επιτυχώς, ενώ παράλληλα διαφαίνεται η ικανότητα για αποτελεσματική διαχείριση των κοινωνικών και οικολογικών συστημάτων, συμπεριλαμβανομένης της γεω-μηχανικής, εάν κριθεί απαραίτητο.

Όπως προαναφέρθηκε, τα παραπάνω «κοινωνικοοικονομικά μονοπάτια» περιγράφουν εναλλακτικές πορείες για τη μελλοντική κοινωνία. Παρουσιάζουν βασικά σενάρια για το τί θα συμβεί σε περίπτωση απουσίας πολιτικής για το κλίμα, και επιτρέπουν στους ερευνητές να εξετάσουν τα εμπόδια και τις ευκαιρίες για την προστασία του κλίματος και την προσαρμογή σε κάθε πιθανό μελλοντικό κόσμο, όταν συνδυάζεται με τους στόχους μετριασμού. Είναι κατανοητό πως οι κύριες διαφορές μεταξύ των SSPs προέρχονται από τις υποθέσεις τους για την παγκόσμια αύξηση του πληθυσμού, την πρόσβαση στην εκπαίδευση, την αστικοποίηση, την οικονομική ανάπτυξη, τη διαθεσιμότητα των πόρων, τις

Κεφάλαιο 7. Πρόταση ολοκληρωμένου πλαισίου ανάλυσης αβεβαιότητας υπό διαφορετικά κοινωνικοοικονομικά σενάρια για τον προσδιορισμό βέλτιστων χαρτοφυλακίων ενεργειακών τεχνολογιών στην ανατολική Αφρική στο πλαίσιο επίτευξης των Στόχων Βιώσιμης Ανάπτυξης.

τεχνολογικές εξελίξεις και τις αλλαγές στον τρόπο ζωής. Τα σενάρια SSP1 και SSP5 οραματίζονται σχετικά αισιόδοξες τάσεις για την ανθρώπινη ανάπτυξη, με σημαντικές επενδύσεις στην εκπαίδευση και την υγεία, την ταχεία οικονομική ανάπτυξη, και την εύρυθμη λειτουργία των θεσμών. Διαφέρουν στο ότι το σενάριο SSP5 υποθέτει ότι η πρόοδος συνεπάγεται την αυξημένη ενεργειακή ένταση και μια οικονομία βασισμένη στα ορυκτά καύσιμα, ενώ στο σενάριο SSP1 παρατηρείται μια εμφανής μετατόπιση προς τις βιώσιμες πρακτικές. Τα σενάρια SSP3 και SSP4 είναι πιο απαισιόδοξα όσον αφορά τους τομείς της μελλοντικής οικονομικής και κοινωνικής ανάπτυξης, υποθέτοντας μειωμένες επενδύσεις στην εκπαίδευση ή την υγεία στις φτωχότερες χώρες, σε συνδυασμό με την παραδοχή για έναν ταχέως αναπτυσσόμενο πληθυσμό και αυξανόμενες ανισότητες. Το SSP2 αντιπροσωπεύει ένα μέσο σενάριο όπου τα ιστορικά μοτίβα της ανάπτυξης συνεχίζονται σε όλο τον 21ο αιώνα.

Για τη δημιουργία διαφορετικών παγκόσμιων σεναρίων πληθυσμού, οι ερευνητές χρησιμοποίησαν ένα δημογραφικό μοντέλο που βασίζεται σε υποθέσεις μελλοντικής γονιμότητας, θνησιμότητας, μετανάστευσης και εκπαίδευσης. Οι υποθέσεις για μελλοντική πρόσβαση των γυναικών στην εκπαίδευση επηρεάζουν έντονα τη γονιμότητα και την αύξηση του πληθυσμού. Αυτές οι παραδοχές ποικίλλουν για να είναι συνεπείς με κάθε σενάριο SSP. Όπως φαίνεται από την περιγραφή των σεναρίων, τα επίπεδα πληθυσμών είναι χαμηλότερα στα σενάρια SSP1 και SSP5, αυξάνονται σε οχτώμιση δισεκατομμύρια (8.5 δις) μεταξύ 2050 και 2060, και μειώνονται στο σημερινό επίπεδο των περίπου εφτά δισεκατομμυρίων (7 δις) ως το 2100. Οι παραπάνω παραδοχές είναι σε γενικές γραμμές συνεπείς με το χαμηλό σενάριο γονιμότητας του Οργανισμού Ηνωμένων Εθνών (ΟΗΕ). Τα σενάρια SSP2 και SSP4 δείχνουν μια μέση πραγματικότητα, με πληθυσμό που κορυφώνεται μεταξύ 2070 και 2080 στα περίπου εννιάμιση δισεκατομμύρια (9.5 δις), παρόλο που το συγκεκριμένο νούμερο είναι ακόμα χαμηλότερο από το μέσο σενάριο γονιμότητας του ΟΗΕ το οποίο δίνει εκτίμηση για περίπου εντεκάμιση δισεκατομμύρια (11.5 δις). Τέλος, το σενάριο SSP3 δείχνει συνεχιζόμενη παγκόσμια αύξηση του πληθυσμού μέχρι το τέλος του

Κεφάλαιο 7. Πρόταση ολοκληρωμένου πλαισίου ανάλυσης αβεβαιότητας υπό διαφορετικά κοινωνικοοικονομικά σενάρια για τον προσδιορισμό βέλτιστων χαρτοφυλακίων ενεργειακών τεχνολογιών στην ανατολική Αφρική στο πλαίσιο επίτευξης των Στόχων Βιώσιμης Ανάπτυξης.

αιώνα, φθάνοντας τα δωδεκάμιση δισεκατομμύρια (12.5 δις) έως το 2100. Το SSP3 είναι υψηλότερο από το μέσο σενάριο γονιμότητας του ΟΗΕ, αλλά παραμένει χαμηλότερο από το υψηλό σενάριο γονιμότητας του ΟΗΕ. Οι προβολές πληθυσμών στα SSPs είναι γενικά λίγο χαμηλότερες συγκριτικά με προηγούμενες προσπάθειες μοντελοποίησης, λόγω της πτώσης των ποσοστών γονιμότητας στις αναπτυσσόμενες χώρες κατά τη διάρκεια των τελευταίων δύο δεκαετιών και της γρηγορότερης από της αναμενόμενης επέκτασης της εκπαίδευσης μεταξύ των νέων γυναικών στις λιγότερο αναπτυγμένες χώρες (Samir and Lutz, 2017).

Όλα τα SSPs παρουσιάζουν δραματική ανάπτυξη στην παγκόσμια οικονομία, με το παγκόσμιο ΑΕΠ το 2100 να είναι μεταξύ τεσσάρων και δέκα φορές μεγαλύτερο από ό,τι ήταν το 2010. Αυτό μεταφράζεται σε ένα μέσο ετήσιο παγκόσμιο ποσοστό αύξησης ΑΕΠ μεταξύ 1,8% και 3,4%, αν και σε όλα τα σενάρια το ποσοστό αύξησης επιβραδύνει κατά τη διάρκεια του αιώνα. Αυτή η ανάπτυξη είναι ένας από τους κύριους οδηγούς των μελλοντικών εκπομπών CO₂, αν και διαφορετικά σενάρια προβλέπουν διαφορετικά επίπεδα μελλοντικής αποσύνδεσης της ανάπτυξης και των εκπομπών που συνδέονται με την απανθρακοποίηση της οικονομίας. Οι αριθμοί του ΑΕΠ ενσωματώνουν τις προβλέψεις του πληθυσμού για κάθε SSP, καθώς και τις υποθέσεις των διεθνών εμπορικών ροών, την τεχνολογική ανάπτυξη και άλλους παράγοντες που συνάδουν με τις αφηγήσεις των SSPs. Η υψηλότερη αύξηση του ΑΕΠ παρατηρείται στο SSP5, όπου περιγράφεται ταχεία ανάπτυξη και σύγκλιση μεταξύ των χωρών και το παγκόσμιο μέσο κατά κεφαλήν ΑΕΠ περίπου στις εκατό σαράντα χιλιάδες δολάρια (\$140.000) ετησίως στο έτος 2100. Η χαμηλότερη αύξηση του ΑΕΠ εμφανίζεται στο SSP3, όπου η ανάπτυξη είναι αργή και κατακερματισμένη. Στο SSP3 το παγκόσμιο μέσο εισόδημα είναι περίπου είκοσι χιλιάδες δολάρια (\$20.000) το 2100, ελάχιστα μόνο πάνω από τα σημερινά επίπεδα (Dellink *et al.*, 2017; Fricko *et al.*, 2017).

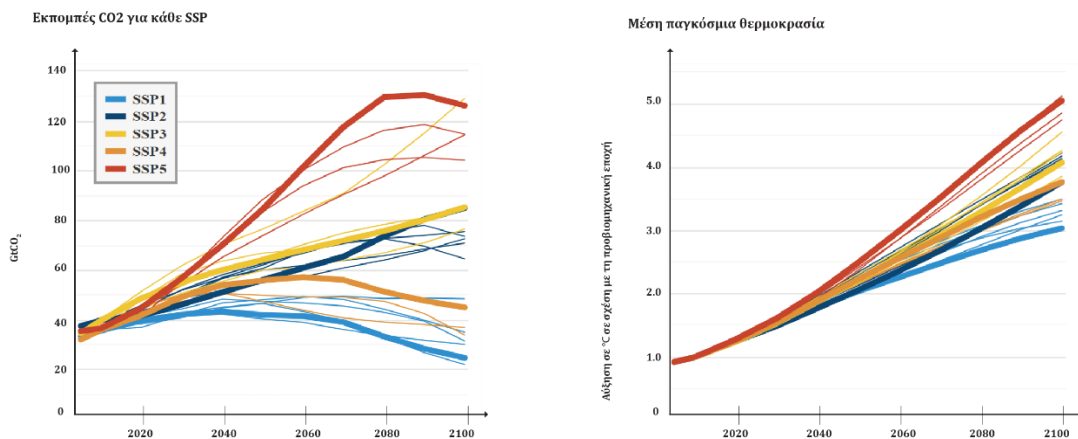
Τα SSPs επίσης διαφέρουν σημαντικά στο επίπεδο των μελλοντικών ανισοτήτων εντός και μεταξύ των χωρών. Στο σενάριο SSP4 περιγράφονται τα υψηλότερα

Κεφάλαιο 7. Πρόταση ολοκληρωμένου πλαισίου ανάλυσης αβεβαιότητας υπό διαφορετικά κοινωνικοοικονομικά σενάρια για τον προσδιορισμό βέλτιστων χαρτοφυλακίων ενεργειακών τεχνολογιών στην ανατολική Αφρική στο πλαίσιο επίτευξης των Στόχων Βιώσιμης Ανάπτυξης.

επίπεδα ανισότητας, και ακολουθεί το σενάριο SSP3. Τόσο το σενάριο SSP1 όσο και το SSP5 περιγράφουν μια σχετικά δίκαιη ανάπτυξη χωρίς μεγάλες ανισότητες.

Τέλος, τα SSPs παρέχουν εκτιμήσεις για το πώς θα εξελιχθεί ο κόσμος στο κομμάτι της αστικοποίησης μέχρι το 2100. Τα ποσοστά σε αυτό το κομμάτι κυμαίνονται από εξήντα τα εκατό (60%) στο SSP3, ποσοστό παρόμοιο με το σημερινό πενήντα τέσσερα τα εκατό (54%), και φτάνουν μέχρι ενενήντα δύο τα εκατό (92%) στα σενάρια SSP1, SSP4, και SSP5. Το SSP2 τοποθετείται στη μέση των δύο ακραίων τιμών, φθάνοντας σε 80%.

Τέλος, προκειμένου να μεταφραστούν οι κοινωνικοοικονομικές συνθήκες των SSPs σε εκτιμήσεις για την μελλοντική χρήση της ενέργειας και τα μελλοντικά επίπεδα εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου χρησιμοποιήθηκαν έξι διαφορετικά ΜΟΑ.



Σχήμα 7-5: Οι εκπομπές CO2 σε γιγατόνους (GtCO2) (αριστερά) και η παγκόσμια μέση μεταβολή της θερμοκρασίας σε σχέση με τα προ-βιομηχανικά επίπεδα σε βαθμούς °C (δεξιά) για όλα τα ΜΟΑ και SSPs για το βασικό (baseline) σενάριο χωρίς πολιτική κλίματος.

Από τα διαγράμματα φαίνεται ότι οι προβλέψεις για την εξέλιξη των παγκόσμιων εκπομπών CO₂ καθώς και της μέσης θερμοκρασίας ποικίλλουν σημαντικά μεταξύ των διαφόρων σεναρίων SSP, γεγονός που επηρεάζεται αισθητά από τις βασικές κοινωνικοοικονομικές παραδοχές του κάθε σεναρίου. Στο σενάριο SPSP1 το

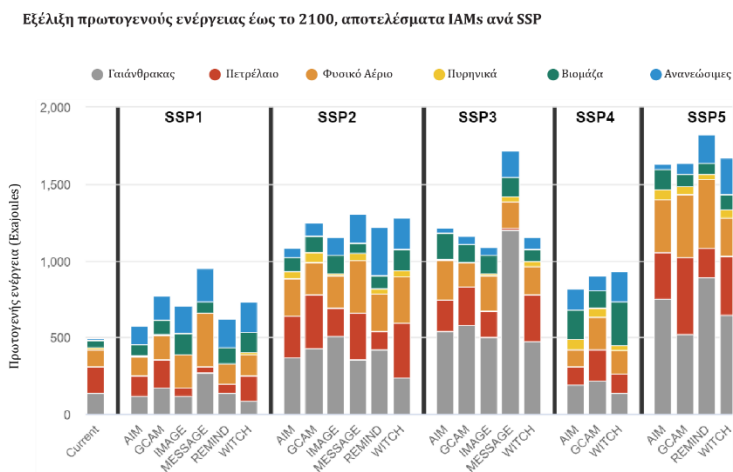
Κεφάλαιο 7. Πρόταση ολοκληρωμένου πλαισίου ανάλυσης αβεβαιότητας υπό διαφορετικά κοινωνικοοικονομικά σενάρια για τον προσδιορισμό βέλτιστων χαρτοφυλακίων ενεργειακών τεχνολογιών στην ανατολική Αφρική στο πλαίσιο επίτευξης των Στόχων Βιώσιμης Ανάπτυξης.

οποίο εστιάζει στην αειφορία, οι εκπομπές CO₂ κορυφώνονται μεταξύ του 2040 και 2060, ακόμη και ελλείψει συγκεκριμένων πολιτικών για το κλίμα, και μειώνονται σε περίπου εικοσιδύο (22) έως σαρανταοχτώ (48) GtCO₂ ανά έτος έως το 2100. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της θερμοκρασίας κατά τρεις έως τρεισήμισι βαθμούς (3-3.5 °C) μέχρι το 2100. Στο σενάριο SSP2, οι εκπομπές συνεχίζουν να αυξάνονται μέχρι το τέλος του αιώνα, φθάνοντας μεταξύ 65 GtCO₂ και 85 GtCO₂, με αποτέλεσμα την αύξηση της θερμοκρασίας κατά 3.8-4.2 °C. Για το σενάριο SSP3, τα διαφορετικά MOA δίνουν ένα ευρύ φάσμα εκτίμησης για τα μελλοντικά επίπεδα εκπομπών, με τα περισσότερα τρεξίματα να δείχνουν αυξήσεις περίπου 76-86 GtCO₂ έως το 2100. Η αύξηση της θερμοκρασίας το 2100 στο SSP3 εκτιμάται σε 3.9-4.6 °C. Στο σενάριο SSP4, η ταχεία τεχνολογική πρόοδος αναφορικά με πηγές ενέργειας χαμηλών εκπομπών άνθρακα οδηγεί σε σχετικά χαμηλές εκπομπές οι οποίες κυμαίνονται από 34-45 GtCO₂ έως το 2100, με αύξηση της θερμοκρασίας κατά 3.5-3.8 °C. Τέλος, το υψηλής ανάπτυξης και έντασης ενέργειας σενάριο SSP5 δίνει τις υψηλότερες εκτιμήσεις για την διαμόρφωση των εκπομπών, που κυμαίνονται από 104-126 GtCO₂ έως το 2100, με αποτέλεσμα την αύξηση της θερμοκρασίας κατά 4.7-5.1 °C (Riahi *et al.*, 2017).

Επιπλέον, τα βασικά (baseline) SSP σενάρια, παρόλο που στο σύνολό τους αντιπροσωπεύουν μελλοντικούς κόσμους χωρίς νέες πολιτικές για την αντιμετώπιση της κλιματικής αλλαγής, διαφέρουν σημαντικά στον τρόπο με τον οποίο εκτιμούν το μείγμα συμμετοχής των διαφορετικών τεχνολογιών στην παγκόσμια χρήση ενέργειας (Σχήμα 7-6). Ορισμένα σενάρια, όπως το SSP3, προβλέπουν μικρή ανάπτυξη των εναλλακτικών τεχνολογιών χαμηλών εκπομπών άνθρακα, ή τεχνολογιών που μπορούν να αντιμετωπίσουν με οικονομικό τρόπο τις αρνητικές επιπτώσεις των ορυκτών καυσίμων, όπως η ατμοσφαιρική ρύπανση στο SSP5. Στους μελλοντικούς κόσμους αυτών των σεναρίων, ο άνθρακας εξακολουθεί να αποτελεί μία από τις κύριες πηγές ενέργειας μέχρι το τέλος του αιώνα, οδηγώντας σε υψηλές εκπομπές CO₂ και την αύξηση της θερμοκρασίας. Επισημαίνεται σε αυτό το σημείο όμως ότι τα υψηλά σενάρια χρήσης άνθρακα, όπως αυτά που υπάρχουν στο SSP5, έχουν επικριθεί

Κεφάλαιο 7. Πρόταση ολοκληρωμένου πλαισίου ανάλυσης αβεβαιότητας υπό διαφορετικά κοινωνικοοικονομικά σενάρια για τον προσδιορισμό βέλτιστων χαρτοφυλακίων ενεργειακών τεχνολογιών στην ανατολική Αφρική στο πλαίσιο επίτευξης των Στόχων Βιώσιμης Ανάπτυξης.

στο παρελθόν ως δυνητικά μη ρεαλιστικά. Σε άλλα σενάρια, όπως το SSP1 και SSP4, ένα πολύ μεγαλύτερο μερίδιο της ενέργειας προέρχεται από ανανεώσιμες πηγές, με την χρήση των ορυκτών καυσίμων να περιορίζεται σε τομείς όπως η μεταφορά ή η θέρμανση, και να προτιμάται κυρίως λόγω του μειωμένου κόστους. Ωστόσο, παρά την εστίαση των σεναρίων SSP1 και SSP4 στην αειφόρο ανάπτυξη, η χρήση ορυκτών καυσίμων παραμένει κοντά στα σημερινά επίπεδα για το 2100, αντικατοπτρίζοντας την πρόκληση της μετάβασης χωρίς ορυκτά καύσιμα, ελλείψει πολιτικής για το κλίμα. Σχετικά με τη χρήση της παραδοσιακής βιομάζας, όπως το ξύλο ή η κοπριά των ζώων, αυτή είναι αυξημένη στα νοικοκυριά των αναπτυσσομένων χωρών των σεναρίων SSP3 και SSP4, ενώ η χρήση του άνθρακα και της βιομάζας στα νοικοκυριά μειώνεται σημαντικά στα άλλα τρία σενάρια.



Σχήμα 7-6: Παγκόσμια χρήση πρωτογενούς ενέργειας για κάθε τύπο καυσίμου στο 2100 σε exajoules (EJ) για τα baseline σενάρια σε κάθε MOA και SSP.

Το σχήμα επίσης δείχνει ότι σημαντικές διαφορές μεταξύ των βασικών (baseline) SSPs σεναρίων παρατηρούνται και στα επίπεδα μελλοντικής ζήτησης ενέργειας. Οι υψηλότερες τιμές αντιστοιχούν στο σενάριο SSP5, στο οποίο η ζήτηση ενέργειας είναι τρεις φορές υψηλότερη από τα σημερινά επίπεδα. Στα σενάρια SSP2 και SSP3 παρατηρείται ζήτηση διπλάσια συγκριτικά με τις τρέχουσες τιμές, ενώ στο SSP1 η ζήτηση ενέργειας παραμένει μόνο 50% πάνω από τα σημερινά επίπεδα, παρά την ταχεία οικονομική ανάπτυξη.

7.2.2 Ανάλυση Χαρτοφυλακίου με τη Μέθοδο AUGMECON 2

Η ανάλυση χαρτοφυλακίου λαμβάνει ως είσοδο τα αποτελέσματα του μοντέλου GCAM. Τα δεδομένα αφορούν δύο αρχικά σενάρια πολιτικής γης. Στο πρώτο, βασικό σενάριο, απουσιάζουν επιλογές για αύξηση της βιώσιμης δασικής παραγωγής. Το σενάριο αυτό αναφέρεται και ως baseline, no land policy, σενάριο. Το δεύτερο σενάριο αναφέρεται και ως land policy σενάριο και περιλαμβάνει εκπαιδευτικές πολιτικές προς τους ιδιοκτήτες δασικών και γεωργικών εκτάσεων, οι οποίες θεωρούνται ως πλήρως αποτελεσματικές από το 2030³. Οι συγκεκριμένες πολιτικές εστιάζουν στη διδασκαλία πρακτικών αύξησης τη βιώσιμης παραγωγής βιομάζας εφαρμόζοντας εκ περιτροπής δασοκομικές και αγροδασοκομικές πρακτικές. Τα δύο αυτά διαφορετικά σενάρια χρησιμοποιούνται στη συνέχεια για την ανάλυση ντετερμινιστικής αβεβαιότητας. Για κάθε αρχικό σενάριο από το μοντέλο GCAM εφαρμόζονται τρία διαφορετικά σενάρια SSP. Από το σύνολο των πέντε σεναρίων SSP που περιεγράφηκαν παραπάνω επιλέγονται προς ανάλυση τρία. Αυτά είναι: 1) το σενάριο SSP2 το οποίο είναι ένα μέσο σενάριο, βασισμένο σε ιστορικά πρότυπα 2) το σενάριο SSP3 το οποίο περιγράφει ένα δύσκολο μέλλον, με μεγάλη αύξηση του πληθυσμού, χαμηλό κατά κεφαλήν ΑΕΠ, μεγάλο ποσοστό αστικοποίησης, υψηλές αποδόσεις καλλιεργειών, τεχνολογική πρόοδο και ελεγχόμενη ρύπανση 3) το σενάριο SSP5, το οποίο περιγράφει έναν κόσμο που βασίζεται στα ορυκτά καύσιμα, με χαμηλό πληθυσμό, υψηλό κατά κεφαλήν ΑΕΠ, υψηλή αστικοποίηση, και υψηλές αποδόσεις καλλιεργειών, τεχνολογική πρόοδο και ελεγχόμενη ρύπανση. Τα συγκεκριμένα σενάρια επιλέχθηκαν προκειμένου να καλυφθεί το κατά το δυνατόν μεγαλύτερο εύρος πιθανών μελλοντικών εκβάσεων, με το σενάριο SSP3 να θεωρείται ως κατώτερο άκρο και το SSP5 ως υψηλότερο άκρο για την οικονομική ανάπτυξη.

³ Σε αυτό το σημείο θεωρείται πως έως το 2030 οι επιλογές των ιδιοκτητών γης παρακινούνται από τη μεγιστοποίηση του κέρδους και είναι ανεξάρτητες από την εφαρμογή η μη εφαρμογή των μεθόδων αύξησης της βιωσιμότητας. Η πλήρης εφαρμογή των συγκεκριμένων προγραμμάτων επιτυγχάνεται σε βάθος χρόνου και στην προκειμένη περίπτωση θεωρείται ότι θα είναι αποτελεσματική κατά 33% έως το 2020 και κατά 66% έως το 2025.

Κεφάλαιο 7. Πρόταση ολοκληρωμένου πλαισίου ανάλυσης αβεβαιότητας υπό διαφορετικά κοινωνικοοικονομικά σενάρια για τον προσδιορισμό βέλτιστων χαρτοφυλακίων ενεργειακών τεχνολογιών στην ανατολική Αφρική στο πλαίσιο επίτευξης των Στόχων Βιώσιμης Ανάπτυξης.

Για κάθε ένα από τα παραπάνω σενάρια δίνονται είκοσι διακριτές επιλογές επιδότησης για κάθε μια από έξι διαφορετικές τεχνολογίες παραγωγής ενέργειας, όπου το κόστος τεχνολογίας επιδοτείται σε βήματα 5% έως 100%. Για όλες τις τεχνολογίες, οι επιδοτήσεις καλύπτουν όλο το κόστος κεφαλαίου. Οι τεχνολογίες που επιλέχθηκαν είναι τεχνολογίες χωρίς απαιτήσεις σε μεγάλες αλυσίδες εφοδιασμού ή υποδομές δικτύου, οι οποίες μπορούν με ευκολία να υλοποιηθούν στη συγκεκριμένη μελέτη περίπτωσης στην Ανατολική Αφρική. Οι έξι τεχνολογίες είναι 1) το υγραέριο (υγροποιημένο αέριο πετρελαίων), στο εξής αναφέρεται και ως LPG 2) τα φωτοβολταϊκά (PV) 3) οι καυστήρες βιαερίου (biogas) 4) εστίες και σόμπες αιθανόλης (ethanol) 5) σόμπες και κλίβανοι με γαιάνθρακα με βελτιωμένο σχεδιασμό (charcoal) 6) Βελτιωμένες σόμπες καυσόξυλων/ ξυλώδους βιομάζας (fuelwood).

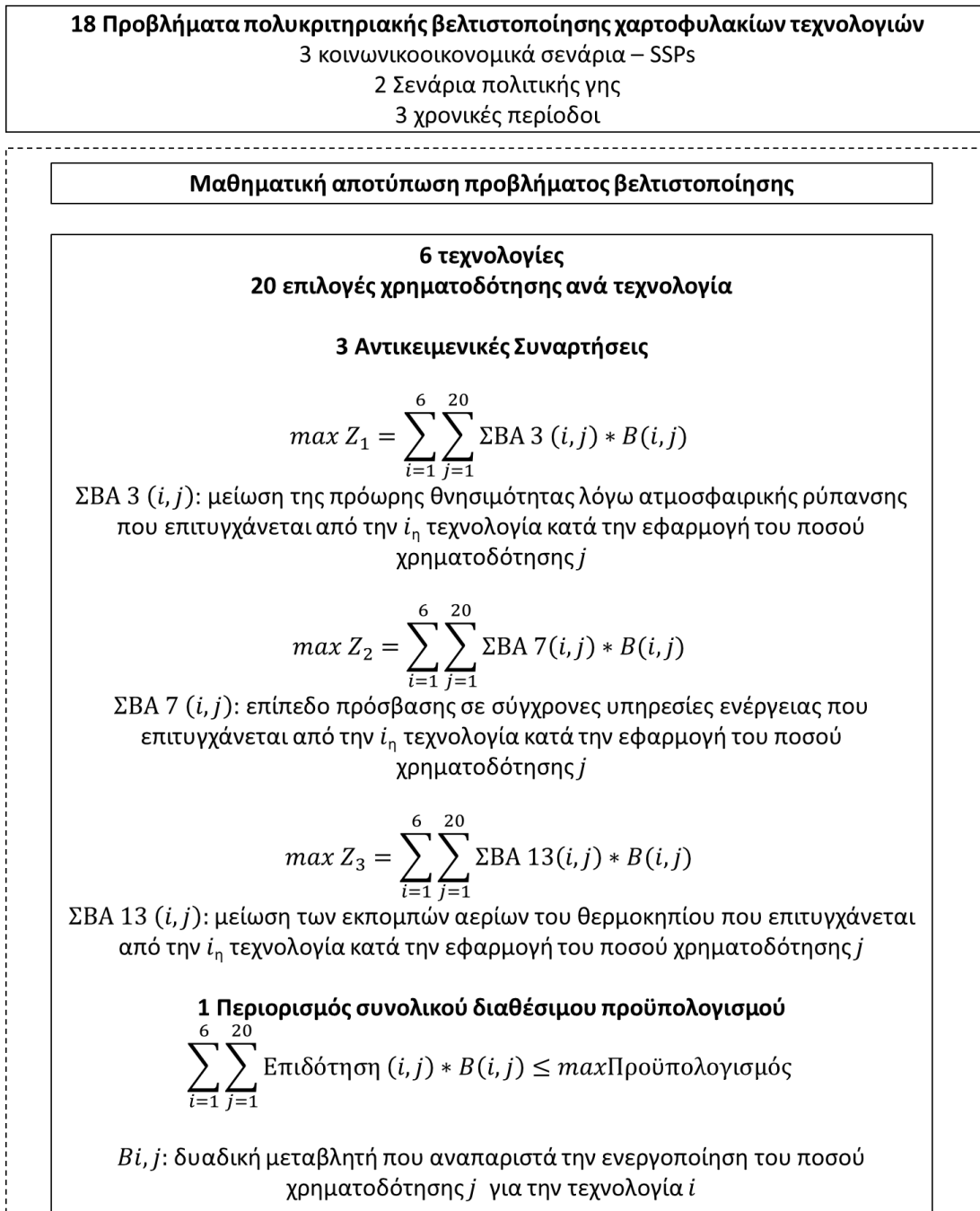
Ως επόμενο βήμα, το κάθε πρόβλημα πολυκριτηριακής ανάλυσης χαρτοφυλακίου εφαρμόζεται για τρεις διαφορετικές χρονικές περιόδους και συγκεκριμένα για το 2020, το 2030 και το 2040, δίνοντας επιπλέον ενδείξεις για την ευρωστία των αποτελεσμάτων. Επιπλέον, το κάθε πρόβλημα βελτιστοποίησης επιλύεται για δύο διαφορετικά επίπεδα ετήσιου διαθέσιμου προϋπολογισμού, ως περιορισμούς επιδότησης, ένα χαμηλό και ένα υψηλό. Το χαμηλό επίπεδο ξεκινά από 3,5 δισεκατομμύρια δολάρια το 2020 και θεωρώντας αύξηση κατά 5% ετησίως, διαμορφώνεται στα 5,7 δισεκατομμύρια δολάρια έως το 2030 και 9,3 δισεκατομμύρια δολάρια έως το 2040. Στο υψηλό επίπεδο το σύνολο του διαθέσιμου προϋπολογισμού για το 2020 λαμβάνεται ως 10,5 δισεκατομμύρια δολάρια για το 2020 και θεωρώντας, παρόμοια με το χαμηλό επίπεδο, αύξηση κατά 5% ετησίως, το ποσό φτάνει τα 17,4 δισεκατομμύρια δολάρια έως το 2030 και τα 27,9 δισεκατομμύρια δολάρια έως το 2040.

Ο προσδιορισμός των βέλτιστων χαρτοφυλακίων τεχνολογιών για κάθε πρόβλημα βελτιστοποίησης γίνεται με κριτήριο τη συνεισφορά κάθε τεχνολογίας σε τρεις διαστάσεις που σχετίζονται με τρεις ΣΒΑ, τον ΣΒΑ 3 «Καλή υγεία και ευημερία», τον ΣΒΑ 7 «Φτηνή και καθαρή ενέργεια» και τον ΣΒΑ 13 «Δράση για

Κεφάλαιο 7. Πρόταση ολοκληρωμένου πλαισίου ανάλυσης αβεβαιότητας υπό διαφορετικά κοινωνικοοικονομικά σενάρια για τον προσδιορισμό βέλτιστων χαρτοφυλακίων ενεργειακών τεχνολογιών στην ανατολική Αφρική στο πλαίσιο επίτευξης των Στόχων Βιώσιμης Ανάπτυξης.

το κλίμα». Προκειμένου να μεταφραστούν οι τρεις αυτοί στόχοι σε μετρήσιμα μεγέθη για χρήση στα χρησιμοποιούμενα μοντέλα γίνεται η παρακάτω αντιστοίχιση. Για τη συνεισφορά στον ΣΒΑ 3 μετράται η μείωση της πρόωρης θνησιμότητας λόγω της ατμοσφαιρικής ρύπανσης σε εσωτερικούς και εξωτερικούς χώρους, που προκαλείται κυρίως από τον καπνό των εστιών μαγειρέματος. Αναγνωρίζοντας πως η ατμοσφαιρική ρύπανση μπορεί να προκαλέσει και άλλες, μη θανατηφόρες, αρνητικές επιπτώσεις στην υγεία, εδώ επιλέγεται να χρησιμοποιηθεί η θνησιμότητα ως δείκτης για τη συνολική έκθεση στην ατμοσφαιρική ρύπανση στην περιοχή. Για την αξιολόγηση της πρόσβασης σε φθηνή και καθαρή ενέργεια χρησιμοποιήθηκε μια μεθοδολογία με βαθμίδες “tier level” (World Bank, 2015). Μια βαθμίδα αντιπροσωπεύει ένα ποιοτικό μέγεθος που αντικατοπτρίζει το επίπεδο πρόσβασης σε ενεργειακές υπηρεσίες για ένα νοικοκυριό, και κυμαίνεται μεταξύ 1 (χωρίς πρόσβαση σε υπηρεσίες ενέργειας ή πρόσβαση σε χαμηλής ποιότητας ενεργειακές υπηρεσίες) και 5 (υψηλή πρόσβαση και ποιότητα ενεργειακών υπηρεσιών). Τελικά χρησιμοποιείται ο μέσος όρος όλων των νοικοκυριών. Αυτή η μεθοδολογία ακολουθείται ξεχωριστά για την πρόσβαση σε ηλεκτρική ενέργεια και ξεχωριστά για την αξιολόγηση των εστιών μαγειρέματος και τα δύο μεγέθη λαμβάνονται με ίσο βάρος για την συνολική αποτίμηση της προόδου για τον ΣΒΑ 7. Για να αποτιμηθεί η πρόοδος στη δράση για το κλίμα (ΣΒΑ 13), υπολογίζεται το άμεσο και έμμεσο δυναμικό υπερθέρμανσης του πλανήτη (GWP; IPCC, 2007) για όλο τον κατάλογο των εκπομπών στην ανατολική Αφρική.

Κεφάλαιο 7. Πρόταση ολοκληρωμένου πλαισίου ανάλυσης αβεβαιότητας υπό διαφορετικά κοινωνικοοικονομικά σενάρια για τον προσδιορισμό βέλτιστων χαρτοφυλακίων ενεργειακών τεχνολογιών στην ανατολική Αφρική στο πλαίσιο επίτευξης των Στόχων Βιώσιμης Ανάπτυξης.



Σχήμα 7-7: Μαθηματική αποτύπωση του προβλήματος βελτιστοποίησης

7.2.3 Προτεινόμενο πλαίσιο ανάλυσης αβεβαιότητας

Η προτεινόμενη προσέγγιση εξετάζει την επιβολή τόσο ντετερμινιστικής όσο και στοχαστικής (μη-ντετερμινιστικής) αβεβαιότητας προκειμένου να αξιολογηθεί αποτελεσματικά η ευρωστία των βέλτιστων χαρτοφυλακίων. Η ντετερμινιστική

Κεφάλαιο 7. Πρόταση ολοκληρωμένου πλαισίου ανάλυσης αβεβαιότητας υπό διαφορετικά κοινωνικοοικονομικά σενάρια για τον προσδιορισμό βέλτιστων χαρτοφυλακίων ενεργειακών τεχνολογιών στην ανατολική Αφρική στο πλαίσιο επίτευξης των Στόχων Βιώσιμης Ανάπτυξης.

αβεβαιότητα εκφράζεται εξετάζοντας διαφορετικά σενάρια όσον αφορά την επίδοση της κάθε τεχνολογίας σε καθένα από τα τρία χρονικά πλαίσια, και υπό τα σενάρια επιβολής και μη πολιτικών γης. Επιπλέον το επίπεδο ευρωστίας κάθε χαρτοφυλακίου αξιολογείται με βάση τον βαθμό στον οποίο τα αποτελέσματα εξαρτώνται από τις κοινωνικοοικονομικές μεταβλητές, οι οποίες συνοψίζονται στα διάφορα SSPs. Όσον αφορά τη στοχαστική αβεβαιότητα, η οποία είναι εγγενής σε αυτές τις παραμέτρους, αυτή ενσωματώνεται στο μοντέλο εκτελώντας προσομοίωση Monte Carlo. Οι αβέβαιες παράμετροι του μοντέλου, δηλαδή η απόδοση των τεχνολογιών όσον αφορά τη μεγιστοποίηση της μείωσης εκπομπών, την πρόσβαση σε καθαρή ενέργεια και τα οφέλη για την υγεία, αντιμετωπίζονται ως στοχαστικής φύσης και η δειγματοληψία των τιμών τους γίνεται χρησιμοποιώντας ομοιόμορφη κατανομή. Αρχικά, το μοντέλο τρέχει χρησιμοποιώντας ντετερμινιστικές τιμές για όλες τις αβέβαιες παραμέτρους και προσδιορίζεται το μέτωπο Pareto "χωρίς αβεβαιότητα". Στη συνέχεια, η προσομοίωση Monte Carlo εκτελείται επαναληπτικά για τη δειγματοληψία τυχαίων τιμών για τις αβέβαιες παραμέτρους από τις ομοιόμορφες κατανομές και το μοντέλο επιλύεται για να δημιουργήσει το σύνολο των βέλτιστων χαρτοφυλακίων Pareto. Τελικά, η εκτέλεση πολλαπλών επαναλήψεων Monte Carlo έχει ως αποτέλεσμα πολλά διαφοροποιημένα μέτωπα Pareto, τα οποία αναλύονται για να εξαχθούν συμπεράσματα σχετικά με την ευρωστία των χαρτοφυλακίων που διαμορφώνουν το μέτωπο Pareto όταν δεν λαμβάνεται υπόψη η αβεβαιότητα. Για τους σκοπούς της ανάλυσης εκτελούνται χίλιες επαναλήψεις Monte Carlo.

Όπως συζητήθηκε παραπάνω, το μοντέλο GCAM δίνει αποτελέσματα για τα τρία σενάρια SSP ξεχωριστά για κάθε επίπεδο επιδότησης. Τα SSPs θεωρούνται εδώ ως ένα αβέβαιο σύνολο συνθηκών που επηρεάζουν την απόδοση της εκάστοτε επιδότησης στις τεχνολογίες. Για τα τρία κύρια προβλήματα βελτιστοποίησης που εκτελούνται για τον προσδιορισμό των βέλτιστων χαρτοφυλακίων ξεχωριστά για καθένα από τα τρία εξεταζόμενα SSP, η μέση τιμή των

Κεφάλαιο 7. Πρόταση ολοκληρωμένου πλαισίου ανάλυσης αβεβαιότητας υπό διαφορετικά κοινωνικοοικονομικά σενάρια για τον προσδιορισμό βέλτιστων χαρτοφυλακίων ενεργειακών τεχνολογιών στην ανατολική Αφρική στο πλαίσιο επίτευξης των Στόχων Βιώσιμης Ανάπτυξης.

ομοιόμορφων κατανομών ορίζεται ίση με τις εκτιμώμενες τιμές που λαμβάνονται από τις εκτελέσεις του μοντέλου GCAM και η απόκλιση ορίζεται ίση με $\pm 5\%$.

Προκειμένου να επιτευχθεί η ανάλυση ευρωστίας μεταξύ των αποτελεσμάτων των διαφορετικών SSPs, εισάγεται το σενάριο «SSP ευρωστίας». Το σενάριο «SSP ευρωστίας» δεν εκτελείται στο μοντέλο GCAM ως νέο σενάριο και η πρόθεση της παρούσας ανάλυσης δεν είναι η εισαγωγή του ως νέο σενάριο για «αντικατάσταση» ή προσομοίωση οποιουδήποτε από τα SSPs. Όπως αναφέρθηκε ήδη, το GCAM εκτελείται ξεχωριστά για κάθε SSP και παράγει αποτελέσματα ανά SSP, αναφορικά με τον αντίκτυπο κάθε επιλογής επιδότησης τεχνολογίας στις τρεις προς βελτιστοποίηση παραμέτρους – ΣΒΑ. Αυτός ο αντίκτυπος είναι διαφορετικός ανά SSP. Σκοπός της ανάλυσης είναι να προσδιοριστούν εύρωστα χαρτοφυλάκια τεχνολογιών ανεξάρτητα από το σενάριο SSP το οποίο τελικά θα αντιστοιχεί στον κόσμο του μέλλοντος. Το σενάριο «SSP ευρωστίας» χρησιμοποιεί το μέσο των αποτελεσμάτων του κάθε σεναρίου SSP σχετικά με την σχέση κόστους-αποτελεσματικότητας κάθε τεχνολογίας στους ΣΒΑ και το χρησιμοποιεί ως σημείο αναφοράς για την επίλυση της «SSP εύρωστης» βελτιστοποίησης. Στο μοντέλο «SSP ευρωστίας» εκτελείται στοχαστική ανάλυση ευρωστίας, με χρήση της μεθόδου Monte Carlo και σε αντιστοιχία με τη διαδικασία εκτέλεσης των Monte Carlo επαναλήψεων που περιεγράφηκαν παραπάνω. Η ιδιαιτερότητα στην προκειμένη Monte Carlo ανάλυση είναι η χρησιμοποίηση του εύρους των αποτελεσμάτων της ξεχωριστής SSP μοντελοποίησης για να οριστεί η απόκλιση της πιθανοτικής κατανομής. Η αβεβαιότητα σχετικά με το ποιο SSP αναμένεται να πραγματοποιηθεί στο μέλλον ενσωματώνεται επομένως στην ανάλυση χαρτοφυλακίου ως ένα εύρος, το οποίο αντιστοιχεί στο εύρος της απόδοσης κάθε τεχνολογίας στη σχέση κόστους-αποτελεσματικότητας αναφορικά με την προόδου σε κάθε έναν από τους τρεις ΣΒΑ (Van de Ven et al., 2019). Με αυτόν τον τρόπο, το εύρος των διαφορετικών για κάθε SSP αποτελεσμάτων που δίνει η προσομοίωση GCAM, το οποίο είναι διαφορετικό για κάθε τεχνολογία, καθορίζει τα εύρη της ομοιόμορφης κατανομής, η οποία χρησιμοποιείται για την προσομοίωση Monte Carlo. Όπως

Κεφάλαιο 7. Πρόταση ολοκληρωμένου πλαισίου ανάλυσης αβεβαιότητας υπό διαφορετικά κοινωνικοοικονομικά σενάρια για τον προσδιορισμό βέλτιστων χαρτοφυλακίων ενεργειακών τεχνολογιών στην ανατολική Αφρική στο πλαίσιο επίτευξης των Στόχων Βιώσιμης Ανάπτυξης.

είναι αναμενόμενο, τα εύρη αβεβαιότητας διαφέρουν μεταξύ των εξεταζόμενων τεχνολογιών: όσο υψηλότερο είναι το εύρος των αποτελεσμάτων μεταξύ των SSPs, τόσο ευρύτερο θεωρείται το εύρος της αβεβαιότητας στην ομοιόμορφη κατανομή. Ακολουθώντας την παραπάνω μεθοδολογία, ένα πρόβλημα ανάλυσης χαρτοφυλακίου το οποίο βελτιστοποιεί τεχνολογίες όπου τα χρησιμοποιούμενα εύρη είναι στενά, αναμένεται να είναι πιο εύρωστο μεταξύ των διαφορετικών SSPs, σε σύγκριση με ένα χαρτοφυλάκιο με τεχνολογίες μεγαλύτερου εύρους αβεβαιότητας, το οποίο και αναμένεται να εμφανίζει υψηλότερη μεταβλητότητα μεταξύ των αποτελεσμάτων των διαφορετικών SSPs. Για να διευκρινιστεί καλύτερα αυτό, στο ακραίο σενάριο όπου η προκύπτουσα απόδοση μιας τεχνολογίας είναι πανομοιότυπη μεταξύ των διαφορετικών SSPs, τα χαρτοφυλάκια που προκύπτουν από τη βελτιστοποίηση θα είναι εντελώς εύρωστα, όταν η αβεβαιότητα αξιολογείται με βάση τον βαθμό στον οποίο τα αποτελέσματα εξαρτώνται από τις κοινωνικοοικονομικές μεταβλητές, οι οποίες συνοψίζονται στα διάφορα SSPs. Τα εύρη που χρησιμοποιήθηκαν στις ομοιόμορφες κατανομές (όρια αβεβαιότητας που βασίζονται στην υλοποίηση διαφορετικών SSPs) και ένα παράδειγμα υπολογισμού τους με βάση το μέσο σημείο των επιδόσεων μεταξύ των τριών SSPs παρουσιάζονται στους Πίνακες 7-1 και 7-2.

Πίνακας 7-1: Αποτύπωση των ορίων για την ανάλυση αβεβαιότητας ανά τεχνολογία

| Τεχνολογία | Παράμετρος Βελτιστοποίησης #1 | Παράμετρος Βελτιστοποίησης #2 | Παράμετρος Βελτιστοποίησης #3 |
|---------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| Τεχνολογία #1 | [0.99,1.01] | [0.98,1.02] | [0.98,1.02] |
| Τεχνολογία #2 | [0.98, 1.02] | [0.99, 1.01] | [0.95, 1.05] |
| Τεχνολογία #3 | [0.98, 1.02] | [0.99, 1.01] | [0.89, 1.11] |
| Τεχνολογία #4 | [0.89, 1.11] | [0.90, 1.10] | [0.90, 1.10] |
| Τεχνολογία #5 | [0.97, 1.03] | [0.96, 1.04] | [0.91, 1.09] |
| Τεχνολογία #6 | [0.72, 1.28] | [0.61, 1.39] | [0.93, 1.07] |

Κεφάλαιο 7. Πρόταση ολοκληρωμένου πλαισίου ανάλυσης αβεβαιότητας υπό διαφορετικά κοινωνικοοικονομικά σενάρια για τον προσδιορισμό βέλτιστων χαρτοφυλακίων ενεργειακών τεχνολογιών στην ανατολική Αφρική στο πλαίσιο επίτευξης των Στόχων Βιώσιμης Ανάπτυξης.

Πίνακας 7-2: Παράδειγμα υπολογισμού βασικών μεγεθών για την ανάλυση «SSP ευρωστίας» (Τεχνολογία #1)

| Μέσο σημείο των επιδόσεων μεταξύ των τριών SSPs | | | Εύρος διακύμανσης επιδόσεων μεταξύ των τριών SSPs | | | % μεταβολή των επιδόσεων μεταξύ των τριών SSPs | | |
|---|--------------------------------|--------------------------------|---|--------------------------------|--------------------------------|--|--------------------------------|--------------------------------|
| Παράμετρος Βελτιστο-ποίησης #1 | Παράμετρος Βελτιστο-ποίησης #2 | Παράμετρος Βελτιστο-ποίησης #3 | Παράμετρος Βελτιστο-ποίησης #1 | Παράμετρος Βελτιστο-ποίησης #2 | Παράμετρος Βελτιστο-ποίησης #3 | Παράμετρος Βελτιστο-ποίησης #1 | Παράμετρος Βελτιστο-ποίησης #2 | Παράμετρος Βελτιστο-ποίησης #3 |
| 0.000439 | 62.9566 | 0.17109 | 4.2E-06 | 0.436791 | 0.001689 | 0.96% | 0.69% | 0.99% |
| 0.003189 | 455.108 | 1.24059 | 2.25E-05 | 2.955247 | 0.016963 | 0.71% | 0.65% | 1.37% |
| 0.00579 | 825.195 | 2.25515 | 3.66E-05 | 12.78863 | 0.033728 | 0.63% | 1.55% | 1.50% |
| 0.161016 | 23751.5 | 59.9151 | 0.00087 | 746.8392 | 1.943537 | 0.54% | 3.14% | 3.24% |
| Όρια αβεβαιότητας (εύρη ομοιόμορφης κατανομής) = απόσταση από τον μ.ο. του % εύρους επιδόσεων μεταξύ των 3 SSPs | | | | | | [0.99,1.01] | [0.98,1.02] | [0.98,1.02] |

Προκειμένου να επαληθευτεί ότι τα ευσταθή χαρτοφυλάκια της «ευρωστίας SSP» αντιστοιχούν σε πιο ευσταθείς μεταξύ των διαφορετικών SSP λύσεις, επιλέγονται βέλτιστα χαρτοφυλάκια του σεναρίου «ευρωστίας SSP» που διαφέρουν ως προς το επίπεδο ευστάθειας και επαναλαμβάνεται η επίλυση τους στο μοντέλο GCAM. Η επανάληψη της επίλυσης εφαρμόζεται για τα τρία διαφορετικά SSPs. Η νέα επίλυση του μοντέλου GCAM δίνει νέα αποτελέσματα σχετικά με τη συμβολή των τεχνολογιών σε καθέναν από τους ΣΒΑ και ο στόχος είναι να ελεγχθεί εάν τα αποτελέσματα ενός πιο ευσταθούς χαρτοφυλακίου είναι τελικά πιο ομοιογενή μεταξύ των διαφορετικών SSPs σε σύγκριση με ένα λιγότερο ευσταθές. Ο βαθμός ομοιογένειας μεταξύ των διαφορετικών SSPs ποσοτικοποιείται μετρώντας το εύρος επιδόσεων στους τρεις ΣΒΑ, μεταξύ των SSPs, και επαληθεύοντας ότι αυτό είναι μικρότερο στην περίπτωση του πιο ευσταθούς χαρτοφυλακίου.

Συνοψίζοντας τη ροή της πληροφορίας εντός και μεταξύ των δύο μοντέλων, το μοντέλο GCAM τροφοδοτείται αρχικά με κοινωνικοοικονομικά δεδομένα από τρία SSPs και στη συνέχεια υπολογίζει την επίδοση καθεμιάς εκ ενός συνόλου βιώσιμων τεχνολογιών στην αποφυγή της πρόωρης θνησιμότητας λόγω ατμοσφαιρικής ρύπανσης, στις περικοπών εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου και στην βελτίωση των επιπέδων πρόσβασης σε ενέργεια για διαφορετικά επίπεδα επιδότησης. Τα τελευταία, μαζί με έναν δεδομένο συνολικό

Κεφάλαιο 7. Πρόταση ολοκληρωμένου πλαισίου ανάλυσης αβεβαιότητας υπό διαφορετικά κοινωνικοοικονομικά σενάρια για τον προσδιορισμό βέλτιστων χαρτοφυλακίων ενεργειακών τεχνολογιών στην ανατολική Αφρική στο πλαίσιο επίτευξης των Στόχων Βιώσιμης Ανάπτυξης.

προϋπολογισμό που χρησιμοποιείται ως περιορισμός, τροφοδοτούνται σε ένα μοντέλο πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης χαρτοφυλακίων τεχνολογιών το οποίο υλοποιείται με την μέθοδο AUGMECON 2. Στη συνέχεια προσδιορίζονται τα πιο εύρωστα από τα βέλτιστα χαρτοφυλάκια για τρεις χρονικές κλίμακες (2020, 2030 και 2040) και ανά SSP, μέσω της ανάλυσης Monte Carlo η οποία διενεργείται για ένα εύρος αβεβαιότητας $\pm 5\%$ για καθεμία από τις τρεις παραμέτρους που σχετίζονται με τους ΣΒΑ. Ταυτόχρονα, επιλύεται ένα νέο πρόβλημα βελτιστοποίησης «ευρωστίας SSP», με βάση το μέσο των επιδόσεων που δίνει το μοντέλο GCAM, το οποίο διαφέρει για κάθε τεχνολογία και ΣΒΑ. Η ανάλυση Monte Carlo για τη νέα βελτιστοποίηση εκτελείται σε διαφορετικό εύρος αβεβαιότητας, το οποίο ορίζεται από το εύρος των τιμών κάθε παραμέτρου για κάθε επίπεδο επιδότησης και κάθε τεχνολογία. Τέλος, από τα αποτελέσματα της νέας βελτιστοποίησης «ευρωστίας SSP» επιλέγονται συγκεκριμένα βέλτιστα χαρτοφυλάκια με διαφορετικά επίπεδα ευστάθειας και τα επίπεδα επιδότησης για κάθε τεχνολογία που προκύπτουν από τα επιλεγμένα χαρτοφυλάκια, ανατροφοδοτούνται στο GCAM, προκειμένου να ελεγχθεί εάν τα πιο ευσταθή χαρτοφυλάκια της βελτιστοποίησης «ευρωστίας SSP», είναι όντως πιο ευσταθή ως προς τα διαφορετικά αποτελέσματα που γεννά το μοντέλο GCAM για τα διαφορετικά SSPs.

7.3 Αποτελέσματα

7.3.1 Οικονομική αποδοτικότητα επιδοτήσεων στους ΣΒΑ

Οι παράμετροι των SSPs που προέκυψε ότι έχουν τη μεγαλύτερη επιρροή στα αποτελέσματα του GCAM είναι ο πληθυσμός, το ΑΕΠ, και η αστικοποίηση. Η προβλεπόμενη εξέλιξη στις τιμές των παραπάνω μεγεθών από το 2010 έως το 2040 για την περιοχή της ανατολικής Αφρικής φαίνεται στον Πίνακα 7-3.

Κεφάλαιο 7. Πρόταση ολοκληρωμένου πλαισίου ανάλυσης αβεβαιότητας υπό διαφορετικά κοινωνικοοικονομικά σενάρια για τον προσδιορισμό βέλτιστων χαρτοφυλακίων ενεργειακών τεχνολογιών στην ανατολική Αφρική στο πλαίσιο επίτευξης των Στόχων Βιώσιμης Ανάπτυξης.

Πίνακας 7-3: Εξέλιξη βασικών παραμέτρων των σεναρίων SSPs για χρήση στο μοντέλο GCAM

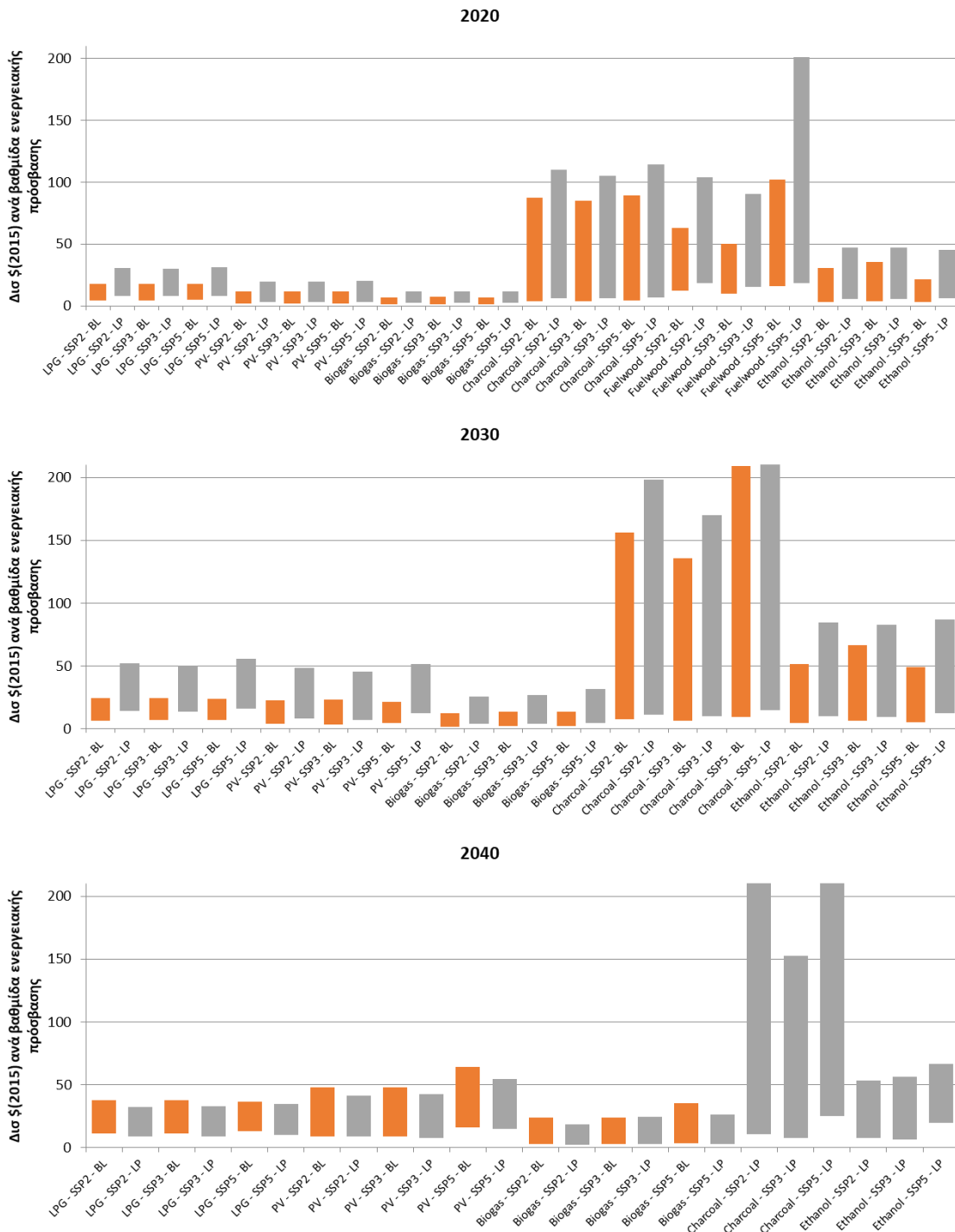
| | 2010 | 2020 | 2030 | 2040 | 2010 | 2020 | 2030 | 2040 | 2010 | 2020 | 2030 | 2040 |
|-------------|---|------|------|------|---|------|------|------|---|------|------|------|
| | Πληθυσμός (Εκατομμύρια κάτοικοι) (Samir and Lutz, 2017) | | | | κατά κεφαλήν ΑΕΠ (\$2015) ετησίως) (Dellink et al., 2017) | | | | Μερίδιο αστικού πληθυσμού (%) (Jiang and O'Neill, 2018) | | | |
| SSP2 | 259 | 327 | 399 | 468 | 732 | 965 | 1438 | 2173 | 22.9 | 27.7 | 32.6 | 37.7 |
| SSP3 | 259 | 335 | 425 | 521 | 732 | 951 | 1248 | 1547 | 22.9 | 24.8 | 26.7 | 28.4 |
| SSP5 | 259 | 319 | 373 | 419 | 732 | 980 | 1833 | 3893 | 22.9 | 31.0 | 40.0 | 49.2 |

Το πρώτο βήμα της προτεινόμενης ανάλυσης είναι η προσομοίωση μελλοντικών κοινωνικοοικονομικών σεναρίων μέσω του μοντέλου GCAM και η μετάφραση των αποτελεσμάτων κάθε σεναρίου πολιτικής σε παραμέτρους προόδου που σχετίζονται με τους ΣΒΑ. Αυτό επιτυγχάνεται μετρώντας τον αντίκτυπο συγκεκριμένων επιδοτήσεων στην πρόοδο έξι τεχνολογιών για καθένα από τους τρεις ΣΒΑ. Επιλέχθηκαν τεχνολογίες κατάλληλες προς υιοθέτηση στις δώδεκα αναπτυσσόμενες χώρες της ανατολικής Αφρικής (με βάση τις δεσμεύσεις τους για δράση, όπως αντικατοπτρίζονται στις Εθνικά Καθορισμένες Συνεισφορές τους). Τα αποτελέσματα της σχέσης κόστους-αποτελεσματικότητας των τεχνολογικών επιδοτήσεων ως προς τους ΣΒΑ (Σχήμα 7-8, Σχήμα 7-9, Σχήμα 7-10), δείχνουν ότι οι επιδοτήσεις σε συστήματα βιοαερίου είναι οι πιο αποδοτικές από άποψη κόστους για όλους τους ΣΒΑ, τα σενάρια και τα έτη. Αντίθετα, οι επιδοτήσεις σε συστήματα καυσόξυλων είναι οικονομικά αποδοτικές μόνο βραχυπρόθεσμα. Για την περίπτωση του γαιάνθρακα, παρατηρείτε ότι η σχέση κόστους-αποτελεσματικότητας εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το επίπεδο επιδότησης. Συγκρίνοντας την πρόοδο μεταξύ των διαφορετικών χρονοδιαγραμμάτων, φαίνεται ότι απαιτούνται μεγαλύτερα ποσά επιδότησης για την επίτευξη του ίδιου αποτελέσματος μακροπρόθεσμα (2040), τουλάχιστον όσον αφορά τους ΣΒΑ 3 και 7. Επιπλέον, μεσοπρόθεσμα (2030) και μακροπρόθεσμα (2040), η χρησιμοποίηση ως καύσιμο της ξυλώδους βιομάζας, του γαιάνθρακα και της αιθανόλης παρουσιάζουν ακόμη και αρνητικές επιπτώσεις για τους τρεις ΣΒΑ και τις εξεταζόμενες επιδοτήσεις. Μεταξύ των διαφορετικών SSPs, η σχέση κόστους-αποτελεσματικότητας παραμένει στα ίδια επίπεδα για κάθε τεχνολογία, με

Κεφάλαιο 7. Πρόταση ολοκληρωμένου πλαισίου ανάλυσης αβεβαιότητας υπό διαφορετικά κοινωνικοοικονομικά σενάρια για τον προσδιορισμό βέλτιστων χαρτοφυλακίων ενεργειακών τεχνολογιών στην ανατολική Αφρική στο πλαίσιο επίτευξης των Στόχων Βιώσιμης Ανάπτυξης.

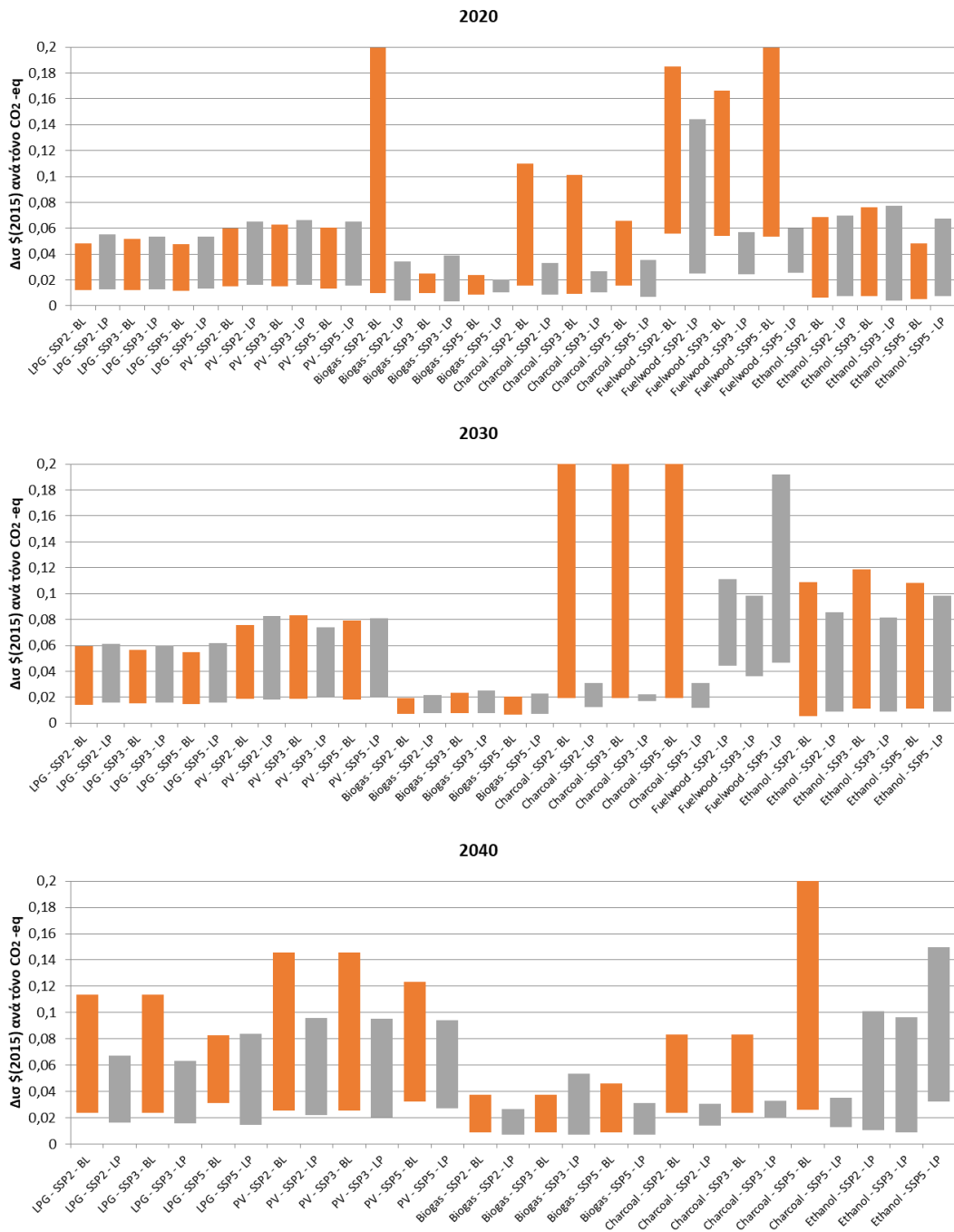
ορισμένες διαφορές να παρατηρούνται βραχυπρόθεσμα (2020) για το βιοαέριο και τον ΣΒΑ 13, καθώς και για τον γαιάνθρακα για τη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου - ΣΒΑ 13 σε μεσοπρόθεσμο και μακροπρόθεσμο ορίζοντα. Η εφαρμογή πολιτικής γης παρατηρείται ότι προκαλεί αύξηση της σχέσης κόστους-αποτελεσματικότητας για τον ΣΒΑ 13 για την χρήση του γαιάνθρακα και της ξυλώδους βιομάζας. Συνολικά, απαιτούνται μεγαλύτερα ποσά επιδότησης για τη θετική συμβολή των τεχνολογιών στους τρεις ΣΒΑ όταν υλοποιηθεί το SSP 5. Γενικά, παρατηρείτε ότι ανάλογα με το SSP σενάριο που εφαρμόζεται και το εξεταζόμενο χρονικό πλαίσιο, ορισμένα μονοπάτια τεχνολογίας είναι πιο οικονομικά από άλλα για ένα συγκεκριμένο ΣΒΑ και ορισμένα έχουν αρνητικά αποτελέσματα (και επομένως δεν ενσωματώνονται στα εν λόγω σχήματα). Έτσι, η ανάγκη εντοπισμού χαρτοφυλακίων τεχνολογιών που είναι κατά Pareto βέλτιστα όσον αφορά την ταυτόχρονη συμβολή στους τρεις ΣΒΑ και, το πιο σημαντικό, εύρωστα μεταξύ των διαφορετικών σεναρίων SSPs είναι κάτι παραπάνω από εμφανής.

Κεφάλαιο 7. Πρόταση ολοκληρωμένου πλαισίου ανάλυσης αβεβαιότητας υπό διαφορετικά κοινωνικοοικονομικά σενάρια για τον προσδιορισμό βέλτιστων χαρτοφυλακίων ενεργειακών τεχνολογιών στην ανατολική Αφρική στο πλαίσιο επίτευξης των Στόχων Βιώσιμης Ανάπτυξης.



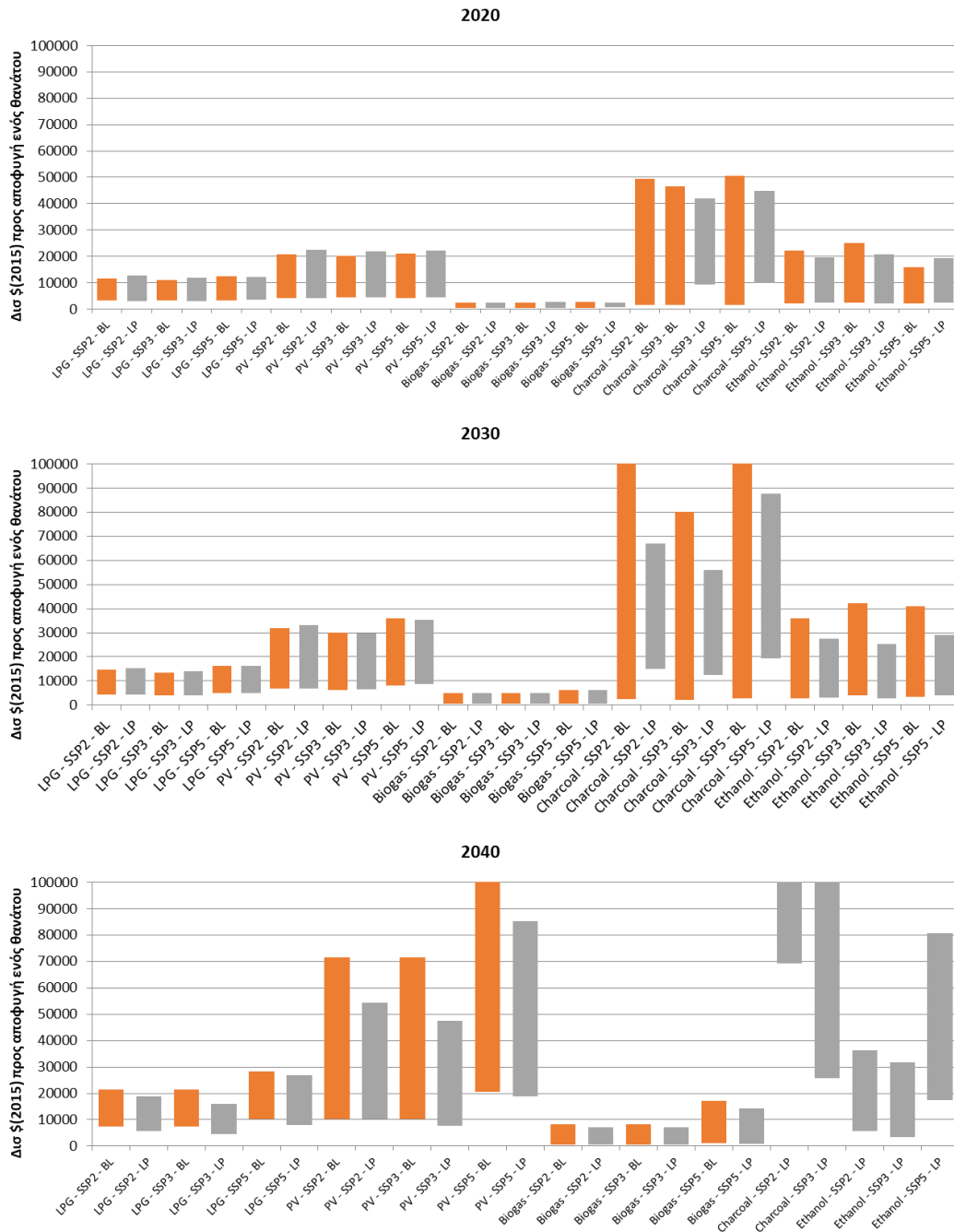
Σχήμα 7-8: Οικονομική απόδοση των επιδοτήσεων ανά τεχνολογία για τον ΣΒΑ 7 για τα SSPs 2,3,5 και για τα σενάρια με (LP - γκρι χρώμα) και χωρίς (BS - πορτοκαλί χρώμα) πολιτική γης, έως το 2020, το 2030 και το 2040.

Κεφάλαιο 7. Πρόταση ολοκληρωμένου πλαισίου ανάλυσης αβεβαιότητας υπό διαφορετικά κοινωνικοοικονομικά σενάρια για τον προσδιορισμό βέλτιστων χαρτοφυλακίων ενεργειακών τεχνολογιών στην ανατολική Αφρική στο πλαίσιο επίτευξης των Στόχων Βιώσιμης Ανάπτυξης.



Σχήμα 7-9: Οικονομική απόδοση των επιδοτήσεων ανά τεχνολογία για τον ΣΒΑ 13 για τα SSPs 2,3,5 και για τα σενάρια με (LP - γκρι χρώμα) και χωρίς (BS - πορτοκαλί χρώμα) πολιτική γης, έως το 2020, το 2030 και το 2040.

Κεφάλαιο 7. Πρόταση ολοκληρωμένου πλαισίου ανάλυσης αβεβαιότητας υπό διαφορετικά κοινωνικοοικονομικά σενάρια για τον προσδιορισμό βέλτιστων χαρτοφυλακίων ενεργειακών τεχνολογιών στην ανατολική Αφρική στο πλαίσιο επίτευξης των Στόχων Βιώσιμης Ανάπτυξης.



Σχήμα 7-10: Οικονομική απόδοση των επιδοτήσεων ανά τεχνολογία για τον ΣΒΑ 7 για τα SSPs 2,3,5 και για τα σενάρια με (LP - γκρι χρώμα) και χωρίς (BS - πορτοκαλί χρώμα) πολιτική γης, έως το 2020, το 2030 και το 2040.

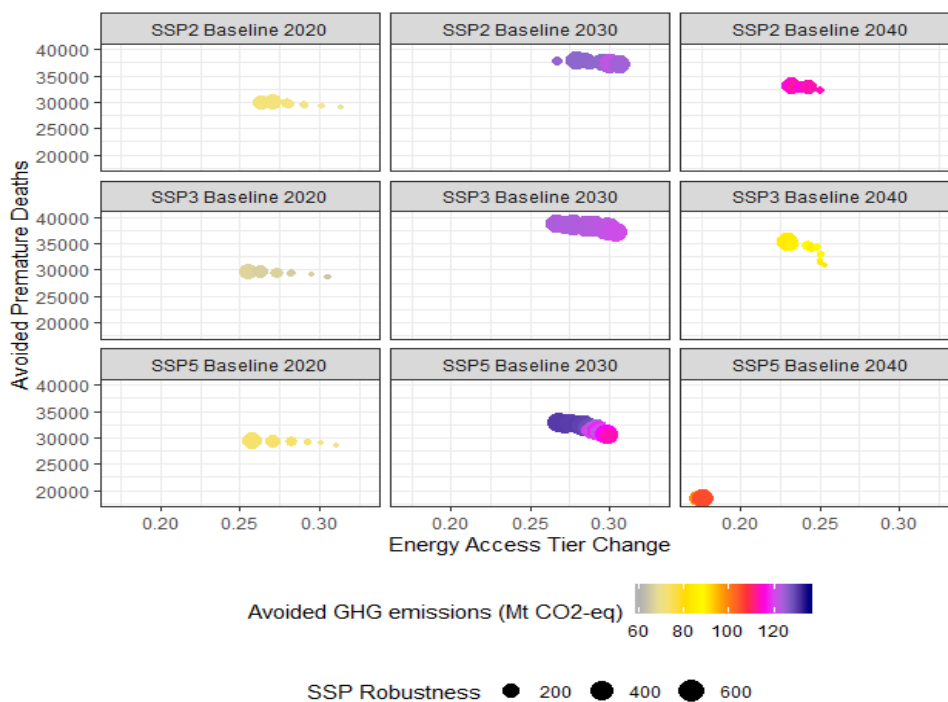
Κεφάλαιο 7. Πρόταση ολοκληρωμένου πλαισίου ανάλυσης αβεβαιότητας υπό διαφορετικά κοινωνικοοικονομικά σενάρια για τον προσδιορισμό βέλτιστων χαρτοφυλακίων ενεργειακών τεχνολογιών στην ανατολική Αφρική στο πλαίσιο επίτευξης των Στόχων Βιώσιμης Ανάπτυξης.

7.3.2 Προσδιορισμός βέλτιστων χαρτοφυλακίων – μελέτη ευστάθειας σε επίπεδο SSPs

Ο δεύτερος στόχος αυτής της έρευνας είναι να προσδιορίσει τα βέλτιστα χαρτοφυλάκια τεχνολογιών που είναι ευσταθή για κάθε ένα από τα διαφορετικά κοινωνικοοικονομικά μονοπάτια, όταν επιβάλλεται στοχαστική αβεβαιότητα στις παραμέτρους του μοντέλου. Τα αποτελέσματα της πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης χαρτοφυλακίου η οποία μοντελοποιείται με την μέθοδο AUGMECON 2, με ενσωματωμένη την πληροφορία για την ευστάθεια των λύσεων που παράγονται από τις σειρές του Monte Carlo, φαίνονται ανά σενάριο πολιτικής στα Σχήματα Σχήμα 7-11, Σχήμα 7-14. Τα σχήματα δείχνουν το μέτωπο Pareto των βέλτιστων λύσεων, δηλαδή το σύνολο των λύσεων που αντιστοιχούν στις καλύτερες δυνατές αντισταθμίσεις μεταξύ των τριών ΣΒΑ. Τοποθετώντας τα μέτωπα Pareto των διαφορετικών σεναρίων SSP σε ακολουθία μεταξύ τους γίνεται εύκολη η σύγκριση των αποτελεσμάτων μεταξύ των διαφορετικών SSPs. Σε κάθε σχήμα, οι διαφορές της απόδοσης των τεχνολογιών μεταξύ των SSPs παρατηρούνται κυρίως στο SSP 5 για τα έτη 2030 και 2040. Πιο αναλυτικά, μεταξύ των διαφορετικών κοινωνικοοικονομικών μονοπατιών, το SSP 2 αποδεικνύεται ότι προσφέρει τις καλύτερες συνθήκες για την πρόοδο προς στην επίτευξη των τριών ΣΒΑ βραχυπρόθεσμα. Μεσοπρόθεσμα και μακροπρόθεσμα, το SSP 3 οδηγεί σε καλύτερα αποτελέσματα για την ενεργειακή πρόσβαση (ΣΒΑ 7) και το κριτήριο της καλής υγείας (ΣΒΑ 3), ενώ για τον στόχο της μείωσης των εκπομπών (ΣΒΑ 13), το SSP 2 αποδίδει καλύτερα. Το SSP 5 έχει τη χαμηλότερη συμβολή στους στόχους βελτιστοποίησης για όλες τις εξεταζόμενες χρονικές κλίμακες, κάτι που είναι αρκετά συνεπές με την περιγραφή του συγκεκριμένου σεναρίου. Στο σενάριο εφαρμογής πολιτικής γης και ανεξάρτητα από την εξεταζόμενη χρονική περίοδο, τα επίπεδα ενεργειακής πρόσβασης (ΣΒΑ 7) και πρόωρης θνησιμότητας (ΣΒΑ 3) είναι υψηλότερα για το SSP 3, ενώ και πάλι το SSP 2 υπερτερεί των υπολοίπων SSPs στη μείωση των εκπομπών GHG (ΣΒΑ 13). Το SSP5 ως κοινωνικοοικονομικό μονοπάτι χαρακτηρίζεται από υψηλότερα εισοδήματα και επίπεδα αστικοποίησης, γεγονός που αυξάνει την πρόσβαση σε

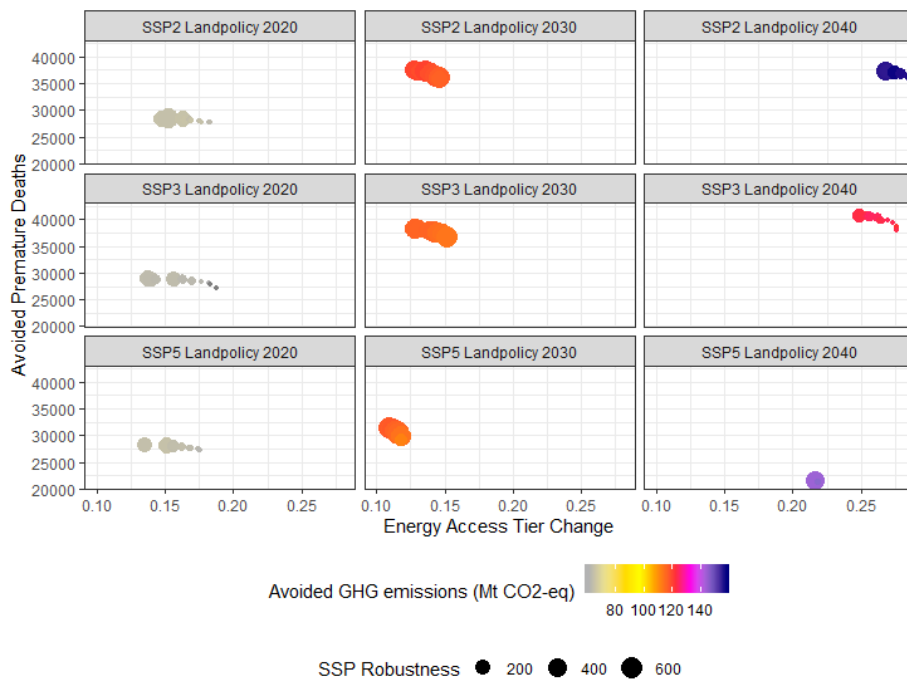
Κεφάλαιο 7. Πρόταση ολοκληρωμένου πλαισίου ανάλυσης αβεβαιότητας υπό διαφορετικά κοινωνικοοικονομικά σενάρια για τον προσδιορισμό βέλτιστων χαρτοφυλακίων ενεργειακών τεχνολογιών στην ανατολική Αφρική στο πλαίσιο επίτευξης των Στόχων Βιώσιμης Ανάπτυξης.

πηγές ενέργειας υψηλής ποιότητας, όπως το υγραέριο, ακόμη και χωρίς τη συμβολή επιπλέον επιδότησης, κάτι που εξηγεί το ότι η συνεισφορά των επιδοτήσεων των τεχνολογιών στο SSP5 είναι λιγότερο αποδοτική. Σε όλα τα σενάρια SSPs και για όλους τους χρονικούς ορίζοντες, η διάθεση μεγαλύτερου ποσού ως συνολικού προϋπολογισμού επιδότησης αναμενόμενα οδηγεί σε καλύτερη απόδοση στους στόχους βελτιστοποίησης σε σύγκριση με ένα χαμηλότερο επίπεδο διαθέσιμων επιδοτήσεων. Όσον αφορά τη σύγκριση μεταξύ των δυο σεναρίων πολιτικής γης, παρατηρείται ότι η επιδότηση των εξεταζόμενων τεχνολογιών συμβάλλει περισσότερο στην πρόοδο των ΣΒΑ όταν δεν επιβάλλεται πολιτική γης βραχυπρόθεσμα και μεσοπρόθεσμα. Αντίθετα, μακροπρόθεσμα, η πολιτική γης προκαλεί αύξηση της αποτελεσματικότητας των επιδοτήσεων στις τεχνολογίες. Για περαιτέρω ανάλυση του τρόπου με τον οποίο οι επιπτώσεις της κάθε πολιτικής επηρεάζουν την υιοθέτηση των τεχνολογιών, ο αναγνώστης παραπέμπεται στον Van de Ven et al. (2019).

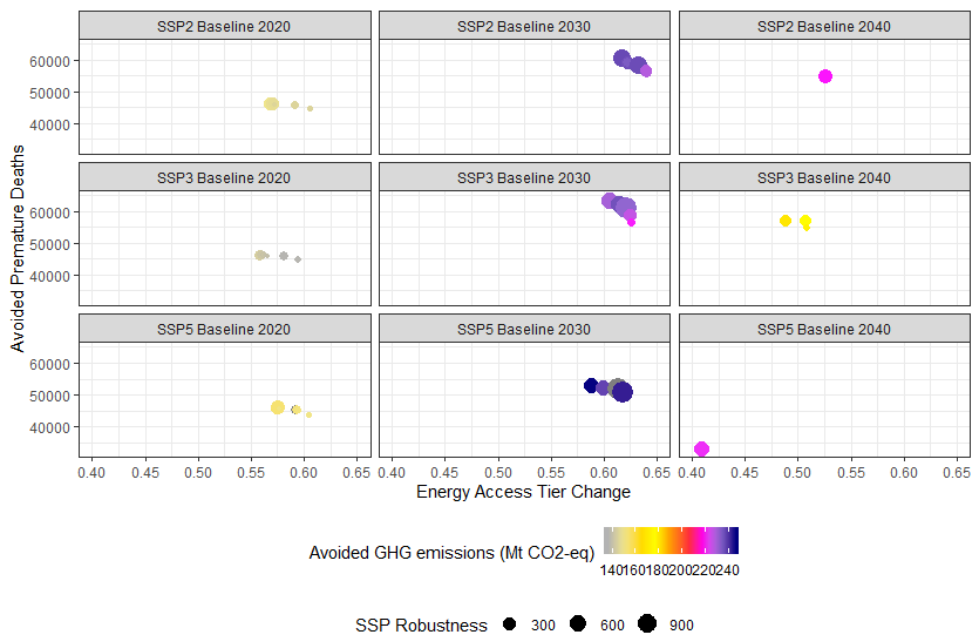


Σχήμα 7-11: Αποτελέσματα βελτιστοποίησης για το σενάριο «χαμηλού» προϋπολογισμού, χωρίς εφαρμογή πολιτικής γης (baseline) με ανάλυση αβεβαιότητας ανά SSP έως το 2020, 2030 και 2040

Κεφάλαιο 7. Πρόταση ολοκληρωμένου πλαισίου ανάλυσης αβεβαιότητας υπό διαφορετικά κοινωνικοοικονομικά σενάρια για τον προσδιορισμό βέλτιστων χαρτοφυλακίων ενεργειακών τεχνολογιών στην ανατολική Αφρική στο πλαίσιο επίτευξης των Στόχων Βιώσιμης Ανάπτυξης.

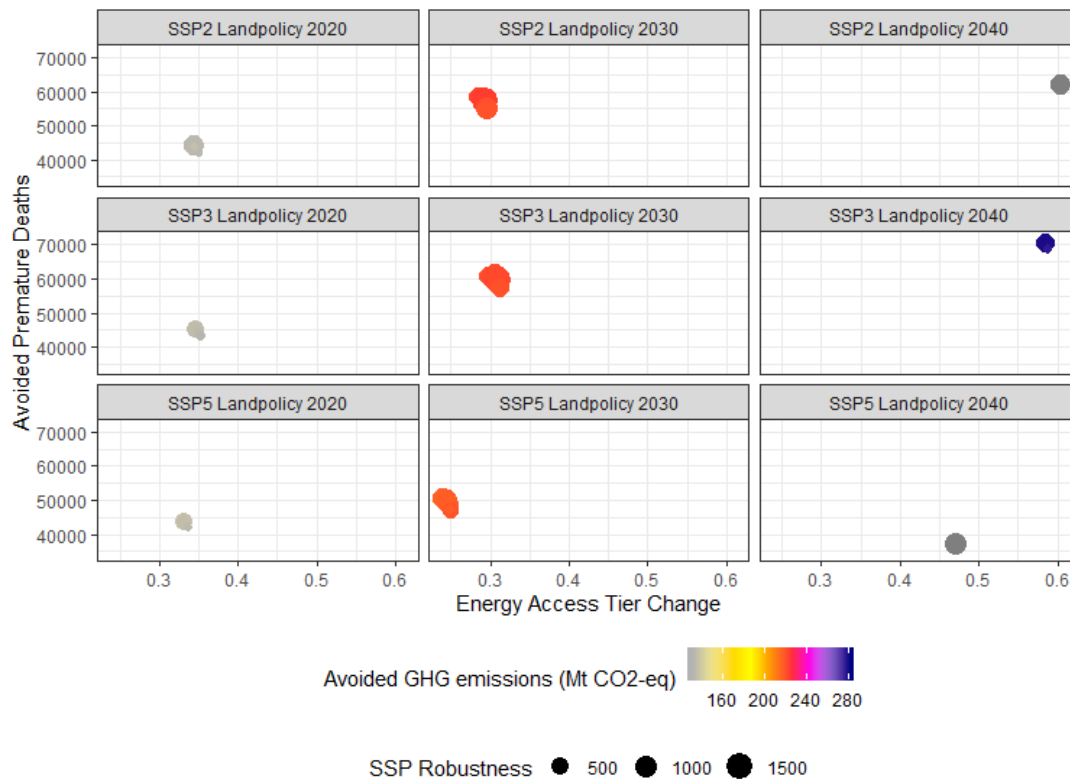


Σχήμα 7-12: Αποτελέσματα βελτιστοποίησης για το σενάριο «χαμηλού» προϋπολογισμού, με εφαρμογή πολιτικής γης (landpolicy) με ανάλυση αβεβαιότητας ανά SSP έως το 2020, 2030 και 2040



Σχήμα 7-13: Αποτελέσματα βελτιστοποίησης για το σενάριο «υψηλού» προϋπολογισμού, χωρίς εφαρμογή πολιτικής γης (baseline) με ανάλυση αβεβαιότητας ανά SSP έως το 2020, 2030 και 2040

Κεφάλαιο 7. Πρόταση ολοκληρωμένου πλαισίου ανάλυσης αβεβαιότητας υπό διαφορετικά κοινωνικοοικονομικά σενάρια για τον προσδιορισμό βέλτιστων χαρτοφυλακίων ενεργειακών τεχνολογιών στην ανατολική Αφρική στο πλαίσιο επίτευξης των Στόχων Βιώσιμης Ανάπτυξης.

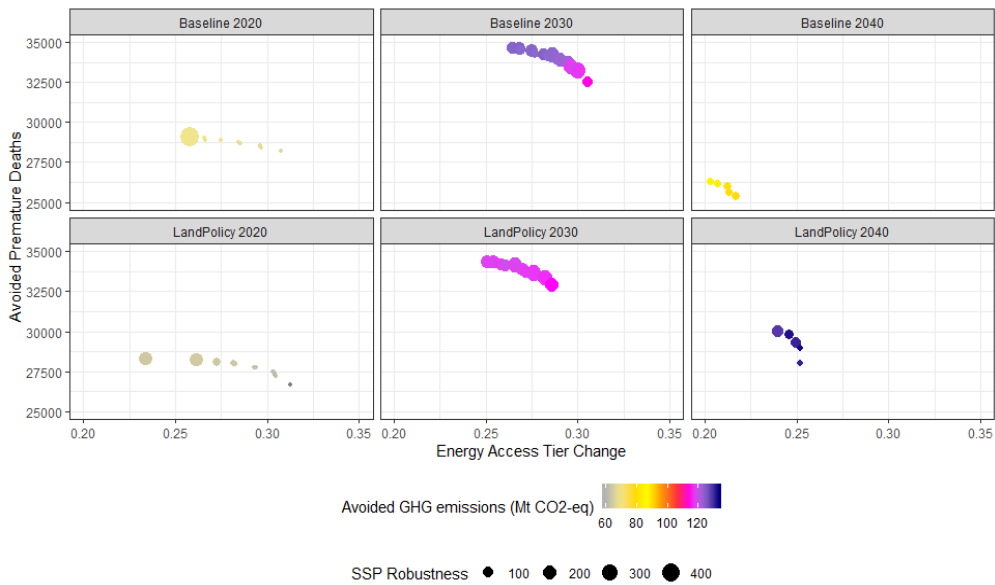


Σχήμα 7-14: Αποτελέσματα βελτιστοποίησης για το σενάριο «υψηλού» προϋπολογισμού, με εφαρμογή πολιτικής γης (landpolicy) με ανάλυση αβεβαιότητας ανά SSP έως το 2020, 2030 και 2040

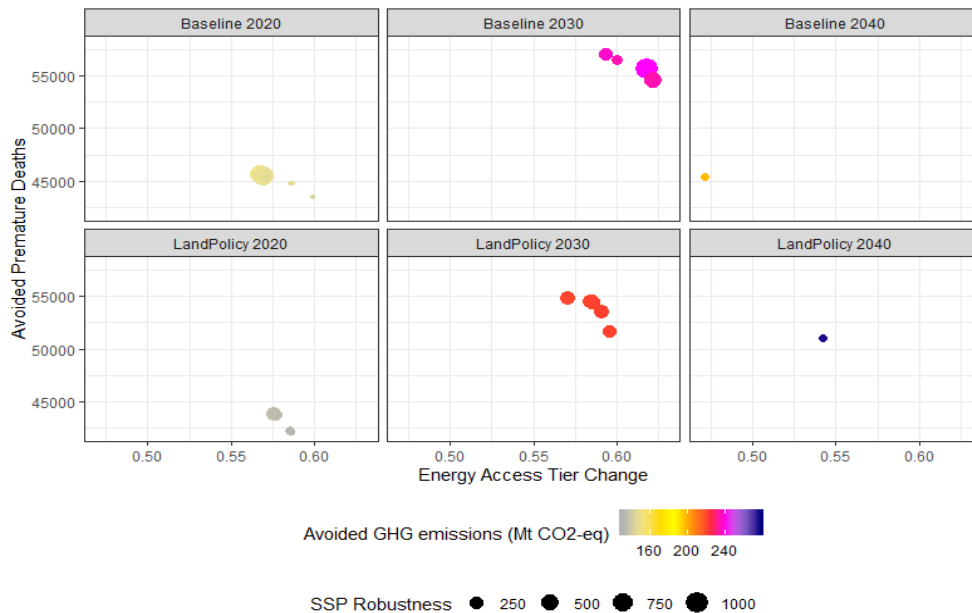
7.3.3 Προσδιορισμός βέλτιστων και ευσταθών χαρτοφυλακίων στο μέσο κοινωνικοοικονομικό σενάριο

Σε αυτήν την ενότητα, ο στόχος είναι να οριστούν ευσταθή χαρτοφυλάκια επιδοτήσεων για οποιοδήποτε από τα τρία κοινωνικοοικονομικά σενάρια SSPs (2, 3 και 5). Για να αξιολογηθεί η ευρωστία των αποτελεσμάτων προτείνεται μια ανάλυση που εφαρμόζει τα εύρη των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης GCAM μεταξύ των SSPs ως τα όρια της ανάλυσης αβεβαιότητας. Τα παρακάτω σχήματα απεικονίζουν τα μέτωπα Pareto των βέλτιστων λύσεων, και επιπλέον παρέχουν πληροφορίες για την ευρωστία των αποτελεσμάτων, η οποία αντιπροσωπεύεται από το μέγεθος των κουκκίδων στο γράφημα: όσο μεγαλύτερες είναι οι κουκκίδες, τόσο μεγαλύτερη η ευρωστία.

Κεφάλαιο 7. Πρόταση ολοκληρωμένου πλαισίου ανάλυσης αβεβαιότητας υπό διαφορετικά κοινωνικοοικονομικά σενάρια για τον προσδιορισμό βέλτιστων χαρτοφυλακίων ενεργειακών τεχνολογιών στην ανατολική Αφρική στο πλαίσιο επίτευξης των Στόχων Βιώσιμης Ανάπτυξης.



Σχήμα 7-15: Αποτελέσματα βελτιστοποίησης για το σενάριο «χαμηλού» προϋπολογισμού, με (landpolicy) και χωρίς (baseline) εφαρμογή πολιτικής γης για το μέσο κοινωνικοοικονομικό σενάριο έως το 2020, 2030 και 2040



Σχήμα 7-16: Αποτελέσματα βελτιστοποίησης για το σενάριο «υψηλού» προϋπολογισμού, με (landpolicy) και χωρίς (baseline) εφαρμογή πολιτικής γης για το μέσο κοινωνικοοικονομικό σενάριο έως το 2020, 2030 και 2040

Από τα διαγράμματα φαίνεται ότι η συμπεριφορά των βέλτιστων λύσεων για τους διαφορετικούς χρονικούς ορίζοντες και τα δύο σενάρια πολιτικής δείχνει

Κεφάλαιο 7. Πρόταση ολοκληρωμένου πλαισίου ανάλυσης αβεβαιότητας υπό διαφορετικά κοινωνικοοικονομικά σενάρια για τον προσδιορισμό βέλτιστων χαρτοφυλακίων ενεργειακών τεχνολογιών στην ανατολική Αφρική στο πλαίσιο επίτευξης των Στόχων Βιώσιμης Ανάπτυξης.

ομοιογένεια με την ανάλυση που έδωσε η ενότητα για τα διαφορετικά SSPs. Αυτό που είναι σημαντικό είναι να επαληθευτεί επιπλέον εάν η ανάλυση «ευρωστίας SSP» οδηγεί σε πιο ευσταθείς λύσεις μεταξύ των διαφορετικών SSPs. Για να επιτευχθεί κάτι τέτοιο, επιλέγονται δύο βέλτιστα χαρτοφυλάκια για κάθε ένα από τα έξι μέτωπα Pareto του σχήματος Σχήμα 7-15 ένα περισσότερο ευσταθές κατά την ανάλυση «ευρωστίας SSP» και ένα λιγότερο ευσταθές. Τα χαρτοφυλάκια αυτά επανεκτελούνται στο μοντέλο GCAM για να ελεγχθεί εάν τα αποτελέσματα ενός πιο ευσταθούς κατά την ανάλυση «ευρωστίας SSP» χαρτοφυλακίου είναι όντως πιο ομοιογενή μεταξύ των διαφορετικών SSPs, δηλαδή να ελεγχθεί αν η μεταβολή των επιδόσεων των τεχνολογιών στο GCAM σχετικά με τους ΣΒΑ είναι μικρότερη στην περίπτωση ενός πιο ευσταθούς χαρτοφυλακίου μεταξύ των SSPs. Τα αποτελέσματα που δίνονται στον Πίνακας 7-4 υποδηλώνουν ότι στα περισσότερα σενάρια οι έξοδοι του GCAM έχουν μικρότερο εύρος μεταβολής μεταξύ των SSPs όταν επιλέγεται ένα περισσότερο ευσταθές χαρτοφυλάκιο. Η μείωση της μεταβλητότητας των αποτελεσμάτων φτάνει το 16% για το βασικό σενάριο, χωρίς εφαρμογή πολιτικής γης, για το 2020.

Πίνακας 7-4: Μείωση εύρους αποτελεσμάτων του GCAM μεταξύ των SSPs για κάθε ΣΒΑ και σενάριο πολιτικής γης στην περίπτωση «χαμηλού» προϋπολογισμού κατά την επιλογή ενός ευσταθούς χαρτοφυλακίου

| | Μείωση εύρους αποτελεσμάτων του GCAM μεταξύ των SSPs | | |
|-----------------|--|-------|-------|
| | ΣΒΑ 13 | ΣΒΑ 3 | ΣΒΑ 7 |
| Baseline 2020 | -1% | -4% | -16% |
| Baseline 2030 | -4% | 1% | -1% |
| Baseline 2040 | 2% | -1% | -11% |
| Landpolicy 2020 | -2% | -4% | -14% |
| Landpolicy 2030 | -4% | 4% | 0% |
| Landpolicy 2040 | -5% | 0% | -14% |

7.3.4 Συμμετοχή τεχνολογιών στα πιο ευσταθή χαρτοφυλάκια

Οι Πίνακες Πίνακας 7-5 και Πίνακας 7-6 δείχνουν πώς η συνεισφορά της κάθε τεχνολογίας στα πιο ευσταθή χαρτοφυλάκια της βελτιστοποίησης παρουσιάζει μεγάλη μεταβλητότητα μεταξύ των SSPs. Σε συμφωνία με την ανάλυση της σχέσης

Κεφάλαιο 7. Πρόταση ολοκληρωμένου πλαισίου ανάλυσης αβεβαιότητας υπό διαφορετικά κοινωνικοοικονομικά σενάρια για τον προσδιορισμό βέλτιστων χαρτοφυλακίων ενεργειακών τεχνολογιών στην ανατολική Αφρική στο πλαίσιο επίτευξης των Στόχων Βιώσιμης Ανάπτυξης.

κόστους-αποτελεσματικότητας των τεχνολογικών επιδοτήσεων, το βιοαέριο είναι η τεχνολογία με τη μεγαλύτερη συμμετοχή στα βέλτιστα χαρτοφυλάκια. Αυτό είναι εμφανές στα διάφορα SSPs, για όλους τους χρονικούς ορίζοντες και σενάρια πολιτικής. Η χρήση συστημάτων υγραερίου και φωτοβολταϊκών συστημάτων έχει επίσης σημαντική συμβολή στην πρόοδο στους τρεις ΣΒΑ, ενώ οι κλίβανοι γαιάνθρακα, η αιθανόλη και το καύσιμο ξύλο είναι οι λιγότερο ελκυστικές τεχνολογίες. Εδώ τα SSPs θεωρούνται ως ένα αβέβαιο σύνολο συνθηκών που επηρεάζουν την απόδοση των επιδοτήσεων σε κάθε τεχνολογία και η ανάλυση εστιάζει στο πώς η υλοποίηση των διαφορετικών SSPs θα επηρεάσει τελικά τη συμμετοχή των τεχνολογιών στα πιο ευσταθή χαρτοφυλάκια που προκύπτουν από την πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση. Για το έτος 2020, τα ποσοστά συμμετοχής των τεχνολογιών στα ευσταθή χαρτοφυλάκια παραμένουν σταθερά κατά την ανάλυση αβεβαιότητας και μόνο στο SSP 3, όπου οι πολιτικές γης θεωρείται ότι θέτουν υψηλές προκλήσεις για τον μετριασμό της κλιματικής αλλαγής (O'Neill et al., 2014), η συμβολή των Φ/Β μειώνεται σημαντικά, αντιστοιχώντας μόλις στο 3% της επιδότησης για το σενάριο με εφαρμογή πολιτικής γης. Το 2030, παρατηρείται υψηλή αύξηση της συνεισφοράς της αιθανόλης στο βασικό, χωρίς πολιτική γης, σενάριο για το SSP 5, όπου η αιθανόλη επιδοτείται έως και 11%, σε αντίθεση με τα SSP 2 και 3 όπου η επιδότηση για τις σόμπες αιθανόλης είναι μικρότερη από 2%. Για το σενάριο της πολιτικής γης το 2030 όλα τα SSPs παρουσιάζουν διαφορετική συμπεριφορά στη συμβολή του υγραερίου και των φωτοβολταϊκών. Μεγαλύτερες διαφορές μεταξύ των SSPs παρατηρούνται για το 2040, τόσο για το βασικό σενάριο όσο και για το σενάριο εφαρμογής πολιτικής γης.

Κεφάλαιο 7. Πρόταση ολοκληρωμένου πλαισίου ανάλυσης αβεβαιότητας υπό διαφορετικά κοινωνικοοικονομικά σενάρια για τον προσδιορισμό βέλτιστων χαρτοφυλακίων ενεργειακών τεχνολογιών στην ανατολική Αφρική στο πλαίσιο επίτευξης των Στόχων Βιώσιμης Ανάπτυξης.

Πίνακας 7-5: Εύρος συνεισφοράς των τεχνολογιών στους 3 ΣΒΑ για τα πιο ευσταθή χαρτοφυλάκια (σενάριο χωρίς εφαρμογή πολιτικής γης, baseline – bl, για «χαμηλό» και «υψηλό» προϋπολογισμό)

| Σεν. | Τεχνολογία | ΣΒΑ 7 | ΣΒΑ 13 | ΣΒΑ 3 | Επιδότηση | Σεν. | ΣΒΑ 7 | ΣΒΑ 13 | ΣΒΑ 3 | Επιδότηση |
|----------------|---------------|---------------|---------------|--------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| 2020 bl Χαμηλό | LPG | 20-23% | 28-34% | 15-18% | 34-40% | 2020 bl Υψηλό | 30-31% | 43-45% | 33-35% | 49% |
| | PV | 16-21% | 7-8% | 3-4% | 8-10% | | 40-42% | 23% | 14% | 28% |
| | Biogas | 49-53% | 50-52% | 73-75% | 42% | | 24% | 23-25% | 47-48% | 14% |
| | Charcoal | 1-8% | 2% | 2% | 3% | | 1% | 5% | 2% | 4% |
| | Fuelwood | 0.02-0.2% | 0.10% | 0% | 1% | | 0% | 0.10% | 0% | 0.20% |
| | Ethanol | 3-10% | 5-14% | 2-7% | 4-13% | | 2-4% | 3-7% | 2-4% | 4% |
| 2030 bl Χαμηλό | LPG | 10-14% | 10-15% | 7-10% | 13-22% | 2030 bl Υψηλό | 28-29% | 33-36% | 29-30% | 40% |
| | PV | 18-28% | 9-13% | 5-7% | 18-23% | | 39-42% | 24-26% | 16-18% | 38% |
| | Biogas | 58-62% | 70-72% | 78-81% | 56% | | 26-30% | 33-38% | 47-52% | 17-19% |
| | Charcoal | 1% | 1% | 1-2% | 2-3% | | 1% | 1-2% | 1-2% | 1-2% |
| | Ethanol | 1-11% | 2-10% | 1-8% | 2-11% | | 1-5% | 1-6% | 1-5% | 1-4% |
| | LPG | 35-42% | 29-51% | 24-31% | 48-57% | | 2040 bl Υψηλό | 42-51% | 40-54% | 40-49% |
| PV | 7-26% | 6-20% | 3-10% | 8-21% | 27-40% | 25-33% | | 14-17% | 32% | |
| Biogas | 33-55% | 29-65% | 60-73% | 22-43% | 17-24% | 13-33% | | 37-44% | 14% | |
| Charcoal | 0.00% | 0.10% | 0% | 0% | 0% | 0.2-1% | | 0% | 0.50% | |

Πίνακας 7-6: Εύρος συνεισφοράς των τεχνολογιών στους 3 ΣΒΑ για τα πιο ευσταθή χαρτοφυλάκια (σενάριο με εφαρμογή πολιτικής γης, landpolicy – lp, για «χαμηλό» και «υψηλό» προϋπολογισμό)

| Σεν. | Τεχνολογία | ΣΒΑ 7 | ΣΒΑ 13 | ΣΒΑ 3 | Επιδότηση | Σεν. | ΣΒΑ 7 | ΣΒΑ 13 | ΣΒΑ 3 | Επιδότηση |
|----------------|------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|--------|---------------|
| 2020 lp Χαμηλό | LPG | 21-29% | 31-37% | 17-20% | 38-47% | 2020 lp Υψηλό | 28% | 41-43% | 32-33% | 46% |
| | PV | 9-23% | 3-10% | 2-5% | 3-13% | | 46-47% | 28% | 16-17% | 36% |
| | Biogas | 51-56% | 47-51% | 72-74% | 40% | | 22-23% | 22-25% | 46-48% | 13% |
| | Charcoal | 0-3% | 1-7% | 0-4% | 0-5% | | 0-1% | 1-5% | 0-3% | 0-3% |
| | Fuelwood | 0% | 0% | 0% | 1% | | 0% | 0% | 0% | 0% |
| | Ethanol | 2-4% | 4-6% | 2% | 2-5% | | 1-2% | 3-4% | 1-2% | 1-4% |
| 2030 lp Χαμηλό | LPG | 8-19% | 9-19% | 7-13% | 12-29% | 2030 lp Υψηλό | 28-37% | 33-39% | 30-36% | 42-50% |
| | PV | 13-32% | 6-15% | 3-8% | 10-28% | | 32-41% | 20-26% | 12-16% | 30-37% |
| | Biogas | 56-64% | 69-70% | 79-80% | 54% | | 28-29% | 36-38% | 49-51% | 18% |
| | Charcoal | 2-3% | 3-4% | 3-4% | 3-5% | | 1-2% | 2-3% | 2-3% | 2% |
| | Fuelwood | 0% | 0% | 0% | 0% | | 0% | 0% | 0% | 0% |
| | Ethanol | 1-2% | 1-2% | 1% | 1-2% | | 1% | 1-2% | 0-1% | 0-1% |
| 2040 lp Χαμηλό | LPG | 41-50% | 37-55% | 29-36% | 55-65% | 2040 lp Υψηλό | 40-46% | 39-46% | 38-45% | 47% |
| | PV | 0-4% | 0-3% | 0-2% | 0-3% | | 24-33% | 23-27% | 13-16% | 31% |
| | Biogas | 41-56% | 35-61% | 58-68% | 27-40% | | 20-25% | 19-31% | 36-41% | 13% |
| | Charcoal | 0-3% | 0-4% | 0-4% | 0-4% | | 0-1% | 1-2% | 0-2% | 1% |
| | Ethanol | 1-2% | 1-2% | 0-2% | 1-4% | | 5-6% | 5-6% | 4-5% | 7% |

Κεφάλαιο 7. Πρόταση ολοκληρωμένου πλαισίου ανάλυσης αβεβαιότητας υπό διαφορετικά κοινωνικοοικονομικά σενάρια για τον προσδιορισμό βέλτιστων χαρτοφυλακίων ενεργειακών τεχνολογιών στην ανατολική Αφρική στο πλαίσιο επίτευξης των Στόχων Βιώσιμης Ανάπτυξης.

Προκειμένου να προσδιοριστεί ποια από τα σενάρια μπορούν να προσομοιωθούν επιτυχώς με την προσέγγιση του «μέσου SSP», συγκρίνονται τα αποτελέσματα των πινάκων Πίνακας 7-5 και Πίνακας 7-6, τα οποία αντιστοιχούν στην ανάλυση όπου τα αποτελέσματα GCAM των διαφορετικών SSPs βελτιστοποιούνται ξεχωριστά στην πολυκριτηριακή ανάλυση χαρτοφυλακίου, με τα αποτελέσματα του πίνακα 7-7, τα οποία προκύπτουν από την βελτιστοποίηση του μοντέλου «μέσο SSP». Η σύγκριση εφαρμόζεται για το βασικό σενάριο χωρίς εφαρμογή πολιτικής γης και για το σενάριο πολιτικής γης, για τις τρεις εξεταζόμενες περιόδους από το 2020 έως το 2040, θεωρώντας το χαμηλό επίπεδο συνολικού διαθέσιμου προϋπολογισμού. Τα αποτελέσματα δείχνουν (πίνακας 7-7) ότι όλα τα σενάρια για τα έτη 2020 και 2030 μπορούν να προσομοιωθούν καλά με την προσέγγιση του «μέσου SSP». Αντίθετα, για το έτος 2040 τα αποτελέσματα για τη συνεισφορά των τεχνολογιών αποκλίνουν από τα αρχικά υπολογιζόμενες τιμές, τόσο στο βασικό σενάριο όσο και στο σενάριο της πολιτικής γης, πράγμα που σημαίνει ότι η προσέγγιση του «μέσου SSP» δεν μπορεί να εφαρμοστεί σε αυτήν την περίπτωση.

Πίνακας 7-7: Συνεισφορά των τεχνολογιών στους 3 ΣΒΑ για τα πιο ευσταθή χαρτοφυλάκια στο μέσο κοινωνικοοικονομικό σενάριο (σενάριο με και χωρίς εφαρμογή πολιτικής γης, landpolicy - lp και baseline - bl, για «χαμηλό» προϋπολογισμό)

| Σεν. | Τεχνολογία | ΣΒΑ 7 | ΣΒΑ 13 | ΣΒΑ 3 | Σεν. | ΣΒΑ 7 | ΣΒΑ 13 | ΣΒΑ 3 |
|----------------|------------|-------|--------|-------|----------------|-------|--------|-------|
| 2020 bl Χαμηλό | LPG | 23% | 33% | 18% | 2020 lp Χαμηλό | 21% | 33% | 17% |
| | PV | 20% | 8% | 4% | | 24% | 8% | 5% |
| | Biogas | 52% | 51% | 75% | | 50% | 51% | 73% |
| | Charcoal | 1% | 2% | 2% | | 1% | 2% | 4% |
| | Fuelwood | 0% | 0% | 0% | | 0% | 0% | 0% |
| | Ethanol | 3% | 5% | 2% | | 3% | 5% | 2% |
| 2030 bl Χαμηλό | LPG | 12% | 13% | 9% | 2030 lp Χαμηλό | 20% | 19% | 14% |
| | PV | 17% | 8% | 5% | | 13% | 6% | 3% |
| | Biogas | 63% | 72% | 80% | | 64% | 69% | 78% |
| | Charcoal | 1% | 1% | 2% | | 3% | 4% | 4% |
| | Fuelwood | 0% | 0% | 0% | | 0% | 0% | 0% |
| | Ethanol | 7% | 7% | 5% | | 0% | 2% | 1 |
| 2040 bl Χαμηλό | LPG | 31% | 32% | 24% | 2040 lp Χαμηλό | 37% | 37% | 29% |
| | PV | 21% | 18% | 9% | | 16% | 14% | 7% |
| | Biogas | 48% | 50% | 67% | | 47% | 49% | 63% |
| | Charcoal | 0% | 0% | 0% | | 0% | 0% | 0% |
| | Ethanol | 0% | 0% | 0% | | 0% | 0% | 0% |

7.4 Συμπεράσματα

Η παρούσα μελέτη επιτυγχάνει την ενσωμάτωση της μεθόδου AUGMECON 2 σε ένα ολοκληρωμένο μεθοδολογικό πλαίσιο που προτείνεται για την επίλυση ενός τριστοχικού προβλήματος βελτιστοποίησης υπό την εξέταση στοχαστικής και ντετερμινιστικής αβεβαιότητας. Η προτεινόμενη μεθοδολογία βασίζεται στη δυεπίπεδη σύνδεση της μεθόδου AUGMECON 2 και του MOA GCAM και δίνει στους φορείς χάραξης πολιτικής ένα ολοκληρωμένο εργαλείο για την αντιμετώπιση περιβαλλοντικών και ενεργειακών προβλημάτων, διευκολύνοντας την ανταλλαγή δεδομένων εισόδου και αποτελεσμάτων των μοντέλων. Η χρησιμότητα του εργαλείου αξιολογείται στο πλαίσιο μιας εφαρμογής με σκοπό να διερευνηθούν στρατηγικές που συνεισφέρουν ταυτόχρονα στον μετριασμό της κλιματικής αλλαγής, στην αύξηση της πρόσβασης σε καθαρή και σύγχρονης μορφής ενέργεια και στη μείωση της έκθεσης στην ατμοσφαιρική ρύπανση, μεγέθη που συμπεριλαμβάνονται στους ΣΒΑ του ΟΗΕ. Χρησιμοποιήθηκαν τα αποτελέσματα από το ολοκληρωμένο μοντέλο αποτίμησης GCAM, τα οποία δίνουν με τον βέλτιστο δυνατό τρόπο την χρήση ενεργειακών πόρων στην ανατολική Αφρική. Το μοντέλο GCAM προσομοιώνει τα αποτελέσματα της επιδότησης ενός συνόλου έξι τεχνολογιών, με βάση τις δεσμεύσεις των εξεταζόμενων χωρών για δράση, όπως αντικατοπτρίζονται στις Εθνικά Καθορισμένες Συνεισφορές τους. Τα αποτελέσματα του μοντέλου GCAM χρησιμοποιούνται από το μοντέλο πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης της AUGMECON 2 για να δώσουν ένα σύνολο βέλτιστων και ευσταθών χαρτοφυλακίων, υπό την ταυτόχρονη αξιολόγηση των τριών ΣΒΑ εξεταζόμενη για τρία διακριτά χρονικά πλαίσια από το 2020 έως και το 2040. Η βελτιστοποίηση γίνεται για ένα βασικό σενάριο, χωρίς εφαρμογή πολιτικής γης, και για ένα δεύτερο σενάριο που περιλαμβάνει την επίδραση πολιτικών γης για την αύξηση της βιώσιμης δασικής παραγωγής. Επιπλέον, το κάθε πρόβλημα βελτιστοποίησης επιλύεται υπό την θεώρηση δύο διαφορετικών επιπέδων ετήσιου διαθέσιμου προϋπολογισμού ως περιορισμούς επιδότησης, ένα χαμηλό και ένα υψηλό. Το μοντέλο επίσης χειρίζεται την αβεβαιότητα που σχετίζεται με

Κεφάλαιο 7. Πρόταση ολοκληρωμένου πλαισίου ανάλυσης αβεβαιότητας υπό διαφορετικά κοινωνικοοικονομικά σενάρια για τον προσδιορισμό βέλτιστων χαρτοφυλακίων ενεργειακών τεχνολογιών στην ανατολική Αφρική στο πλαίσιο επίτευξης των Στόχων Βιώσιμης Ανάπτυξης.

τα κοινά κοινωνικοοικονομικά μονοπάτια και προσομοιώνει ένα μέσο σενάριο προκειμένου να προταθούν λύσεις που αποδεικνύονται ευσταθείς μεταξύ των διαφορετικών SSPs. Η σύνδεση με το MOA GCAM είναι δυεπίπεδη. Το δεύτερο επίπεδο σύνδεσης μεταξύ των δύο μοντέλων επιτυγχάνεται με την επανατροφοδότηση του μοντέλου GCAM με τα αποτελέσματα της βελτιστοποίησης προκειμένου να εξεταστεί αν οι διαφορές στις επιδόσεις των τεχνολογιών μεταξύ των SSPs είναι όντως μικρότερες για χαρτοφυλάκια που προκύπτουν ως πιο ευσταθή από την ανάλυση χαρτοφυλακίου.

Η ανάλυση δείχνει ότι οι τεχνολογίες βιοαερίου θα πρέπει να επιδοτούνται κατά προτεραιότητα τόσο βραχυπρόθεσμα όσο και μακροπρόθεσμα, καθώς παρουσιάζουν πολύ υψηλή σχέση κόστους-αποτελεσματικότητας όσον αφορά την πρόοδο και στους τρεις ΣΒΑ. Εμφανίζεται ωστόσο ένα σύνολο τεχνολογιών οι οποίες μπορούν να είναι αποτελεσματικές κατά περίπτωση (όπως το υδροποιημένο αέριο πετρελαίων για τους ΣΒΑ 3 και 7, τα φωτοβολταϊκά για τον ΣΒΑ 7, η χρήση αιθανόλης για τους ΣΒΑ 3 και 13, και η χρήση γαιάνθρακα για τον ΣΒΑ 7 στην περίπτωση εφαρμογής πολιτικών γης) και προτείνεται η επιδότησή τους ανάλογα με τις προτιμήσεις που θέτουν οι υπεύθυνοι χάραξης πολιτικής ως προς την επίτευξη των τριών ΣΒΑ. Η επιδότηση της χρήσης ξυλώδους βιομάζας είναι λιγότερο αποδοτική από πλευρά κόστους ακόμα και αν συνδεθεί με πολιτικές γης προκειμένου να εξασφαλιστεί η βιώσιμη παραγωγή. Οι πολιτικές γης οδηγούν σε καλύτερη επίδοση τεχνολογιών κατά 10% όσον αφορά την αποφυγή των συνολικών εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου (ΣΒΑ 7) στην περιοχή βραχυπρόθεσμα, παράλληλα όμως προκαλούν πιο αργή πρόοδο όσον αφορά τους στόχους της καλής υγείας (ΣΒΑ 3) και της πρόσβασης σε καθαρή και σύγχρονη ενέργεια (ΣΒΑ 7). Επίσης φαίνεται πως δεν είναι απαραίτητα οικονομικά αποδοτική η επιδότηση του κόστους στροφής προς σύγχρονης μορφής ενέργειας για μεγάλο χρονικό διάστημα: Τα μέτωπα Pareto δείχνουν ότι οι τεχνολογικές λύσεις γίνονται περισσότερο δαπανηρές και επομένως λιγότερο αποτελεσματικές μακροπρόθεσμα. Σε αυτό προστίθεται και η παράμετρος της

Κεφάλαιο 7. Πρόταση ολοκληρωμένου πλαισίου ανάλυσης αβεβαιότητας υπό διαφορετικά κοινωνικοοικονομικά σενάρια για τον προσδιορισμό βέλτιστων χαρτοφυλακίων ενεργειακών τεχνολογιών στην ανατολική Αφρική στο πλαίσιο επίτευξης των Στόχων Βιώσιμης Ανάπτυξης.

αβεβαιότητας που οδηγεί σε λιγότερο ευσταθείς λύσεις στην περίπτωση της μακροχρόνιας ανάλυσης.

Παρόλο που στην περίπτωση της μοντελοποίησης οι επιδοτήσεις στις διαφορετικές τεχνολογίες θεωρούνται ότι αποφέρουν τα επιθυμητά αποτελέσματα στους τρεις ΣΒΑ, είναι κατανοητό πως κάτι τέτοιο είναι πολύ πιο δύσκολο στον πραγματικό κόσμο. Ειδικά για τις αναπτυσσόμενες χώρες της ανατολικής Αφρικής, η εκτεταμένη χρήση της παραδοσιακής βιομάζας και η διαθεσιμότητα «δωρεάν» καυσόξυλων σε συνδυασμό με τις κοινωνικές συνθήκες στις αγροτικές περιοχές, καθιστούν το «άλμα» προς τις σύγχρονες ενεργειακές τεχνολογίες λιγότερο απλή από ότι στα μοντέλα, τα οποία εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από την τεχνική και οικονομική βιωσιμότητα των τεχνολογιών (Murphy, 2001). Για παράδειγμα, στις χώρες της ανατολικής Αφρικής η μεγάλη διαθεσιμότητα βιομάζας καθιστά ευκολότερη και φθηνότερη τη συλλογή και χρήση της, κάτι που έχει ως επακόλουθο την αυξημένη εξάρτηση από τη βιομάζα σε μεταγενέστερο στάδιο. Κατά συνέπεια, ο συνδυασμός πολιτικών χρήσης γης και τεχνολογικών επιδοτήσεων πρέπει να προσαρμοστεί στο πλαίσιο κάθε χώρας και σε ορισμένες περιπτώσεις και σε επίπεδο εντός χώρας. Μια πιο λεπτομερής ανάλυση εντός των εξεταζόμενων χωρών και σε ορισμένες περιπτώσεις σε τοπικό ή περιφερειακό επίπεδο πιθανόν να καταδείξει σημαντικές διαφορές στα πρότυπα ζήτησης και προσφοράς, οι οποίες σχετίζονται με διαφορές στο εισόδημα, την ευκολία πρόσβασης στη βιομάζα και άλλους παράγοντες. Η επιτυχία των πολιτικών που επιδοτούν τις εγκαταστάσεις βιοαερίου εξαρτάται επίσης από τις τοπικές συνθήκες, όπως η διαθεσιμότητα νερού και η ιδιοκτησία ζώων. Με άλλα λόγια, οι πολιτικές και οι θεσμοί πρέπει έχουν περισσότερο τοπικό παρά εθνικό χαρακτήρα.

Μη παραβλέποντας πως η αποτύπωση των συνθηκών του πραγματικού κόσμου σε επίπεδο μοντελοποίησης δε μπορεί να γίνει με απόλυτη ακρίβεια, τα αποτελέσματα της παρούσας μελέτης καθώς και η καινοτόμος μεθοδολογία που χρησιμοποιείται, η οποία είναι ευθυγραμμισμένη με τα νέα επιστημονικά

Κεφάλαιο 7. Πρόταση ολοκληρωμένου πλαισίου ανάλυσης αβεβαιότητας υπό διαφορετικά κοινωνικοοικονομικά σενάρια για τον προσδιορισμό βέλτιστων χαρτοφυλακίων ενεργειακών τεχνολογιών στην ανατολική Αφρική στο πλαίσιο επίτευξης των Στόχων Βιώσιμης Ανάπτυξης.

πρότυπα (Doukas et al., 2018), αποδεικνύονται ιδιαιτέρως χρήσιμα για μια σειρά φορέων χάραξης πολιτικής σε τοπικό και παγκόσμιο επίπεδο, στο πλαίσιο της βιώσιμης ανάπτυξης και της χρηματοδότησης για το κλίμα..

Κεφάλαιο 8

8 Εφαρμογή βελτιωμένου αλγορίθμου πολυστοχικής βελτιστοποίησης και ολοκλήρωση με MOA για τη μεγιστοποίηση των κλιματικών και κοινωνικών ωφελειών των πακέτων ανάκαμψης από τον COVID-19

8.1 Εισαγωγή

Η πανδημία του COVID-19 έθεσε, πέραν των επιπτώσεων στη δημόσια υγεία, σημαντικές προκλήσεις σε πολλούς τομείς της ανθρώπινης κοινωνίας. Η απότομη παύση μεγάλου μέρους της οικονομικής δραστηριότητας λόγω της άμεσης πολιτικής δράσης για τον περιορισμό της εξάπλωσης του ιού, είχε ως αποτέλεσμα μια επικείμενη οικονομική ύφεση με πολλαπλές κοινωνικοοικονομικές επιπτώσεις (Nicola et al., 2020), συμπεριλαμβανομένων των επιπτώσεων στην αγορά εργασίας. Ενδεικτικά, περίπου 1,8 εκατομμύρια θέσεις εργασίας χάθηκαν στην ΕΕ μεταξύ Σεπτεμβρίου 2019 και Σεπτεμβρίου 2020 (Eurostat, 2020), ενώ οι πρώτες αντίστοιχες εκτιμήσεις για τις ΗΠΑ προβλέπουν απώλεια περίπου 20 εκατομμυρίων θέσεων εργασίας (Coibion et al., 2020), οι οποίες αναμένεται δύσκολο να ανακαμφθούν (IMF, 2021). Εστιάζοντας στον ενεργειακό τομέα, ο COVID-19 είχε ως αποτέλεσμα όχι μόνο βραχυπρόθεσμες καθυστερήσεις στην ανάπτυξη, αλλά και μόνιμες απώλειες θέσεων εργασίας λόγω της μη πραγματοποίησης προγραμματισμένων έργων κατά μήκος της παγκόσμιας

Κεφάλαιο 8. Εφαρμογή βελτιωμένου αλγορίθμου πολυστοχικής βελτιστοποίησης και ολοκλήρωση με MOA για τη μεγιστοποίηση των κλιματικών και κοινωνικών ωφελειών των πακέτων ανάκαμψης από τον COVID-19

εφοδιαστικής αλυσίδας του κλάδου ενέργειας (IEA, 2020). Συγκεκριμένα, τα έργα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας έχουν επηρεαστεί σε παγκόσμια κλίμακα, με σημαντικές επιπτώσεις στην απασχόληση. Εκπρόσωποι της επιστήμης και της πολιτικής έχουν υποστηρίξει μία πράσινη πορεία με επίκεντρο τις τεχνολογίες καθαρής ενέργειας, για την ευθυγράμμιση της οικονομικής ανάκαμψης με τις προσπάθειες μετριασμού της κλιματικής αλλαγής (Andrijevic et al., 2020; Herburn et al., 2020). Παρά το γεγονός ότι ένα σχετικά μικρό μέρος των παγκόσμιων επιδοτήσεων ανάκαμψης προσανατολίζεται σε έργα που σχετίζονται με την πράσινη ενέργεια (IEA, 2021b), εξακολουθεί να υφίσταται ένα ευρύ φάσμα χαρτοφυλακίων πράσινων τεχνολογιών που θα μπορούσαν να επωφεληθούν από αυτήν την πράσινη πορεία, συμβάλλοντας παράλληλα στην προώθηση της πράσινης μετάβασης και στην τόνωση της δημιουργίας θέσεων εργασίας στον ενεργειακό τομέα (Jaeger et al., 2021). Στα πλαίσια αυτά, η παρούσα μελέτη επιχειρεί να απαντήσει σε δύο βασικά ερωτήματα που αφορούν α) τη δυναμική και τις αντισταθμίσεις μεταξύ των δυνατοτήτων μείωσης των εκπομπών, καθώς και δημιουργίας βραχυπρόθεσμων και μακροπρόθεσμων ευκαιριών απασχόλησης, μέσω των επιδοτήσεων των πακέτων ανάκαμψης από τον COVID - 19 σε τεχνολογίες πράσινης ενέργειας και β) τον προσδιορισμό εκείνων των τεχνολογιών πράσινης ενέργειας οι οποίες μπορούν να συνεισφέρουν με βέλτιστο τρόπο στην αξιοποίηση των διαθέσιμων κονδυλίων προς την κατεύθυνση των δύο παραπάνω στόχων, δηλαδή στη μεγιστοποίηση της δημιουργίας θέσεων απασχόλησης και της μείωσης των εκπομπών.

Η υπάρχουσα βιβλιογραφία προσφέρει σαφείς ενδείξεις ότι η μετάβαση από τα ορυκτά καύσιμα στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας κατά κανόνα συμβάλλει στη δημιουργία νέων θέσεων εργασίας (Markandya et al., 2016), αφού πρώτα ληφθεί υπόψη η ανακατανομή του εργατικού δυναμικού μεταξύ των τομέων (Stoll & Mehling, 2020; Wang et al., 2020). Πρόσφατες έρευνες δείχνουν σημαντικά οφέλη στη δημιουργία θέσεων εργασίας κατά την πλήρη στροφή του τομέα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας σε αμιγώς ανανεώσιμες πηγές (Ram et al., 2020), τα οποία γίνονται ακόμα μεγαλύτερα στην περίπτωση που εξετάζονται οι κλάδοι θέρμανσης, μεταφορών και αφαλάτωσης (Ram et al., 2022), ενώ αντίστοιχες

Κεφάλαιο 8. Εφαρμογή βελτιωμένου αλγορίθμου πολυστοχικής βελτιστοποίησης και ολοκλήρωση με MOA για τη μεγιστοποίηση των κλιματικών και κοινωνικών ωφελειών των πακέτων ανάκαμψης από τον COVID-19

μελέτες πάνω στον αντίκτυπο μονοπατιών μετριασμού της κλιματικής αλλαγής δείχνουν παρόμοια αποτελέσματα για την απασχόληση στον ευρύτερο ενεργειακό τομέα (Pai et al., 2021). Ωστόσο, τα αντίστοιχα στοιχεία σχετικά με τις προσπάθειες ανάκαμψης από τον COVID-19 εξακολουθούν να είναι ελάχιστα. Σε αυτό το πλαίσιο, προκειμένου να αξιολογηθούν οι εκπομπές (Shan et al., 2021) και οι μακροοικονομικές επιπτώσεις της πανδημίας (Lahcen et al., 2020), καθώς και οι μέσο και μακροπρόθεσμες επιπτώσεις της πανδημίας στην ενεργειακή μετάβαση (Kikstra et al., 2021) και την επίτευξη των στόχων της Συμφωνίας του Παρισιού (Keramidas et al., 2021), έχουν χρησιμοποιηθεί μακροοικονομικά μοντέλα και MOA. Τα μοντελικά αποτελέσματα των εν λόγω εργασιών κατέδειξαν το χάσμα μεταξύ των δεσμεύσεων των πακέτων ανάκαμψης και των επενδυτικών αναγκών που διαμορφώνονται από τις δεσμεύσεις της Συμφωνίας του Παρισιού (Rochedo et al., 2021), καθώς και τις επιπτώσεις πιθανών πράσινων μονοπατιών (Dafnomilis et al., 2021; Pollitt et al., 2021). Ωστόσο, από αυτές τις μελέτες, μόνο μία εξέτασε τις επιπτώσεις στις θέσεις εργασίας (Pollitt et al., 2021) από μακροοικονομική οπτική και, όπως παρόμοιες μελέτες μακροοικονομικής μοντελοποίησης (D'Alessandro et al., 2020; Distelkamp & Meyer, 2019; Fragkos et al., 2018; Fujimori et al., 2020; Spijker et al., 2020), παρείχε μόνο συγκεντρωτικές πληροφορίες για ολόκληρη την οικονομία. Ο βαθμός στον οποίο οι πράσινες επενδύσεις, ως μέρος των προσπαθειών ανάκαμψης από την πανδημία, μπορούν να συμβάλουν τόσο στις προσπάθειες μετριασμού της κλιματικής αλλαγής, όσο και στη δημιουργία θέσεων απασχόλησης στον ενεργειακό τομέα, αποτελεί ένα πεδίο που δεν έχει μελετηθεί έως τώρα στην βιβλιογραφία και αποτελεί καινοτομία της παρούσας διατριβής.

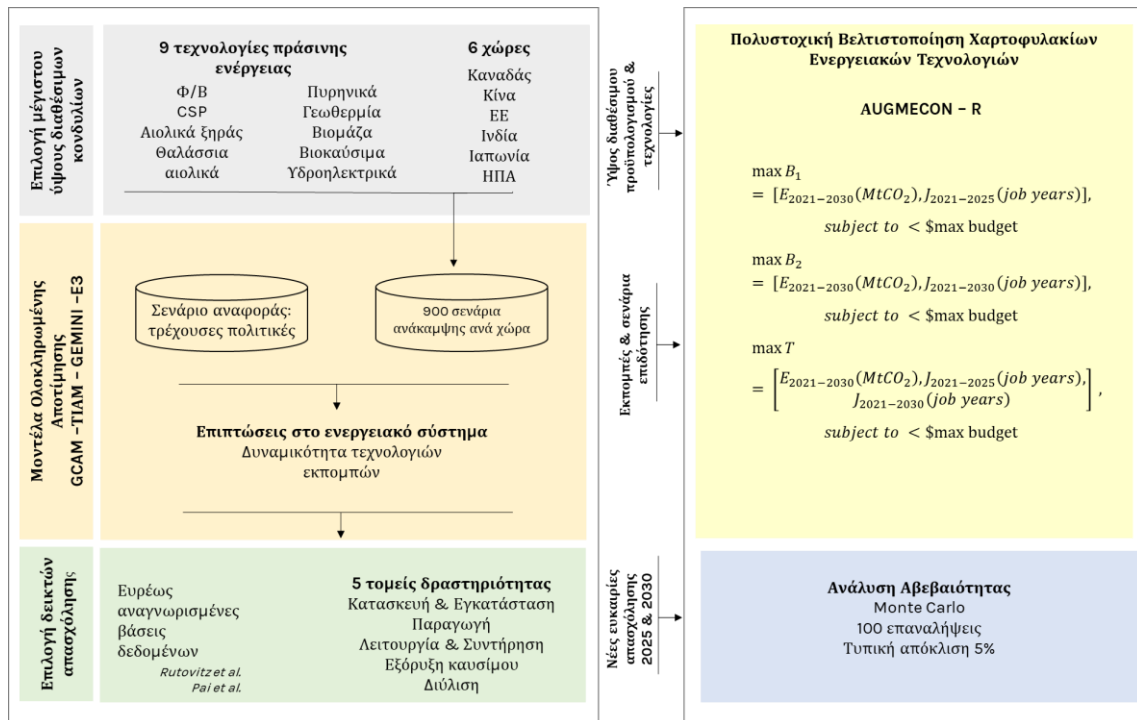
Συγκεκριμένα, σε επίπεδο πολιτικής, η συνεισφορά της παρούσας μελέτης αφορά τη διερεύνηση της βέλτιστης κατανομής των ανακοινωθέντων από τις κυβερνήσεις πακέτων ανάκαμψης σε έργα πράσινης ενέργειας, με τη βελτιστοποίηση να αφορά δείκτες σχετικούς με την περαιτέρω μείωση των εκπομπών και την αύξηση των θέσεων απασχόλησης, σε σχέση με τα δεδομένα ενός βασικού σεναρίου (Sognnaes et al., 2021) που έχει δημιουργηθεί πριν την εκδήλωση της πανδημίας. Η μελέτη εφαρμόζεται σε έξι μεγάλες οικονομίες που

Κεφάλαιο 8. Εφαρμογή βελτιωμένου αλγορίθμου πολυστοχικής βελτιστοποίησης και ολοκλήρωση με MOA για τη μεγιστοποίηση των κλιματικών και κοινωνικών ωφελειών των πακέτων ανάκαμψης από τον COVID-19

αποτελούν και τους βασικούς παραγωγούς αερίων του θερμοκηπίου, τον Καναδά, την Κίνα, την ΕΕ, την Ινδία, την Ιαπωνία και τις ΗΠΑ, διευρύνοντας το πεδίο εφαρμογής των προτεινόμενων στα πλαίσια της παρούσας διατριβής μεθοδολογιών, σε παγκόσμιο επίπεδο. Σε μεθοδολογικό πλαίσιο, το σύνολο των καινοτομιών της παρούσας ανάλυσης εκτείνεται σε τρία επίπεδα. Αρχικά, αναγνωρίζοντας πως οι αναλύσεις που δίνουν τα διαφορετικά MOA εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από το μοντέλο που χρησιμοποιείται και την υποκείμενη οικονομική προσέγγιση και παρέμβαση του εκάστοτε μηχανικού που τα κατασκευάζει (García-García et al., 2020; Zerrahn, 2017), χρησιμοποιείται ένα σύνολο τριών καθιερωμένων MOA, τα GCAM, TIAM, GEMINI-E3, προκειμένου να διερευνηθεί πώς κάθε προσέγγιση μοντελοποίησης επηρεάζει τα αποτελέσματα του μοντέλου, αυξάνοντας την ευρωστία των αποτελεσμάτων της ανάλυσης. Σε δεύτερο επίπεδο, αντλώντας από πρόσφατες εργασίες (Fragkos & Paroussos, 2018; Malik et al., 2021), υλοποιείται η σύνδεση των τριών MOA με βάσεις δεδομένων για τους συντελεστές απασχόλησης, οι οποίες παρέχουν αναλυτικά δεδομένα ανά κατηγορία τεχνολογικών παρεμβάσεων (Patrizio et al., 2018), προκειμένου να αντιμετωπιστούν οι επικρίσεις που συχνά δέχονται τα MOA σχετικά με τη συνθετότητα στη μοντελική αναπαράσταση των αλληλεπιδράσεων κλίματος-οικονομίας (Kerppö et al., 2021) και την αναπαράσταση δεδομένων σχετικά με την εργασία (Ciarli & Savona, 2019). Τρίτον, δεδομένου ότι τα MOA συνήθως βελτιστοποιούν μόνο το κόστος ως προς τους περιορισμούς εκπομπών, η παρούσα ανάλυση προτείνει την ενοποίηση των MOA με μοντέλα πολυστοχικής βελτιστοποίησης ανάλυσης χαρτοφυλακίου (Forouli et al., 2020), προκειμένου να επιτευχθεί η οικονομική συσχέτιση και η ταυτόχρονη βελτιστοποίηση του στόχου μείωσης των εκπομπών με ενδεχόμενη βραχυπρόθεσμη και μακροπρόθεσμη αύξηση των θέσεων εργασίας. Σε αυτό το επίπεδο η ανάλυση του Κεφαλαίου 7 επεκτείνεται, προκειμένου να διερευνηθεί η δυνατότητα σύνδεσης του προτεινόμενου μοντέλου πολυστοχικής βελτιστοποίησης με διαφορετικά MOA (TIAM, GEMINI-E3), πέραν του GCAM. Συνολικά, αναπτύσσεται μια ολοκληρωμένη μεθοδολογία η οποία αποτελείται από πέντε επιμέρους στάδια. Αρχικά αξιολογούνται τα πακέτα ανάκαμψης των προς εξέταση χωρών, και

Κεφάλαιο 8. Εφαρμογή βελτιωμένου αλγορίθμου πολυστοχικής βελτιστοποίησης και ολοκλήρωση με MOA για τη μεγιστοποίηση των κλιματικών και κοινωνικών ωφελειών των πακέτων ανάκαμψης από τον COVID-19

εκτιμώνται τα ποσά επιχορηγήσεων που κατευθύνονται προς επενδύσεις πράσινων τεχνολογιών ενέργειας. Στη συνέχεια χρησιμοποιούνται τα MOA για τον υπολογισμό των επιπτώσεων διαφορετικών επιπέδων επιδότησης στο ενεργειακό σύστημα για κάθε μία από τις εξεταζόμενες τεχνολογίες. Η επίδραση στο ενεργειακό σύστημα μεταφράζεται σε επιπτώσεις στις εκπομπές και στις θέσεις εργασίας σε ολόκληρο τον ενεργειακό τομέα, χρησιμοποιώντας ευρέως αναγνωρισμένες βάσεις δεδομένων για την εκτίμηση των δεικτών απασχόλησης. Στη συνέχεια χρησιμοποιείται ο βελτιωμένος αλγόριθμος πολυστοχικής βελτιστοποίησης AUGMECON -R, τα πλεονεκτήματα του οποίου γίνονται ιδιαίτερα εμφανή στην παρούσα εφαρμογή λόγω του μεγάλου μεγέθους του προβλήματος και των απαιτήσεων για επαναληπτική επίλυση του επόμενου βήματος. Σε αυτό, το μοντέλο επιλύεται επαναληπτικά χρησιμοποιώντας την προσομοίωση Monte Carlo σε μια προσπάθεια διαχείρισης της αβεβαιότητας των προκύπτοντων βέλτιστων επενδυτικών χαρτοφυλακίων ως προς τις υπολογισμένες επιπτώσεις στις εκπομπές και την απασχόληση και την παραγωγή εύρωστων αποτελεσμάτων. Μια επισκόπηση της προτεινόμενης μεθοδολογίας δίνεται στο Σχήμα 8-1 και αναλύεται με λεπτομέρεια στην επόμενη ενότητα.



Σχήμα 8-1: Επισκόπηση προτεινόμενης μεθοδολογίας

8.2 Μέθοδοι και Μοντέλα

Η εκάστοτε πολιτική για την οικονομική υποστήριξη των τεχνολογιών πράσινης ενέργειας μπορεί να επηρεάσει ποικιλόμορφα και σε διαφορετικό βαθμό τους στόχους μείωσης εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου και τη δημιουργία θέσεων εργασίας στον ενεργειακό τομέα. Από την φύση τους, οι τεχνολογίες πράσινης ενέργειας είναι συνήθως μεγαλύτερης έντασης εργασίας (Pai et al., 2021; Rutovitz et al., 2015) και εξ ορισμού μικρότερης έντασης άνθρακα σε σύγκριση με τις συμβατικές πηγές ενέργειας, και επομένως η υποστήριξη αυτών των τεχνολογιών τείνει να δημιουργεί ταυτόχρονα πρόσθετες θέσεις εργασίας και να οδηγεί σε λιγότερες εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου. Ωστόσο, αυτό το χαρακτηριστικό δεν καθιστά εξ ορισμού την επιδότηση των πράσινων τεχνολογιών ενέργειας ως ένα οικονομικά αποδοτικό μέσο πολιτικής, όπως και ενδεχομένως να μην έχει την ίδια αξία η χρηματοδότηση μεταξύ των διαφορετικών τεχνολογιών καθαρής ενέργειας.

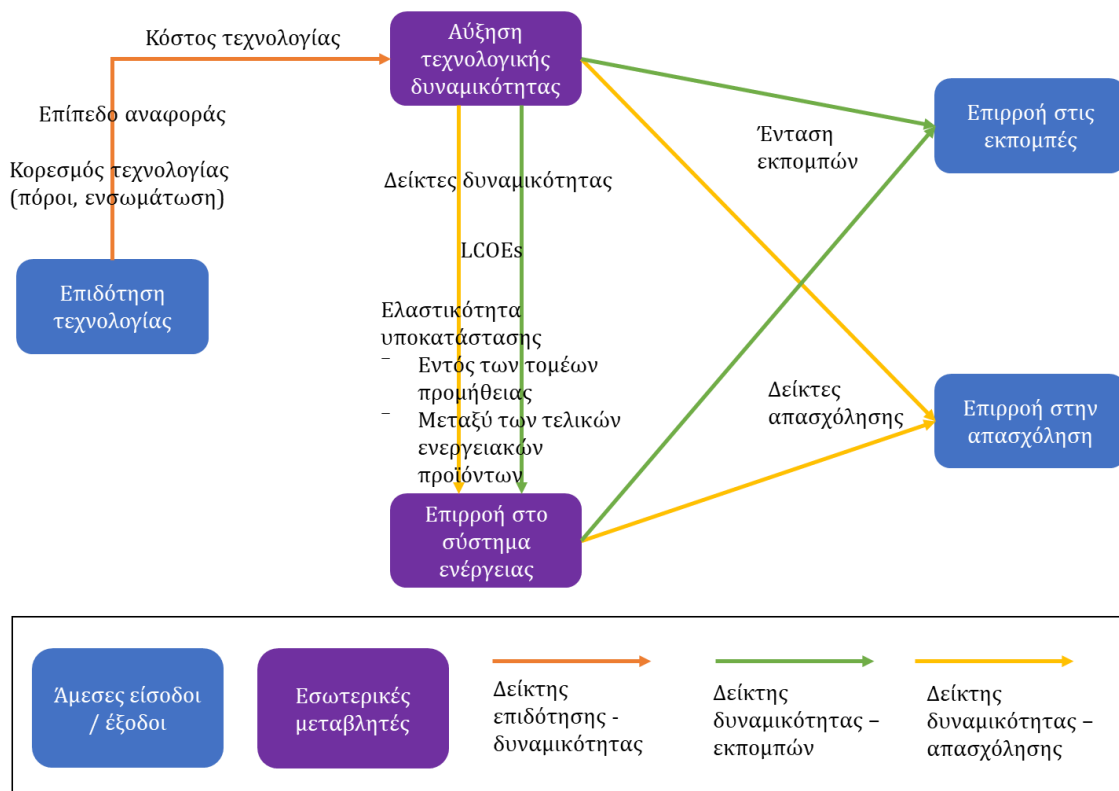
Η αποτελεσματικότητα της εκάστοτε χρηματοδότησης εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την τεχνολογία την οποία αυτή αφορά και την περιοχή στην οποία εφαρμόζεται, λόγω ενός συνδυασμού παραγόντων που την επηρεάζουν, όπως η σχέση κόστους-αποτελεσματικότητας κάθε τεχνολογίας, η επιρροή στο συνολικό ενεργειακό μείγμα και οι σχετικές διαφορές στους παράγοντες των εκπομπών και των θέσεων απασχόλησης μεταξύ της χρηματοδοτούμενης τεχνολογίας και των εναλλακτικών που αυτή αντικαθιστά. Επιπλέον, ένας σημαντικός παράγοντας είναι και η εξεταζόμενη γεωγραφική περιοχή. Ένα τυπικό παράδειγμα αναποτελεσματικής χρηματοδότησης είναι η παροχή στήριξης για νέες επενδύσεις, οι οποίες όμως θα είχαν πραγματοποιηθεί ακόμα και ελλείψει χρηματοδότησης (Wirf, 2000). Δεδομένου ότι οι ρυθμιστικές αρχές δεν μπορούν να διακρίνουν μεταξύ της χρηματοδότησης επενδύσεων που έρχονται ως πρόσθετες στις ούτως ή άλλως προγραμματισμένες από τους επενδυτές, και σε εκείνες που θεωρούνται ως προγραμματισμένες, είναι γεγονός πως μεγάλα ποσά χρηματοδότησης καταλήγουν ως κέρδος σε επενδυτές οι οποίοι ούτως ή άλλως επρόκειτο να επενδύσουν στη συγκεκριμένη τεχνολογία. Ενδέχεται επίσης να υπάρχουν και πρόσθετοι, φυσικοί περιορισμοί της αποτελεσματικότητας των

Κεφάλαιο 8. Εφαρμογή βελτιωμένου αλγορίθμου πολυστοχικής βελτιστοποίησης και ολοκλήρωση με ΜΟΑ για τη μεγιστοποίηση των κλιματικών και κοινωνικών ωφελειών των πακέτων ανάκαμψης από τον COVID-19

επιδοτήσεων, όπως η διακοψιμότητα των τεχνολογιών ανανεώσιμων πηγών ενέργειας ή η διαθεσιμότητα των πόρων βιοενέργειας. Σε τέτοιες περιπτώσεις, η πλεονάζουσα παραγωγική ικανότητα που προκύπτει από την οικονομική στήριξη των αρχών μπορεί να παραμείνει αναξιοποίητη ή αρκετά περιορισμένη (Xia et al., 2020). Ακόμα, κάποια τεχνολογία μπορεί να αποδειχθεί ανεπαρκής ανάλογα με το χρονικό πλαίσιο της ανάλυσης. Για παράδειγμα κάτι τέτοιο ισχύει στην περίπτωση που η βραχυπρόθεσμη επιδότηση μιας τεχνολογίας ωθεί στον κορεσμό της δυναμικότητάς της, κάτι που θα συνέβαινε εκ των πραγμάτων σε μεταγενέστερο στάδιο. Στο εξεταζόμενο παράδειγμα, η επιδότηση θα είχε μόνο βραχυπρόθεσμα οφέλη, καθώς στην ουσία περιορίζει τις δυνατότητες επένδυσης στην επόμενη περίοδο. Με αυτό τον τρόπο, η επιδότηση απλά ωθεί στην πραγματοποίηση επενδύσεων που θα πραγματοποιούνταν ούτως ή άλλως εντός ενός συγκεκριμένου χρονικού πλαισίου, σε ένα πιο στενό χρονικό πλαίσιο, αυξάνοντας απλά τις δυνατότητες της τεχνολογίας σε βραχυχρόνιο ορίζοντα.

Λόγω της πληθώρας παραγόντων που επηρεάζουν τον τρόπο με τον οποίο η εκάστοτε τεχνολογική επιδότηση συνεισφέρει στη μείωση των εκπομπών και τη βελτίωση των δεικτών απασχόλησης (Σχήμα 8-2), τα ΜΟΑ μέσω της δυνατότητας λεπτομερούς αναπαράστασης των ενεργειακών συστημάτων που προσφέρουν, αποτελούν χρήσιμα εργαλεία για τον προσδιορισμό βέλτιστων τεχνολογικών χαρτοφυλακίων υπό δεδομένα προγράμματα επιδοτήσεων.

Κεφάλαιο 8. Εφαρμογή βελτιωμένου αλγορίθμου πολυστοχικής βελτιστοποίησης και ολοκλήρωση με MOA για τη μεγιστοποίηση των κλιματικών και κοινωνικών ωφελειών των πακέτων ανάκαμψης από τον COVID-19



Σχήμα 8-2: Σχηματική επισκόπηση του τρόπου με τον οποίο οι τεχνολογικές επιδοτήσεις επηρεάζουν τις εκπομπές και την απασχόληση

Προς αυτόν τον σκοπό, η παρούσα μελέτη εφαρμόζει σταδιακά αυξανόμενα ποσοστά επιδότησης επί εννιά πράσινων τεχνολογιών, τα οποία εφαρμόζονται ως πρόσθετα σε ειδικά διαμορφωμένες για κάθε περιοχή πολιτικές για την ενέργεια και το κλίμα, όπως αυτές διαμορφώθηκαν πριν την πανδημία (Sognnaes et al., 2021), και υπολογίζει την αποτελεσματικότητά τους στη μείωση των εκπομπών και την αύξηση της απασχόλησης, χρησιμοποιώντας τρία MOA που διαφέρουν σημαντικά ως προς τους μηχανισμούς επίλυσης. Στη συνέχεια, εφαρμόζεται μια εύρωστη ανάλυση χαρτοφυλακίου για κάθε συνδυασμό γεωγραφικής περιοχής -MOA για να προσδιοριστεί το σύνολο των τεχνολογικών χαρτοφυλακίων που ανήκουν στο μέτωπο Pareto, βελτιστοποιώντας τη μείωση των εκπομπών και τη δημιουργία θέσεων εργασίας εντός ενός προαναγγελθέντος προϋπολογισμού προς την πράσινη ανάκαμψη από τον COVID-19, ο οποίος διαφέρει για κάθε γεωγραφική περιοχή. Η δημιουργία του μετώπου Pareto στοχεύει στον εντοπισμό των αντισταθμίσεων μεταξύ της μείωσης των εκπομπών CO₂ σωρευτικά για την επόμενη δεκαετία, του αριθμού των

Κεφάλαιο 8. Εφαρμογή βελτιωμένου αλγορίθμου πολυστοχικής βελτιστοποίησης και ολοκλήρωση με ΜΟΑ για τη μεγιστοποίηση των κλιματικών και κοινωνικών ωφελειών των πακέτων ανάκαμψης από τον COVID-19

«εργατοετών» (job-years) που δημιουργούνται κατά τη διάρκεια ολόκληρης της δεκαετίας (2021-2030) και του αριθμού των «εργατοετών» που δημιουργούνται βραχυπρόθεσμα (έως το 2025). Οι δύο πρώτοι στόχοι μπορούν να θεωρηθούν ως οι πρωταρχικές παράμετροι που καλούνται να αξιολογήσουν οι υπεύθυνοι χάραξης πολιτικής για σχετικές με τα πακέτα οικονομικής ανάκαμψης αποφάσεις. Ο τελευταίος στόχος επιλέχθηκε λόγω της συνάφειάς του με την άμεση ανάγκη για ανάκαμψη από την κρίση του COVID-19 και τον μόνιμο στόχο των υπευθύνων χάραξης πολιτικής για άμεσες αποδόσεις των δαπανών τους. Λεπτομέρειες σχετικά με τα εφαρμοζόμενα ΜΟΑ, τα πακέτα ανάκαμψης και την εφαρμοζόμενη μεθοδολογία δίνονται στα επόμενα.

8.2.1 Περιγραφή ΜΟΑ και ορισμός σεναρίου αναφοράς

Τα GCAM και TIAM είναι μοντέλα μερικής ισορροπίας που επιτυγχάνουν ισορροπία μεταξύ προσφοράς και ζήτησης ενέργειας για κάθε τομέα, λαμβάνοντας υπόψη τις αλλαγές στις τιμές της ενέργειας που προκύπτουν από αλλαγές στα καύσιμα και τις τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται για την ικανοποίηση των απαιτήσεων ενεργειακών υπηρεσιών σε αυτούς τους τομείς. Το GCAM λειτουργεί σε μια «επαναλαμβανόμενη – δυναμική» βάση βελτιστοποίησης κόστους, πράγμα που σημαίνει ότι επιλύει την άσκηση ελαχιστοποίησης του κόστους του ενεργειακού συστήματος για μια δεδομένη, διακριτή, περίοδο, και στη συνέχεια μεταβαίνει στην επόμενη χρονική περίοδο και εκτελέσει την ίδια άσκηση. Το TIAM, από την άλλη πλευρά, λειτουργεί σε μια βάση βελτιστοποίησης κόστους «ισχυρής προνοητικότητας», σύμφωνα με την οποία λαμβάνονται υπόψη όλες οι συνέπειες της ανάπτυξης των τεχνολογιών, της εξόρυξης καυσίμου και των μεταβολών των τιμών ενέργειας σε ολόκληρο τον χρονικό ορίζοντα κατά την ελαχιστοποίηση του κόστους του ενεργειακού συστήματος, δίνοντας έτσι αποτελέσματα για τις ανάγκες ενεργειακών υπηρεσιών υπό την επιβολή καθορισμένων περιορισμών εκπομπών.

Το GEMINI-E3 είναι ένα υπολογιστικό μοντέλο γενικής ισορροπίας (CGE) το οποίο προσφέρει μια λεπτομερή αναπαράσταση πολλαπλών τομέων της οικονομίας και εξετάζει τον τρόπο με τον οποίο οι επιπτώσεις συγκεκριμένων πολιτικών

Κεφάλαιο 8. Εφαρμογή βελτιωμένου αλγορίθμου πολυστοχικής βελτιστοποίησης και ολοκλήρωση με MOA για τη μεγιστοποίηση των κλιματικών και κοινωνικών ωφελειών των πακέτων ανάκαμψης από τον COVID-19

κατανέμονται σε οικονομικούς τομείς και περιοχές, καθώς και πώς αυτές επηρεάζουν τις περιβαλλοντικές παραμέτρους. Η λειτουργία του μοντέλου είναι παρόμοια με αυτή των GCAM και TIAM, αλλά διαφέρει στο ότι η ισορροπία της αγοράς θεωρείται ότι λαμβάνει χώρα ταυτόχρονα για κάθε αγορά/περιοχή. Το GEMINI-E3 προσφέρει πλουσιότερη αναπαράσταση της οικονομίας, η οποία ωστόσο απαιτεί προσαρμογή δεδομένων σχετικά με εθνικές και διεθνείς πληροφορίες κοινωνικής λογιστικής, καθώς και εισαγωγή δεδομένων με τη μορφή ελαστικότητας υποκατάστασης.

Για την εφαρμογή και εκτέλεση των πολλαπλών σεναρίων επιδότησης για τις διαφορετικές τεχνολογίες, ορίζεται ένα επίπεδο αναφοράς με το οποίο συγκρίνεται το κάθε σενάριο επιδότησης προκειμένου να ποσοτικοποιηθεί η επιρροή του. Το επιλεγμένο σενάριο αναφοράς, το οποίο στο εξής θα αναφέρεται και ως σενάριο «τρεχουσών πολιτικών», αντιπροσωπεύει την πορεία της κάθε γεωγραφικής περιοχής θεωρώντας δεδομένη την εφαρμογή των πολιτικών για το κλίμα, όπως αυτές είχαν διαμορφωθεί πριν ανακοινωθούν τα πακέτα ανάκαμψης από τον COVID-19. Στην προκειμένη ως σενάριο «τρεχουσών πολιτικών» επιλέχθηκε το σενάριο που προτείνουν οι Sognnaes et al., (2021) το οποίο για την ΕΕ περιγράφεται περαιτέρω από τους Nikas et al, (2021). Ο τρόπος με τον οποίο υλοποιούνται τα συγκεκριμένα σενάρια στην παρούσα διατριβή διασφαλίζει την αποφυγή του «ανταγωνισμού» μεταξύ των υφιστάμενων πολιτικών και των νέων τεχνολογικών επιδοτήσεων (π.χ. με τη μορφή επιδοτήσεων που μειώνουν το κόστος για την επίτευξη των τρεχουσών πολιτικών), που θα μπορούσε ενδεχομένως να αλλάξει την πορεία που σηματοδοτούν οι ήδη ισχύουσες πολιτικές. Αυτό σημαίνει πως η επιρροή των τρεχουσών πολιτικών θεωρείται σταθερή και δεδομένη, και δεν επηρεάζεται από τις νέες επιδοτήσεις, έτσι ώστε οι ενεργειακές πολιτικές που ορίζουν οι νέες επιδοτήσεις να έρχονται ως προσθήκη σε ό,τι έχει ήδη επιτευχθεί με τις «τρέχουσες πολιτικές». Ο τρόπος με τον οποίο υλοποιείται αυτή η σταθερή θεώρηση είναι διαφορετικός για κάθε μοντέλο. Για παράδειγμα, με βάση τα αποτελέσματα του σεναρίου των «τρεχουσών πολιτικών», οι έμμεσες επιδοτήσεις (π.χ. το σύστημα των εγγυημένων σταθερών τιμών, ή αλλιώς feed in

Κεφάλαιο 8. Εφαρμογή βελτιωμένου αλγορίθμου πολυστοχικής βελτιστοποίησης και ολοκλήρωση με MOA για τη μεγιστοποίηση των κλιματικών και κοινωνικών ωφελειών των πακέτων ανάκαμψης από τον COVID-19

tariffs για την προώθηση των ΑΠΕ) ή φόροι, όπως π.χ. οι τιμές στο σύστημα εμπορίας εκπομπών - EU ETS) εφαρμόζονται ως σταθερές και διαμορφώνουν μια νέα βάση, έτσι ώστε το αποτέλεσμα να είναι ακριβώς ίδιο με το σενάριο «τρεχουσών πολιτικών», και θεωρείται ότι πλέον δεν εξαρτώνται από τις αλλαγές στο κόστος των ενεργειακών τεχνολογιών έως το 2030. Αυτές οι τροποποιήσεις αφορούν μόνο τις πολιτικές που εφαρμόζονται στις εξεταζόμενες περιοχές (Καναδάς, Κίνα, ΕΕ, Ινδία, Ιαπωνία και ΗΠΑ). Επισημαίνεται εδώ πως για το μοντέλο GEMINI-E3 μοντελοποιήθηκαν όλες οι χώρες εκτός του Καναδά και της Ιαπωνίας, καθώς το μοντέλο δεν υποστηρίζει την αναπαράστασή τους.

Στη συνέχεια, επί του βασικού σεναρίου των «τρεχουσών πολιτικών» εφαρμόζονται τα σενάρια επιδοτήσεων τα οποία διαφέρουν για κάθε τεχνολογία και γεωγραφική περιοχή. Αρχικά, καθορίζεται ένα επίπεδο «μέγιστης επιδότησης», κατά το οποίο θεωρείται ότι το σύνολο του προϋπολογισμού κάθε χώρας δαπανάται σε μια συγκεκριμένη τεχνολογία και στη συνέχεια πραγματοποιούνται πενήντα τρεξίματα για σταδιακά αυξανόμενα επίπεδα επιδότησης (1%, 2%, ..., 100% επί της τιμής της «μέγιστης επιδότησης») για την κάθε τεχνολογία. Σε πολλές περιπτώσεις, το τρέξιμο που αντιστοιχεί στο 100% της επιδότησης μπορεί να μην απορροφήσει ολόκληρο τον προϋπολογισμό — για παράδειγμα εάν μια συγκεκριμένη τεχνολογία δεν χρησιμοποιείται επαρκώς, ακόμη και αν επιδοτείται πλήρως (λόγω, για παράδειγμα, υψηλού κόστους πέραν του κόστους κεφαλαίου). Επίσης είναι άξιο να σημειωθεί ότι για τις εξεταζόμενες τεχνολογίες που αποτελούνται από περισσότερες επιμέρους τεχνολογίες (όπως μεγάλης κλίμακας φωτοβολταϊκά συστήματα και φωτοβολταϊκά στέγης στην περίπτωση των GCAM και TIAM), τα επίπεδα επιδότησης υπολογίστηκαν χρησιμοποιώντας την επιμέρους τεχνολογία με το χαμηλότερο κόστος και το υπολογισθέν επίπεδο επιδότησης εφαρμόστηκε στη συνέχεια σε όλες τις επιμέρους τεχνολογίες.

Λαμβάνοντας υπόψη τον χρόνο κατασκευής που απαιτούν οι διαφορετικές τεχνολογίες, το προτεινόμενο μοντέλο συνυπολογίζει την ενδεχόμενη καθυστέρηση μεταξύ του χρόνου έναρξης κατασκευής των έργων και της στιγμής που αυτά γίνονται διαθέσιμα προς σύνδεση στο δίκτυο. Αυτό σημαίνει ότι, ακόμη

Κεφάλαιο 8. Εφαρμογή βελτιωμένου αλγορίθμου πολυστοχικής βελτιστοποίησης και ολοκλήρωση με ΜΟΑ για τη μεγιστοποίηση των κλιματικών και κοινωνικών ωφελειών των πακέτων ανάκαμψης από τον COVID-19

και αν όλες οι επιδοτήσεις θεωρηθεί ότι δαπανούνται εντός της περιόδου 2021-2025, ενδέχεται να μην εισέλθουν στο ενεργειακό μείγμα μέχρι την επόμενη περίοδο (2026-2030). Με βάση αυτή τη θεώρηση ως προς την καθυστέρηση κατασκευής, ο Πίνακας 8-1 δείχνει για κάθε τεχνολογία τα κατά προσέγγιση προ-υπολογισμένα ποσοστά των επιδοτούμενων έργων που είναι λειτουργικά στα πλαίσια του δικτύου για κάθε μία από τις περιόδους 2021-2025 και 2026-2030.

Πίνακας 8-1: Τεχνολογίες και ποσοστά επιδοτούμενων έργων συνδεδεμένων στο δίκτυο για έναρξη κατασκευής την περίοδο 2021 - 2025

| Τεχνολογία | Τομέας | Ποσοστό επιδοτούμενων έργων συνδεδεμένων στο δίκτυο | | ΜΟΑ όπου η τεχνολογία επιδοτείται |
|----------------------------|-------------------------------|---|-----------|-----------------------------------|
| | | 2021-2025 | 2026-2030 | |
| Βιομάζα | Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας | 60% | 40% | GCAM, TIAM, GEMINI-E3 |
| Υδροηλεκτρική ενέργεια | Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας | 0% | 100% | TIAM |
| Πυρηνικά | Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας | 0% | 100% | GCAM, TIAM |
| Φωτοβολταϊκά (PV) | Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας | 80% | 20% | GCAM, TIAM, GEMINI-E3 |
| Ηλιοθερμική ενέργεια (CSP) | Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας | 60% | 40% | GCAM, TIAM |
| Γεωθερμία | Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας | 60% | 40% | GCAM, TIAM |
| Θαλάσσια αιολικά πάρκα | Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας | 60% | 40% | GCAM, TIAM, GEMINI-E3 |
| Υπεράκτια αιολικά πάρκα | Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας | 20% | 80% | GCAM, TIAM |
| Βιοκαύσιμα | Δυναμικότητα δύλισης | 60% | 40% | GCAM |

8.2.2 Επιλεγμένα μέγιστα επίπεδα επιδότησης

Για την αντιμετώπιση της τρέχουσας οικονομικής κρίσης που προκλήθηκε από την πανδημία του Covid-19, η Ευρωπαϊκή Επιτροπή παρουσίασε στις 21 Ιουλίου 2020 μία νέα πρωτοβουλία η οποία θα ενισχύσει την πορεία ανάκαμψης των κρατών-μελών της Ευρωπαϊκής Ένωσης, το NextGenerationEU. Κύριος στόχος

Κεφάλαιο 8. Εφαρμογή βελτιωμένου αλγορίθμου πολυστοχικής βελτιστοποίησης και ολοκλήρωση με ΜΟΑ για τη μεγιστοποίηση των κλιματικών και κοινωνικών ωφελειών των πακέτων ανάκαμψης από τον COVID-19

του ταμείου είναι η χρηματοδότηση μεταρρυθμιστικών και επενδυτικών προγραμμάτων στις χώρες που πλήττονται περισσότερο, με απώτερο σκοπό μια πιο βιώσιμη και ανθεκτική Ευρώπη. Το NextGenerationEU αποτελεί μέρος του πολυετούς προϋπολογισμού της Ευρωπαϊκής Ένωσης για την περίοδο 2021-2027. Στο επίκεντρο του NextGenerationEU βρίσκεται ο Μηχανισμός Ανάκαμψης και Ανθεκτικότητας (Recovery and Resilience Facility - RRF), ο οποίος προβλέπει τη διάθεση δανείων και επιχορηγήσεων ύψους € 360,0 δις. και € 312,5 δις. αντιστοίχως. Λαμβάνοντας υπόψη (i) τα 75 δισεκατομμύρια ευρώ του Μηχανισμού Ανάκαμψης και Ανθεκτικότητας που αντιστοιχούν στον πυλώνα πράσινης μετάβασης, και αναμένεται να διοχετευθούν σε έργα πράσινης ενέργειας για τις επιλεγμένες τεχνολογίες, εξαιρουμένων των σχετικών επενδύσεων σε υποδομές (π.χ. αποθήκευσης) (ΕΥ, 2020), και προσθέτοντας σε αυτά (ii) τα 5 δισεκατομμύρια ευρώ που προβλέπει το δημοσιονομικό σχέδιο της Μεγάλης Βρετανίας (HM Government, 2020), επιλέχθηκε μέγιστος προϋπολογισμός για την περιοχή της Ευρώπης τα 80 δισεκατομμύρια (96 δισεκατομμύρια σε δολάρια ΗΠΑ - USD). Παράλληλα, η Κίνα ανακοίνωσε ένα σημαντικό πακέτο ανάκαμψης περίπου 740 δισεκατομμυρίων δολαρίων, από τα οποία περίπου 200 δισεκατομμύρια δολάρια αφορούν ομόλογα που θα εκδοθούν από τις τοπικές κυβερνήσεις για έργα υποδομών. Δεδομένης της έλλειψης κατευθυντήριων γραμμών της κεντρικής κυβέρνησης σχετικά με τους τύπους έργων που πρέπει να έχουν προτεραιότητα για επενδύσεις, αφήνονται ανοιχτά περιθώρια για ροή του προϋπολογισμού προς έργα συμβατικής ενέργειας, και το μέρος του προϋπολογισμού για υποδομές σχετικές με τις τεχνολογίες που μελετά η παρούσα ανάλυση μπορεί μόνο να υπολογιστεί κατ' εκτίμηση (Gosens & Jotzo, 2020). Προς αυτή την κατεύθυνση, και κατ' αντιστοιχία με τη θεώρηση για την ΕΕ, θεωρήθηκε το 30% των 200 δις. ως ρεαλιστικό ποσοστό να διοχετευτεί σε πράσινες τεχνολογίες, διαμορφώνοντας το ύψος του διαθέσιμου για πράσινες επενδύσεις προϋπολογισμού σε 60 δισεκατομμύρια δολάρια. Στις Ηνωμένες Πολιτείες έχουν ανακοινωθεί τρία δημοσιονομικά πακέτα ανάκαμψης, από τα οποία μόνο το δεύτερο περιλαμβάνει ένα ποσό σαφώς προσανατολισμένο για επενδύσεις που σχετίζονται με τις τεχνολογίες που αναλύονται στην παρούσα

Κεφάλαιο 8. Εφαρμογή βελτιωμένου αλγορίθμου πολυστοχικής βελτιστοποίησης και ολοκλήρωση με MOA για τη μεγιστοποίηση των κλιματικών και κοινωνικών ωφελειών των πακέτων ανάκαμψης από τον COVID-19

μελέτη, και ισούται με 26 δισεκατομμύρια δολάρια ΗΠΑ (The New York Times, 2020). Το παραπάνω ποσό δεν περιλαμβάνει τις πρόσφατες δεσμεύσεις της κυβέρνησης Μπάιντεν, οι οποίες είναι ακόμη υπό διαμόρφωση και, επομένως, παραλείπονται από την ανάλυση. Από την άλλη πλευρά, η Ινδία αν και ανακοίνωσε ένα πακέτο ανάκαμψης σχεδόν 400 δισεκατομμυρίων δολαρίων, μόνο 9 δισεκατομμύρια δολάρια από αυτά υπολογίζεται να διατεθούν στον τομέα της ενέργειας (Observer Research Foundation, 2021). Αν και το μεγαλύτερο μέρος αυτού του ποσού αναμένεται να επενδυθεί σε συμβατικές τεχνολογίες άνθρακα, επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθεί στο σύνολό του σε μια ανάλυση πιθανοτήτων «what – if», προς τη διερεύνηση τρόπων βέλτιστης κατανομής για τη στήριξη τεχνολογιών πράσινης ενέργειας. Τέλος, ο Καναδάς και η Ιαπωνία έχουν δεσμευτεί για τη διάθεση 17,6 (Government of Canada, 2021) και 19,2 δισεκατομμυρίων δολαρίων (IISD, 2020) από τα αντίστοιχα πακέτα ανάκαμψης του COVID-19 με σκοπό τη στήριξη της πράσινης μετάβασης. Λόγω της έλλειψης περαιτέρω πληροφόρησης σχετικά με τις εν λόγω δεσμεύσεις, τα ποσά αυτά χρησιμοποιήθηκαν στα πλαίσια της παρούσας ανάλυσης στο σύνολό τους.

8.2.3 Υπολογισμός δεικτών απασχόλησης

Για τον υπολογισμό της συνεισφοράς της ανάπτυξης πράσινων τεχνολογιών στην απασχόληση, η τελευταία παρουσιάζεται ως η καθαρή διαφορά στις θέσεις εργασίας σε σύγκριση με το σενάριο των «τρεχουσών πολιτικών» (García-García et al., 2020). Τα δύο MOA μερικής ισορροπίας που χρησιμοποιούνται στην ανάλυση, δηλαδή τα GCAM και TIAM στερούνται εσωτερικών διεργασιών για την αναπαράσταση της απασχόλησης, ενώ το μοντέλο γενικής ισορροπίας GEMINI-E3 παρέχει μόνο συγκεντρωτικά δεδομένα, αφού χαρακτηρίζεται από περιορισμένο βαθμό ανάλυσης όσον αφορά τους διαφορετικούς τομείς και καύσιμα (Malik et al., 2021). Για το λόγο αυτό, η παρούσα μελέτη χρησιμοποιεί συντελεστές απασχόλησης που προκύπτουν έπειτα από εκτεταμένη βιβλιογραφική ανασκόπηση προκειμένου να εκτιμηθεί η επιρροή στις θέσεις εργασίας κάθε επιπέδου επιδότησης για τις επιλεγμένες τεχνολογίες, οι οποίες, όπως αναφέρθηκε, έρχονται ως πρόσθετες στην πορεία που επιβάλλουν οι υφιστάμενες κλιματικές πολιτικές. Για τον υπολογισμό της απασχόλησης σε κάθε

Κεφάλαιο 8. Εφαρμογή βελτιωμένου αλγορίθμου πολυστοχικής βελτιστοποίησης και ολοκλήρωση με MOA για τη μεγιστοποίηση των κλιματικών και κοινωνικών ωφελειών των πακέτων ανάκαμψης από τον COVID-19

σενάριο, λαμβάνεται υπόψη η συμβολή κάθε καυσίμου στο ενεργειακό μείγμα. Η συνολική απασχόληση στον ενεργειακό τομέα εκτιμάται ως συνάθροιση των δεικτών απασχόλησης που αφορούν τους κλάδους δραστηριότητας: κατασκευής, παραγωγής (όπου λαμβάνονται υπόψη οι ανάγκες πρόσθετης δυναμικότητας στον τομέα της ηλεκτρικής ενέργειας), λειτουργίας και συντήρησης (σύμφωνα με τη συνολική δυναμικότητα του ενεργειακού τομέα), εξόρυξης (όπου συνυπολογίζονται τα ορυκτά καύσιμα, το ουράνιο και η παραγωγή βιοενέργειας) και διύλισης (όπου συνυπολογίζονται διαφορετικά υγρά προϊόντα διύλισης). Για κάθε καύσιμο, κλάδο δραστηριότητας εντός του ενεργειακού τομέα και χώρα, ο Πίνακας 0-1 του Παραρτήματος περιλαμβάνει τους δείκτες απασχόλησης που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό των τελικών τιμών των δημιουργούμενων θέσεων εργασίας. Οι δείκτες αυτοί συλλέχθηκαν από μελέτες της βιβλιογραφίας ή υπολογίστηκαν με βάση αυτές ως εξής:

- Για τις τεχνολογίες ΑΠΕ και τα βιοκαύσιμα οι παράγοντες απασχόλησης αντλήθηκαν από τους Rutovitz et al. (2015) οι οποίοι προτείνουν μια ολοκληρωμένη βάση δεδομένων που χρησιμοποιείται συχνά σε σχετικές αναλύσεις μοντελοποίησης (π.χ. Fragkos & Paroussos (2018), Ram et al. (2020)).
- Για τα ορυκτά καύσιμα, οι τιμές αντλήθηκαν από τους Pai et al. (2021), οι οποίοι, βασιζόμενοι στους Rutovitz et al. (2015), συμπεριέλαβαν τον διαχωρισμό των δεικτών ορυκτών καυσίμων ανά περιοχή.

Επισημαίνεται εδώ πως παρόλο που ο χρονικός ορίζοντας της ανάλυσης περιορίζεται στο 2030, καθιστώντας τον αντίκτυπο των αλλαγών στους υπολογισθέντες δείκτες να είναι μικρός, προκειμένου να ληφθούν υπόψη οι διαφορές στην ωριμότητα των τεχνολογιών μεταξύ των ετών, εξετάστηκε η επιρροή που προβλέπεται να έχει στις τιμές των δεικτών, η μεταβολή του τεχνολογικού κόστους για κάθε καύσιμο (Ram et al., 2020). Προκειμένου να εναρμονιστούν τα κόστη των τεχνολογιών (π.χ. κεφαλαιουχικές δαπάνες - CAPEX και λειτουργικά κόστη - OPEX) μεταξύ των τριών μοντέλων (GCAM, TIAM, GEMINI – E3) χρησιμοποιήθηκε το πρωτόκολλο που καθιέρωσαν οι Giarola et al.

Κεφάλαιο 8. Εφαρμογή βελτιωμένου αλγορίθμου πολυστοχικής βελτιστοποίησης και ολοκλήρωση με MOA για τη μεγιστοποίηση των κλιματικών και κοινωνικών ωφελειών των πακέτων ανάκαμψης από τον COVID-19

(2021). Δεδομένου ότι καθεμία από τις χώρες της παρούσας μελέτης αναλύεται ανεξάρτητα από τις υπόλοιπες, οι δείκτες απασχόλησης για τους κλάδους της βιομηχανίας και της εξόρυξης διορθώθηκαν με βάση το μερίδιο της εγχώριας παραγωγής - προσφοράς. Ως εκ τούτου, οι δείκτες απασχόλησης πολλαπλασιάζονται με το σχετικό μερίδιο της εγχώριας προσφοράς προς την εγχώρια ζήτηση για το πιο πρόσφατο έτος (2018 ή 2019) για το οποίο υπήρχαν πραγματικά δεδομένα διαθέσιμα, μερίδιο το οποίο δεν μπορεί να υπερβεί την μονάδα. Με άλλα λόγια, εάν υποθεθεί ότι μια χώρα είναι καθαρός εξαγωγέας καυσίμων, όλες οι πρόσθετες θέσεις εργασίας για τον κλάδο της εξόρυξης θεωρείται ότι πραγματοποιούνται στην ίδια τη χώρα, ενώ, εάν μια χώρα θεωρηθεί ότι εισήγαγε, π.χ., το 50% της εγχώριας ζήτησης, μόνο οι μισές από τις νέες θέσεις εργασίας στον κλάδο της εξόρυξης θα αντιστοιχηθούν στην ίδια τη χώρα.

8.2.4 Πολυστοχική ανάλυση χαρτοφυλακίου υπό αβεβαιότητα με τη μέθοδο AUGMECON - R

Τα αποτελέσματα των MOA τροφοδοτούν το μοντέλο πολυστοχικής βελτιστοποίησης, με σκοπό τη μεγιστοποίηση της απόδοσης του «πράσινου» μέρους των δημοσιονομικών προγραμμάτων για την ανάκαμψη από τον COVID - 19 που αναμένεται να διατεθούν στις εννιά εξεταζόμενες τεχνολογίες, όσον αφορά τη δημιουργία νέων θέσεων εργασίας στον ενεργειακό τομέα και την επίτευξη περαιτέρω περικοπών εκπομπών CO₂. Το μοντέλο επιλύεται με βάση τον βελτιωμένο αλγόριθμο της AUGMECON - R (Nikas et al., 2020), υλοποιημένο σε Python, ο οποίος αναπτύχθηκε στα πλαίσια της παρούσας διατριβής. Η βελτιωμένη υλοποίηση αφορά εκτός των άλλων, τη βέλτιστη κατανομή των αντικειμενικών συναρτήσεων μέσα στους ένθετους βρόχους του αλγορίθμου για την καταγραφή όλων των λύσεων, μειώνοντας έτσι σημαντικά τον χρόνο εκτέλεσης.

Για τους σκοπούς της επίλυσης ορίζονται τρεις διαφορετικές αντικειμενικές συναρτήσεις. Η πρώτη αντικειμενική συνάρτηση αφορά την περαιτέρω μείωση των εκπομπών CO₂, χρησιμοποιώντας το 2030 ως χρονικό ορίζοντα για την

Κεφάλαιο 8. Εφαρμογή βελτιωμένου αλγορίθμου πολυστοχικής βελτιστοποίησης και ολοκλήρωση με MOA για τη μεγιστοποίηση των κλιματικών και κοινωνικών ωφελειών των πακέτων ανάκαμψης από τον COVID-19

αξιολόγηση, δεδομένου ότι το 2030 είναι έτος ορόσημο για την επίτευξη των Εθνικά Καθορισμένων Συνεισφορών (NDCs). Η δεύτερη αντικειμενική συνάρτηση αξιολογεί τη δημιουργία νέων θέσεων εργασίας στον ενεργειακό τομέα. Υποθέτοντας ότι οι υπεύθυνοι χάραξης πολιτικής επιδιώκουν να μεγιστοποιήσουν άμεσα τις αποδόσεις των κεφαλαίων για την ανάκαμψη που πρόκειται να δαπανηθούν τα επόμενα πέντε χρόνια, χρησιμοποιείται το 2025 ως χρονικός ορίζοντας για την αξιολόγηση του δεύτερου στόχου – αντικειμενικής συνάρτησης. Ωστόσο, εκτός από τις διαφορές μεταξύ των έξι εξεταζόμενων γεωγραφικών περιοχών λόγω των εγχώριων πόρων και της παραγωγικής τους ικανότητας, διαφορετικά έργα συνεπάγονται διαφορετική κατανομή νέων θέσεων εργασίας κατά μήκος των επιμέρους δραστηριοτήτων του έργου. Επομένως, ένα βασικό ερώτημα είναι εάν οι νέες θέσεις εργασίας που δημιουργούνται από τις επιδοτήσεις στις εξεταζόμενες τεχνολογίες βραχυπρόθεσμα (έως το 2025), μπορούν να διατηρηθούν μακροπρόθεσμα. Ως αποτέλεσμα του παραπάνω, ορίζεται και ένα τρίτο κριτήριο βελτιστοποίησης, το οποίο αφορά τη μεγιστοποίηση των νέων θέσεων απασχόλησης μέχρι το τέλος της δεκαετίας (2030).

Συνοπτικά, η διαδικασία βελτιστοποίησης, η οποία προσομοιώνει μια διαδικασία ανάλυσης χαρτοφυλακίου πράσινων τεχνολογιών, επιδιώκει να βελτιστοποιήσει τις περικοπές των εκπομπών έως το 2030, τα κέρδη σε νέες θέσεις απασχόλησης έως το 2025 και τα κέρδη απασχόλησης έως το 2030 ταυτόχρονα. Μαθηματικά, η διατύπωση του προβλήματος βελτιστοποίησης μπορεί να συνοψιστεί ως εξής:

$$\max y = [E_{2021-2030}(MtCO_2), J_{2021-2025}(\text{εργατοέτη}), J_{2021-2030}(\text{εργατοέτη})]$$

$$s. t. < \text{Μέγιστη χρηματοδότηση ανά περιοχή (USD)}$$

όπου:

- $E_{2021-2030}$: μείωση εκπομπών CO₂ σωρευτικά από το 2021 έως το 2030
- $J_{2021-2025}$: συνολικό κέρδος σε εργατοέτη για την περίοδο 2021-2025
- $J_{2021-2030}$: συνολικό κέρδος σε εργατοέτη για την περίοδο 2021-2030

Κεφάλαιο 8. Εφαρμογή βελτιωμένου αλγορίθμου πολυστοχικής βελτιστοποίησης και ολοκλήρωση με MOA για τη μεγιστοποίηση των κλιματικών και κοινωνικών ωφελειών των πακέτων ανάκαμψης από τον COVID-19

- *Μέγιστη χρηματοδότηση ανά περιοχή*: Το μέγιστο διαθέσιμο ποσό χρηματοδότησης ανά περιοχή, όπως αυτό προσδιορίστηκε στην Ενότητα 8.2.2.

Τέλος, προκειμένου να μεγιστοποιηθεί η αξιοπιστία των αποτελεσμάτων, γίνεται η υπόθεση ότι οι έξοδοι των MOA (μειώσεις εκπομπών CO₂, καθώς και βραχυπρόθεσμα και μακροπρόθεσμα κέρδη απασχόλησης ανά επίπεδο επιδότησης κάθε τεχνολογίας για κάθε περιοχή) χαρακτηρίζονται από αβεβαιότητα, την οποία και η παρούσα εφαρμογή επιχειρείται να διαχειριστεί. Για αυτόν τον σκοπό εκτελούνται εκατό (100) προσομοιώσεις Monte Carlo για κάθε πρόβλημα βελτιστοποίησης χαρτοφυλακίου, οι οποίες πραγματοποιούνται για εύρος $\pm 5\%$, σε μια προσέγγιση παρόμοια με αυτή της υπενότητας 7.2.3. Ως δείκτης ευρωστίας ορίζεται ο αριθμός των φορών που ένα χαρτοφυλάκιο τεχνολογικών επιδοτήσεων βρίσκεται βέλτιστο (δηλαδή εντοπίζεται ως μέρος του μετώπου Pareto) μεταξύ των 100 προσομοιώσεων Monte Carlo. Με άλλα λόγια, εάν μια συγκεκριμένη κατανομή προϋπολογισμού βρεθεί βέλτιστη σε n προσομοιώσεις, τότε η ευρωστία αυτού του χαρτοφυλακίου είναι $n\%$. Στα σχήματα, η ευρωστία ενσωματώνεται εντός του μετώπου Pareto και αντικατοπτρίζεται στο μέγεθος του κάθε σημείου (χαρτοφυλακίου) του Pareto: όσο μεγαλύτερο είναι το σημείο του σχήματος που αντιστοιχεί σε κάθε χαρτοφυλάκιο, τόσο πιο εύρωστο είναι το χαρτοφυλάκιο.

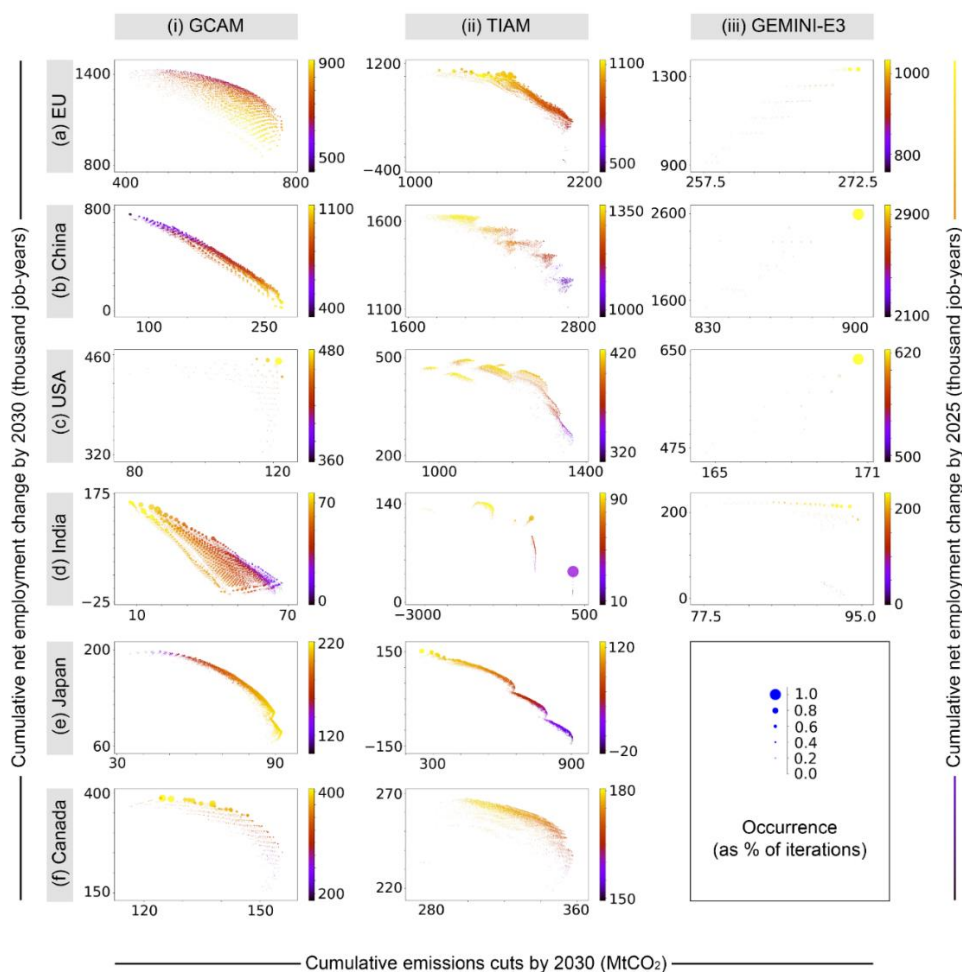
8.3 Αποτελέσματα

8.3.1 Επιρροή των πακέτων ανάκαμψης στις δυναμικές των τριών στόχων βελτιστοποίησης

Τα αποτελέσματα της βελτιστοποίησης δείχνουν πως, πέραν λίγων εξαιρέσεων, σχεδόν όλα τα προκύπτοντα χαρτοφυλάκια πράσινων τεχνολογιών, ταυτόχρονα οδηγούν στη μείωση των εκπομπών CO₂ και σε θετικό αντίκτυπο στην απασχόληση τόσο σε μακροπρόθεσμο όσο και σε βραχυπρόθεσμο επίπεδο (Σχήμα 8-3), επιβεβαιώνοντας τη θετική συνέργεια μεταξύ της μετάβασης σε καθαρή ενέργεια και της απασχόλησης που εντοπίζεται στη βιβλιογραφία (Markandya et al., 2016; Pai et al., 2021; Ram et al., 2020; Stoll & Mehling, 2020;

Κεφάλαιο 8. Εφαρμογή βελτιωμένου αλγορίθμου πολυστοχικής βελτιστοποίησης και ολοκλήρωση με MOA για τη μεγιστοποίηση των κλιματικών και κοινωνικών ωφελειών των πακέτων ανάκαμψης από τον COVID-19

Wang et al., 2020). Ωστόσο, για τα περισσότερα χαρτοφυλάκια, η δυναμική μεταξύ της μείωσης των εκπομπών και της δημιουργίας θέσεων εργασίας για όλη τη δεκαετία είναι σχετική και εξαρτάται από τις τεχνολογίες που επιδοτούνται και επιλέγονται ως μέρος των χαρτοφυλακίων. Ενδιαφέρον επίσης παρουσιάζουν και ορισμένες εξαιρέσεις επί των γενικών παρατηρήσεων: σε μία περίπτωση, συγκεκριμένα κατά την μοντελοποίηση της Ινδίας χρησιμοποιώντας τα αποτελέσματα του MOA TIAM, παρατηρείται ότι τα βέλτιστα χαρτοφυλάκια μπορεί πράγματι να οδηγήσουν σε αυξημένα επίπεδα εκπομπών, ενώ σε τρεις περιπτώσεις (κατά την μοντελοποίηση της Ιαπωνίας και της ΕΕ με εισόδο τα αποτελέσματα του MOA TIAM και της Ινδία με το μοντέλο GCAM) υπάρχει ένα υποσύνολο χαρτοφυλακίων που μειώνουν την απασχόληση.



Σχήμα 8-3: Αποτελέσματα βελτιστοποίησης για κάθε χώρα βασιζόμενη στις 3 αντικειμενικές (άξονες x - y και χρωματική αναπαράσταση). Τα μεγέθη των σημείων του μετώπου Pareto αντιπροσωπεύουν την ευρωστία κάθε χαρτοφυλακίου.

Κεφάλαιο 8. Εφαρμογή βελτιωμένου αλγορίθμου πολυστοχικής βελτιστοποίησης και ολοκλήρωση με MOA για τη μεγιστοποίηση των κλιματικών και κοινωνικών ωφελειών των πακέτων ανάκαμψης από τον COVID-19

Για τη δυναμική μεταξύ της δημιουργίας θέσεων απασχόλησης σε βραχυπρόθεσμο και μακροπρόθεσμο ορίζοντα, παρατηρείται ότι υπάρχει άμεση σύνδεση μεταξύ των δύο στόχων, πράγμα που σημαίνει ότι οι τεχνολογίες που παρέχουν καθαρά κέρδη απασχόλησης σε επίπεδο δεκαετίας (μακροπρόθεσμο ορίζοντα), έχουν επίσης άμεσο θετικό αντίκτυπο στη δημιουργία θέσεων εργασίας (βραχυπρόθεσμο ορίζοντα). Ωστόσο, σε τρεις περιπτώσεις (Κίνα, ΕΕ και Ιαπωνία για τα αποτελέσματα του μοντέλου GCAM), η βραχυπρόθεσμη δημιουργία θέσεων απασχόλησης έρχεται σε αντίθεση με την επίδοση στη δημιουργία θέσεων για την επόμενη δεκαετία, με τις θέσεις εργασίας σε βραχυπρόθεσμο ορίζοντα να είναι περισσότερες για χαρτοφυλάκια τεχνολογιών που μεγιστοποιούν τη μείωση των εκπομπών.

Για να γίνει αντιληπτή η συνολική επίδραση στους στόχους και στη συμμετοχή των τεχνολογιών στα χαρτοφυλάκια μεταξύ των διαφορετικών συνδυασμών στις αναλύσεις γεωγραφικής περιοχής – MOA, εξετάζεται ο μέσος όρος όλων των χαρτοφυλακίων σταθμισμένος με το επίπεδο ευρωστίας τους (δηλαδή, την πιθανότητα να βρεθεί ένα χαρτοφυλάκιο μεταξύ των μετώπων Pareto των προσομοιώσεων MC). Εδώ, ενώ οι διαφορές και η αβεβαιότητα μεταξύ των μοντέλων είναι πολύ μεγάλη για να δώσει ακριβείς απαντήσεις στην πορεία προς μια πιο βιώσιμη ανάπτυξη, μπορούν να εντοπιστούν οι κυρίαρχες τάσεις οι οποίες βοηθούν για την εξαγωγή κάποιων βασικών συμπερασμάτων. Σχετικά με τις επιπτώσεις των πακέτων ανάκαμψης του COVID-19 στη μείωση των εκπομπών, για την ΕΕ και τον Καναδά φαίνεται πως η προκύπτουσα συμβολή είναι σημαντική και μη αμελητέα (>5%) στην κάλυψη του χάσματος μεταξύ της πορείας που έθεσαν τα ισχύοντα πακέτα πολιτικής πριν από την πανδημία και των ανανεωμένων στόχων των Εθνικά Καθορισμένων Συνεισφορών, οι οποίοι και είναι συμβατοί με τις δεσμεύσεις για μείωση της παγκόσμιας θερμοκρασίας κατά ~ 2°C (Climate Action Tracker, 2021; IEA, 2021a). Τα σχετικά περιορισμένα πακέτα πράσινης ανάκαμψης για τις ΗΠΑ και την Ινδία προκύπτουν για μια αντίστοιχη πορεία, ενώ η αβεβαιότητα που δείχνουν τα αποτελέσματα μεταξύ των MOA είναι αρκετά έντονη για την Κίνα και την Ιαπωνία και εμποδίζει την εξαγωγή στιβαρών συμπεράσματα. Όσον αφορά τη συμβολή στην απασχόληση,

Κεφάλαιο 8. Εφαρμογή βελτιωμένου αλγορίθμου πολυστοχικής βελτιστοποίησης και ολοκλήρωση με MOA για τη μεγιστοποίηση των κλιματικών και κοινωνικών ωφελειών των πακέτων ανάκαμψης από τον COVID-19

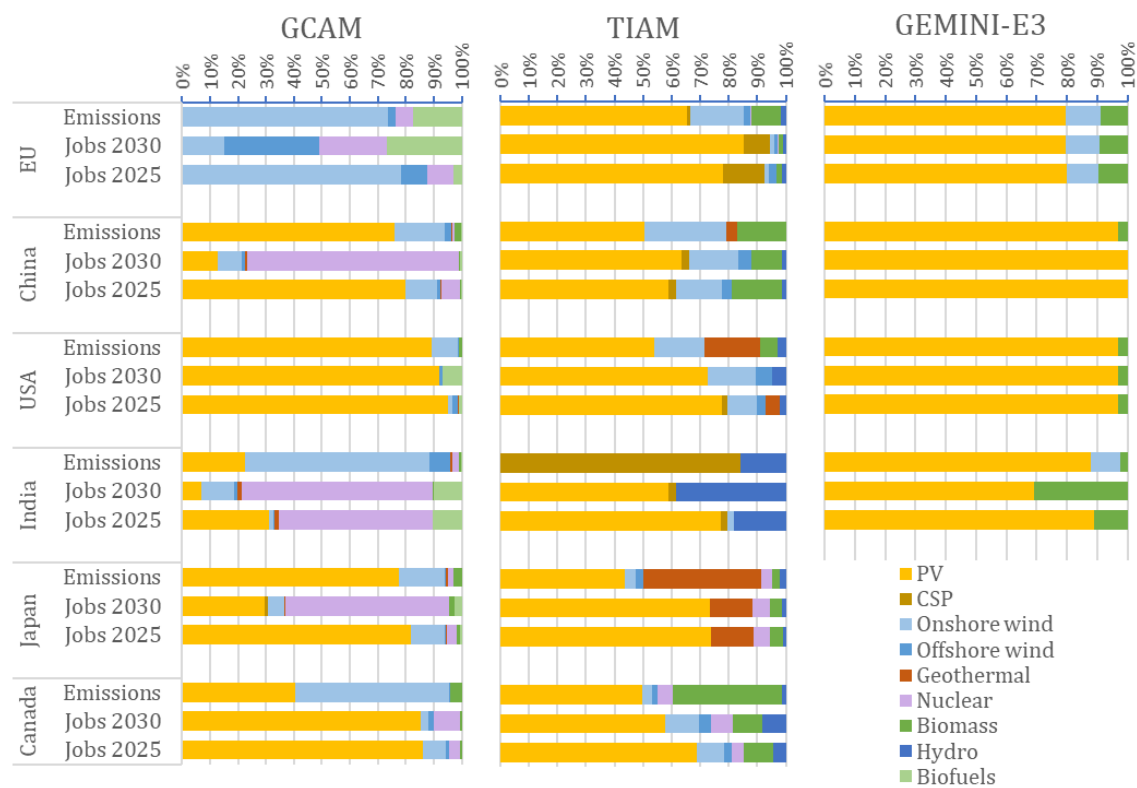
τα πακέτα ανάκαμψης στην ΕΕ, την Κίνα και τον Καναδά αποδεικνύονται επαρκή για την ανάκτηση θέσεων εργασίας που χάθηκαν λόγω της πανδημίας, μέσω της αύξησης της απασχόλησης στον ενεργειακό τομέα, κυρίως βραχυπρόθεσμα. Όπως και στην περίπτωση των εκπομπών, τα κέρδη απασχόλησης είναι ελάχιστα για τις ΗΠΑ και την Ινδία, που στην πραγματικότητα είναι οι δύο οικονομίες που σημείωσαν την υψηλότερη απόλυτη μείωση της απασχόλησης μεταξύ αυτών που αναλύθηκαν σε αυτή τη μελέτη (CMIE, 2022; IMF, 2021). Για την Ιαπωνία, οι διαφορές μεταξύ των μοντέλων είναι πολύ μεγάλες για να καταλήξουν σε αξιόπιστα συμπεράσματα.

8.3.2 Προσδιορισμός βέλτιστων τεχνολογιών για κάθε γεωγραφική περιοχή και MOA

Ένα βασικό ερώτημα που επιχειρεί να απαντήσει η παρούσα μελέτη σε επίπεδο πολιτικής είναι ο βέλτιστος τρόπος κατανομής των κεφαλαίων ανάκαμψης στις διαφορετικές τεχνολογίες καθαρής ενέργειας, προκειμένου να επιτευχθεί ένα σύνολο σαφώς καθορισμένων στόχων προς την κατεύθυνση της βιώσιμης ανάπτυξης. Συνολικά, διαπιστώνεται ότι η τεχνολογία καθαρής ενέργειας που απορροφά το μεγαλύτερο μέρος της οικονομική υποστήριξης για τις περισσότερες αναλύσεις και σε όλες τις γεωγραφικές περιοχές είναι τα Φ/Β, ενώ τα υπεράκτια αιολικά πάρκα καταλαμβάνουν επίσης ένα σημαντικό μερίδιο της επιδότησης για τα περισσότερα πακέτα ανάκαμψης – μεταξύ των διαφορετικών χωρών. Η σημαντικότητα των υπόλοιπων τεχνολογιών, και ειδικά αυτών που εμφανίζουν χαμηλά επίπεδα διείσδυσης στο πλαίσιο των τρεχουσών πολιτικών, γίνεται κατά περίπτωση εμφανής σε ορισμένες βελτιστοποιήσεις και ανάλογα με τον επιλεγέντα συνδυασμό MOA – γεωγραφικής περιοχής, με τις προτιμήσεις στις εκάστοτε τεχνολογίες να τείνουν να διαφέρουν σημαντικά ανάλογα με τον στόχο που βελτιστοποιείται (Σχήμα 8-4). Για παράδειγμα, τα αποτελέσματα για την ανάλυση των δεδομένων από το μοντέλο GCAM προτείνουν την επένδυση ενός σχετικά υψηλού μέρους του προϋπολογισμού ανάκαμψης (>20%) στα υπεράκτια αιολικά πάρκα και τα βιοκαύσιμα στην προσπάθεια μεγιστοποίησης της απασχόλησης κατά τη διάρκεια της επόμενης δεκαετίας στην ΕΕ, και για την στην πυρηνική ενέργεια για τις περιοχές της ΕΕ, της Κίνας, της Ινδίας και της Ιαπωνίας.

Κεφάλαιο 8. Εφαρμογή βελτιωμένου αλγορίθμου πολυστοχικής βελτιστοποίησης και ολοκλήρωση με MOA για τη μεγιστοποίηση των κλιματικών και κοινωνικών ωφελειών των πακέτων ανάκαμψης από τον COVID-19

Από την άλλη, η ανάλυση των αποτελεσμάτων του TIAM καταδεικνύει το σημαντικό ρόλο της γεωθερμικής ενέργειας στη μείωση των εκπομπών στην Ιαπωνία και τις ΗΠΑ, της επένδυσης σε CSP για την Ινδία και στη βιομάζα για τον Καναδά. Η υδροηλεκτρική ενέργεια (για την ανάλυση δεδομένων του TIAM) και η βιομάζα (για βελτιστοποίηση βασισμένη στις εξόδους του GEMINI-E3) φαίνεται να συμβάλλουν σημαντικά στη μεγιστοποίηση των θέσεων εργασίας στην ενέργεια για την Ινδία, μακροπρόθεσμα. Τα παραπάνω αποτελέσματα καταδεικνύουν την αξία της μοντελοποίησης της επιρροής των πακέτων ανάκαμψης συμπληρωματικά των επιδράσεων των ήδη διαμορφωμένων πολιτικών, η οποία και έχει μοντελοποιηθεί διαφορετικά για κάθε περιοχή, καθώς και την αξία της ενσωμάτωσης διαφορετικών μοντέλων και αλληλεπιδράσεων σε επίπεδο πολιτικής στην προσπάθεια προσδιορισμού της πιο αποδοτικής τεχνολογίας ανά περιοχή, υπό το πρίσμα των στόχων βελτιστοποίησης της ανάλυσης.



Σχήμα 8-4: Μείγμα τεχνολογιών εντός των βέλτιστων χαρτοφυλακίων για κάθε συνδυασμό MOA – γεωγραφικής περιοχής.

8.3.3 Ο ρόλος των διαφορετικών μοντέλων στα αποτελέσματα κατανομής της οικονομικής επιδότησης

Παρά την προσπάθεια εναρμόνισης των τεχνοοικονομικών υποθέσεων και του αντίκτυπου των εφαρμοζόμενων πριν από την πανδημία πολιτικών για την ενέργεια και το κλίμα κατά τη διεξαγωγή των μοντελοποιήσεων (Girola et al., 2021), παρατηρείται ότι τα αποτελέσματα από τα τρία χρησιμοποιούμενα ΜΟΑ διαφέρουν σημαντικά: οι παρατηρούμενες διαφορές στη συμβολή των τεχνολογιών για τη μείωση των εκπομπών είναι έως και δεκαπλάσιες για το ίδιο επίπεδο επιδότησης (Κίνα, ΗΠΑ), και εξαπλάσιες, για ίδιο επίπεδο επιδότησης, για την απασχόληση (Κίνα), ενώ έντονες διαφορές παρατηρούνται και στο μείγμα τεχνολογιών που επιλέγονται στα βέλτιστα χαρτοφυλάκια (Πίνακας 8-2). Είναι γεγονός πως υπάρχουν πολλοί παράγοντες οι οποίοι είναι συνδεδεμένοι με το κάθε ΜΟΑ και επηρεάζουν την αποτελεσματικότητα των χρηματοδοτήσεων επί των διαφορετικών τεχνολογιών, οι οποίοι κρύβονται σε ένα «μαύρο κουτί» μεταξύ των παρουσιαζόμενων εισόδων του ΜΟΑ (διαθέσιμοι προϋπολογισμοί χρηματοδότησης) και των αντίστοιχων εξόδων (εκπομπές, θέσεις εργασίας). Διαχωρίζοντας αυτή την αιτιότητα σε τρεις δείκτες (δείκτης επιδότησης - δυναμικότητας, δείκτης δυναμικότητας - εκπομπών, δείκτης δυναμικότητας - απασχόλησης) για κάθε συνδυασμό μοντέλου-χώρας-τεχνολογίας, γίνεται αντιληπτή η επίδραση της συμπεριφοράς του μοντέλου στα αποτελέσματα (Σχήμα 8-2).

Ο πρώτος δείκτης μετρά πόση πρόσθετη δυναμικότητα παραγωγής (GW) εγκαθίσταται για κάθε μονάδα χρηματοδότησης (Σχήμα 0-1). Για όλες σχεδόν τις τεχνολογίες και τις χώρες, τα ΜΟΑ GCAM και TIAM προβλέπουν μειωμένες αποδόσεις για κάθε επιπλέον μονάδα χρηματοδότησης. Αυτό συμβαίνει επειδή ο μηχανισμός επιλογής τεχνολογίας με συνάρτηση ποσοστοιχίας που σχετίζεται με την τυπική λογιστική κατανομή (logit), που χρησιμοποιεί το GCAM (Clarke & Edmonds, 1993), προκαλεί σταδιακά μειούμενες αποδόσεις, με τα πρώτα επίπεδα επιδότησης για μια συγκεκριμένη τεχνολογία να διεγείρουν μεγαλύτερη ανάπτυξη δυναμικότητας σε σχέση με τις επακόλουθες επιδοτήσεις για την ίδια τεχνολογία. Συγκριτικά, ο μηχανισμός βελτιστοποίησης του TIAM, ο οποίος

Κεφάλαιο 8. Εφαρμογή βελτιωμένου αλγορίθμου πολυστοχικής βελτιστοποίησης και ολοκλήρωση με MOA για τη μεγιστοποίηση των κλιματικών και κοινωνικών ωφελειών των πακέτων ανάκαμψης από τον COVID-19

υπακούει στη λογική winner-takes-all, υποδηλώνει ότι η φθηνότερη τεχνολογία μπορεί να κυριαρχήσει σε όλες τις νέες εφαρμογές. Αυτός ο μηχανισμός ενισχύει τις αποδόσεις κλίμακας καθώς, μόλις ένα επίπεδο επιδότησης βρεθεί ανταγωνιστικό από άποψη κόστους για μια συγκεκριμένη τεχνολογία, τότε το TIAM επιλέγει μεγάλο βαθμό ανάπτυξης για τη συγκεκριμένη τεχνολογία (ο οποίος είναι πολύ πιο έντονος σε σύγκριση με το GCAM), με περαιτέρω επιδοτήσεις να έχουν μικρότερο πρόσθετο αντίκτυπο. Με τον τρόπο αυτό εξηγείται γιατί στο TIAM οι περισσότερες τεχνολογίες λαμβάνουν τουλάχιστον κάποια ελάχιστη οικονομική υποστήριξη, δεδομένου πως τα επίπεδα επιδότησης σε κάθε τεχνολογία είναι σχετικά πιο αποτελεσματικά. Από την άλλη, για το GEMINI – E3 παρατηρούνται αυξανόμενες αποδόσεις κλίμακας για συγκεκριμένες επιδοτήσεις τεχνολογιών. Καθώς το συγκεκριμένο MOA προσπαθεί να φτάσει σε ισορροπία με την πάροδο του χρόνου, η προσωρινή οικονομική στήριξη μιας περιόδου ανατρέπεται σε μεγάλο βαθμό στις επόμενες περιόδους, προκαλώντας μια απροσδόκητη επίδραση της προηγούμενης στήριξης. Καθώς η βραχυπρόθεσμη αποτελεσματικότητα των πρόσθετων επιδοτήσεων μειώνεται παρουσία νέων, το μοντέλο προσπαθεί όλο και περισσότερο να βελτιστοποιήσει την επίδραση των επιδοτήσεων με την πάροδο του χρόνου καθώς ο προϋπολογισμός αυξάνεται για μια συγκεκριμένη τεχνολογία. Αυτό το φαινόμενο αμβλύνει εν μέρει (λόγω χαμηλότερης επιδότησης σε μια συγκεκριμένη περίοδο) και καθυστερεί (μετατοπίζοντας μέρος της επιδότησης σε επόμενη περίοδο) το διορθωτικό αποτέλεσμα ισορροπίας που εμφανίζεται μετά από κάποια μεγάλο ύψους επιδότηση σε μια περίοδο, αυξάνοντας έτσι την χρήση της εκάστοτε τεχνολογίας σωρευτικά έως το 2030 με την χορήγηση μεγαλύτερου επιπέδου επιδότησης. Αυτές οι αυξανόμενες σε κλίμακα αποδόσεις εξηγούν γιατί το GEMINI-E3 θεωρεί ότι είναι βέλτιστο να επενδύει σχεδόν όλο τον προϋπολογισμό σε μία τεχνολογία (Σχήμα 8-4), αποφεύγοντας τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ των διαφορετικών στόχων κατά την επιλογή των χαρτοφυλακίων τεχνολογίας (Σχήμα 8-3).

Οι άλλοι δύο δείκτες μετρούν την επίδραση της κάθε πρόσθετης μονάδας δυναμικότητας παραγωγής στις εκπομπές και την απασχόληση (Σχήμα 0-2 και

Πίνακας 8-2: Αποτελέσματα βελτιστοποίησης και χαρτοφυλάκια τεχνολογιών για κάθε συνδυασμό MOA – γεωγραφικής περιοχής

| Περιοχή | MOA | Αποτελέσματα για τους τρεις στόχους βελτιστοποίησης * | | | Αποτελέσματα βελτιστοποίησης ως μέρος των ΕΚΣ | | | Μείγμα τεχνολογιών εντός των βέλτιστων χαρτοφυλακίων * | | | | | | | | |
|-------------------------|-----------|---|---|---|---|---|--------------------------------|--|-------|------------------|-------------------|-----------|----------|---------|------------------------|------------|
| | | Μείωση CO ₂ σωρευτικά 2021-2030 | Απασχόληση στον τομέα ενέργειας 2021-2030 | Απασχόληση στον τομέα ενέργειας 2021-2025 | Μείωση CO ₂ σε σχέση με τις ΕΚΣ ** | Δημιουργία θέσεων εργασίας στην ενέργεια σε σχέση με τις θέσεις που χάθηκαν στον COVID - 19 (2021 vs 2019)*** | | PV | CSP | Θαλάσσια αιολικά | Υπεράκτια αιολικά | Γεωθερμία | Πυρηνικά | Βιομάζα | Υδροηλεκτρική ενέργεια | Βιοκαύσιμα |
| | | Εκατ. τόνοι CO ₂ | Εργατοέτη σε χιλιάδες | % ΕΚΣ | % 2021-2030 | % 2021-2025 | % του συνολικού προϋπολογισμού | | | | | | | | | |
| ΕΕ (96δισ\$) | GCAM | 645 | 1238 | 804 | 29.5% | 9.20% | 11.94% | 0.0% | 0.0% | 53.4% | 12.8% | 0.0% | 15.3% | 0.0% | | 18.6% |
| | TIAM | 1839 | 677 | 948 | 48.3% | 5.03% | 14.08% | 78.8% | 4.2% | 7.2% | 2.3% | 0.0% | 0.2% | 5.7% | 1.5% | |
| | GEMINI-E3 | 269 | 1249 | 977 | 6.7% | 9.28% | 14.51% | 74.8% | | 16.3% | | | | | 8.9% | |
| Κίνα (60 δισ\$) | GCAM | 197 | 403 | 780 | 5.4% | 3.82% | 14.78% | 46.7% | 0.0% | 19.4% | 0.9% | 0.3% | 31.7% | 0.8% | | 0.2% |
| | TIAM | 2257 | 1490 | 1262 | 210.4% | 14.13% | 23.93% | 54.4% | 1.8% | 23.8% | 2.1% | 2.2% | 0.0% | 14.6% | 1.1% | |
| | GEMINI-E3 | 872 | 2280 | 2712 | NA | 21.62% | 51.43% | 94.6% | | 2.1% | | | | 3.2% | | |
| ΗΠΑ (26 δισ\$) | GCAM | 116 | 424 | 445 | 1.3% | 1.53% | 3.21% | 88.0% | 0.0% | 5.9% | 1.8% | 0.1% | 0.4% | 0.5% | | 3.2% |
| | TIAM | 1164 | 438 | 405 | 12.2% | 1.58% | 2.91% | 68.7% | 0.5% | 16.5% | 2.6% | 7.8% | 0.0% | 0.5% | 3.4% | |
| | GEMINI-E3 | 169 | 590 | 591 | 1.8% | 2.12% | 4.26% | 91.6% | | 0.0% | | | | 8.4% | | |
| Ινδία (9 δισ\$) | GCAM | 43 | 56 | 47 | 1.2% | 0.19% | 0.33% | 30.1% | 0.0% | 30.0% | 1.7% | 0.2% | 33.3% | 0.1% | | 4.6% |
| | TIAM | -1309 | 120 | 83 | NA | 0.41% | 0.57% | 65.6% | 15.4% | 0.3% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 18.7% | |
| | GEMINI-E3 | 90 | 201 | 207 | 2.9% | 0.69% | 1.43% | 78.3% | | 6.9% | | | | 14.7% | | |
| Ιαπωνία (19.2 δισ\$) | GCAM | 80 | 135 | 200 | 4.9% | 5.00% | 14.78% | 60.1% | 0.1% | 15.2% | 0.2% | 0.4% | 19.7% | 2.1% | | 2.2% |
| | TIAM | 723 | -3 | 52 | 52.6% | -0.10% | 3.87% | 60.1% | 0.0% | 2.0% | 0.9% | 28.3% | 4.3% | 3.0% | 1.4% | |
| Canada (17.6 δισ\$) | GCAM | 141 | 333 | 346 | 19.5% | 8.49% | 17.62% | 69.2% | 0.0% | 21.8% | 0.7% | 0.0% | 6.0% | 2.2% | | 0.0% |
| | TIAM | 326 | 257 | 174 | 26.7% | 6.54% | 8.88% | 56.8% | 0.0% | 8.1% | 2.7% | 0.0% | 6.0% | 21.6% | 4.8% | |

* Οι αριθμοί είναι σταθμισμένοι μέσοι όροι όλων των χαρτοφυλακίων του σχήματος Σχήμα 8-3. Το βάρος κάθε χαρτοφυλακίου ορίζεται από το επίπεδο ευρωστίας.

** Οι ΕΚΣ που χρησιμοποιήθηκαν για το CO₂ είναι -55% σε σχέση με το 1990 στην ΕΕ, -65% σε σχέση με το 2005 στην Κίνα, -51% σε σχέση με το 2005 στις ΗΠΑ, -45% σε σχέση με το 2005 στην Ινδία, -46% σε σχέση με το 2013 στην Ιαπωνία και -42,5% σε σχέση με το 2005 στον Καναδά. Με "NA" δίνονται οι συνδυασμοί μοντέλου-περιοχής όπου οι διαθέσιμοι ΕΚΣ επιτυγχάνονται ήδη από το τρέχον βασικό σενάριο πολιτικής.

***Ο αριθμός των θέσεων που χάθηκαν λόγω της πανδημίας (σύγκριση θέσεων 2021 με θέσεις 2019) υπολογίζεται πολλαπλασιάζοντας το ποσοστό ανεργίας με το συνολικό εργατικό δυναμικό.

Χρησιμοποιείται το έτος 2021 και όχι το 2020 ώστε να φιλτραριστούν οι θέσεις εργασίας που χάθηκαν προσωρινά λόγω των σκληρών μέτρων για την πανδημία το 2020

Κεφάλαιο 8. Εφαρμογή βελτιωμένου αλγορίθμου πολυστοχικής βελτιστοποίησης και ολοκλήρωση με MOA για τη μεγιστοποίηση των κλιματικών και κοινωνικών ωφελειών των πακέτων ανάκαμψης από τον COVID-19

Σχήμα 0-3 αντιστοίχως). Οι δείκτες αυτοί ουσιαστικά συνοψίζουν τις αλληλεπιδράσεις εντός των ενεργειακών συστημάτων οι οποίες προκαλούνται από την προσθήκη πρόσθετης δυναμικότητας παραγωγής από καθαρές τεχνολογίες σε κάθε μοντέλο, καθώς και το σύνολο των εκπομπών και δεικτών απασχόλησης που προκύπτουν ως απόκριση του ενεργειακού συστήματος.

Οι δείκτες αυτοί τείνουν να καθορίζονται σαφώς για κάθε τεχνολογία και χώρα και, σε αντίθεση με τον δείκτη χρηματοδότησης προς παραγωγική δυναμικότητα, λαμβάνουν θετικές και αρνητικές τιμές. Για παράδειγμα, η επιδότηση για την κατασκευή ενός νέου αιολικού πάρκου, η οποία ανταγωνίζεται λύσεις καθαρής και συμβατικής ενέργειας, ενδεχομένως να επιλεγεί στη θέση λύσεων έντασης εργασίας και μπορεί να αυξήσει τη ζήτηση ενέργειας στο σύνολό της μέσω ενός φαινομένου ανάκαμψης που προκαλείται από τις χαμηλότερες τιμές ηλεκτρικής ενέργειας. Από τη μελέτη των δεικτών φαίνεται ότι το MOA TIAM, για όλες τις χώρες πλην της Ινδίας, εμφανίζει πολύ πιο υψηλή μείωση των εκπομπών ανά μονάδα πρόσθετης, λόγω των επιδοτήσεων, δυναμικότητας παραγωγής. Αυτό μπορεί να εξηγηθεί αν αναλυθεί η επίδραση της πρόσθετης δυναμικότητας παραγωγής στο ενεργειακό σύστημα: η πρόσθετη δυναμικότητα επηρεάζει κατά κύριο λόγο τη συμμετοχή της ήδη υπάρχουσας δυναμικότητας στο μοντέλο, κάτι που σημαίνει πως οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, οι οποίες έχουν σχεδόν μηδενικό οριακό κόστος, μειώνουν τις ώρες λειτουργίας των κυρίαρχων στο ενεργειακό μείγμα θερμοηλεκτρικών σταθμών που τροφοδοτούνται από άνθρακα και φυσικό αέριο. Αντίθετα για τα MOA GCAM και GEMINI-E3 οι συντελεστές δυναμικότητας είναι σταθεροί για κάθε τεχνολογία σε όλες τις προσομοιώσεις. Αυτό σημαίνει ότι η πρόσθετη δυναμικότητα παραγωγής μιας τεχνολογίας ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, είτε υποκαθιστά την προσθήκη δυναμικότητας όλων των υπολοίπων τεχνολογιών (συμπεριλαμβανομένων των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας), είτε αυξάνει τη δυναμικότητα για όλες τις άλλες τεχνολογίες (συμπεριλαμβανομένων των τεχνολογιών ορυκτών καυσίμων) στην περίπτωση που η οικονομική επιδότηση οδηγήσει σε σημαντική μείωση των τιμών ενέργειας. Η τελευταία παρατήρηση γίνεται εμφανής μόνο στο MOA GCAM. Για την μετρική της απασχόλησης, οι διαφορές είναι λιγότερο έντονες, και ο κύριος λόγος για τον οποίο ξεχωρίζουν τα αποτελέσματα του GEMINI – E3 είναι η κυριαρχία των φωτοβολταϊκών στα χαρτοφυλάκια, τεχνολογία η

Κεφάλαιο 8. Εφαρμογή βελτιωμένου αλγορίθμου πολυστοχικής βελτιστοποίησης και ολοκλήρωση με MOA για τη μεγιστοποίηση των κλιματικών και κοινωνικών ωφελειών των πακέτων ανάκαμψης από τον COVID-19

οποία συγκαταλέγεται στις τεχνολογίες υψηλότερης έντασης εργασίας ανά μονάδα χρηματοδότησης.

8.4 Συμπεράσματα

Η παρούσα μελέτη διερευνά τον τρόπο βέλτιστης κατανομής των ανακοινωθέντων πακέτων ανάκαμψης από τον COVID – 19 σε έξι ισχυρές παγκόσμιες οικονομίες, με σκοπό τη μείωση των εκπομπών και τη δημιουργία νέων θέσεων εργασίας και καταδεικνύει τη συνεισφορά που μπορεί να έχουν οι εν λόγω χρηματοδοτήσεις σε καθέναν από τους παραπάνω στόχους. Τα αποτελέσματα δείχνουν πως για κάποιες περιοχές (ΕΕ, Κίνα, Ιαπωνία και Καναδά) τα πακέτα στήριξης μπορούν να συμβάλλουν σημαντικά στην κατεύθυνση εκπλήρωσης των στόχων, μεμονωμένα ή και παράλληλα, ενώ για τις υπόλοιπες περιοχές (ΗΠΑ και Ινδία) δεν επαρκούν. Για την πρόοδο προς τη μείωση των εκπομπών, τα πακέτα ανάκαμψης δεν επαρκούν για την κάλυψη των στόχων στα επίπεδα των 2°C, εύρημα που έρχεται σε αντίθεση με τα σενάρια πράσινης ανάκαμψης των MOA που δημοσιεύτηκαν πριν την ανακοίνωση των ποσών που κατευθύνονται προς την πράσινη ανάπτυξη (Andrijevic et al., 2020; Forster et al., 2020; Pollitt et al., 2021). Ο κύριος λόγος των διαφοροποιήσεων είναι ότι οι εργασίες αυτές χρησιμοποιούν πολύ μεγαλύτερα ποσά σε σχέση την παρούσα μελέτη, και ότι η παρούσα μελέτη επικεντρώνεται μόνο στους τομείς της ενέργειας και των βιοκαυσίμων. Μια άλλη σημαντική διαφορά μεταξύ της παρούσας ανάλυσης και των προηγούμενων εργασιών είναι η αξιολόγηση των επιδράσεων των πακέτων επιδότησης ως επιπρόσθετες στην επίδραση των ως τώρα ισχυρόνων πολιτικών. Σε αυτό το κομμάτι, οι έως τώρα εργασίες προσδιορίζουν το επενδυτικό χάσμα αξιολογώντας τις διαφορές στις επενδύσεις χαμηλών εκπομπών άνθρακα μεταξύ προϋπαρχόντων, συμβατών με τη συνθήκη του Παρισιού, σεναρίων αναφοράς, χωρίς να λάβουν υπόψη τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ των υφιστάμενων πολιτικών (Tanaka et al., 2021). Όσον αφορά τη μετρική της απασχόλησης, η συνολική αξιολόγηση στην παρούσα εργασία εστιάζει περισσότερο στα βραχυπρόθεσμα κέρδη απασχόλησης σε σχέση με άλλες μελέτες, όπως η Pollitt et al. (2021), ενώ είναι δύσκολο να γίνει μια απόλυτη σύγκριση των επιδόσεων καθ' αυτών, λόγω της μεγάλης απόκλισης στο ύψος των πακέτων ανάκαμψης που έχουν χρησιμοποιηθεί.

Κεφάλαιο 8. Εφαρμογή βελτιωμένου αλγορίθμου πολυστοχικής βελτιστοποίησης και ολοκλήρωση με MOA για τη μεγιστοποίηση των κλιματικών και κοινωνικών ωφελειών των πακέτων ανάκαμψης από τον COVID-19

Από την ανάλυση των βέλτιστων χαρτοφυλακίων τεχνολογιών που προκύπτουν ως αποτέλεσμα της μελέτης, προτείνεται η επένδυση σε ποσοστό άνω του 50% των εξεταζόμενων πακέτων ανάκαμψης στην χρηματοδότηση φωτοβολταϊκών, και σε ποσοστό άνω του 10% σε χερσαία αιολικά πάρκα, ενώ οι επενδύσεις σε άλλες τεχνολογίες καθαρής ενέργειας εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από την εξεταζόμενη περιοχή, τον στόχο βελτιστοποίησης και το MOA. Σε αυτό το σημείο είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι υπήρξε ένα σύνολο παραγόντων, όπως προβλήματα σχετικά με τον εφοδιασμό των πρώτων υλών κατασκευής και η γρήγορη ανάκαμψη της ζήτησης - η οποία τροφοδοτήθηκε και από μέτρα τόνωσης της οικονομίας-, οι οποίοι προκάλεσαν σημαντική αύξηση τιμών σε πολλά υλικά κατά τη διάρκεια του 2021 (CRS, 2021; European Parliament, 2021) επηρεάζοντας το κόστος των φωτοβολταϊκών και αιολικών έργων σε όλο τον κόσμο κατά 16 -70% και 10-25%, αντίστοιχα (IEA, 2021c). Η συγκεκριμένη επιρροή των πολιτικών ανάκαμψης δε λήφθηκε υπόψη στην παρούσα ανάλυση, καθώς επίσης είναι γεγονός πως στα MOA εντοπίζεται αδυναμία αναπαράστασης των διαφορετικών υλικών και της εφοδιαστικής αλυσίδας (Nikas et al., 2022).

Σε επίπεδο ανάλυσης των αποτελεσμάτων μεταξύ των διαφορετικών μοντέλων, διαφαίνονται διαφορές οι οποίες σχετίζονται με τα διαφορετικά χαρακτηριστικά και μηχανισμούς επίλυσης του κάθε μοντέλου. Για παράδειγμα, στην περίπτωση της αντικειμενικής συνάρτησης για μείωση των εκπομπών, το χαρτοφυλάκιο τεχνολογιών με την υψηλότερη επίδοση στην μείωση των εκπομπών που προκύπτει από ανάλυση των αποτελεσμάτων του GCAM για την περιοχή της Κίνας, εμφανίζει χαμηλότερη επίδοση σε σχέση με την επίδοση του αντίστοιχου χαρτοφυλακίου του MOA GEMINI-E3, το οποίο αντίστοιχα έχει χαμηλότερη επίδοση σε σχέση με τα αποτελέσματα του MOA TIAM. Οι πιο σημαντικοί λόγοι που εξηγούν αυτές τις έντονες διαφορές είναι: α) οι διαφορετικοί μηχανισμοί επίλυσης, οι οποίοι επηρεάζουν την αποτελεσματικότητα κάθε πρόσθετης μονάδας επιδότησης σε μία συγκεκριμένη τεχνολογία, και β) ο τρόπος με τον οποίο μοντελοποιείται η επιλογή της εισόδου κάθε τεχνολογίας στην αγορά ηλεκτρικής ενέργειας (π.χ. με σταθερούς ή μεταβλητούς συντελεστές δυναμικότητας). Δεδομένου ότι κανένα από τα εξεταζόμενα MOA δεν μπορεί αντικειμενικά να ταξινομηθεί ως καλύτερο ή χειρότερο για τους τύπους αναλύσεων της παρούσας

Κεφάλαιο 8. Εφαρμογή βελτιωμένου αλγορίθμου πολυστοχικής βελτιστοποίησης και ολοκλήρωση με MOA για τη μεγιστοποίηση των κλιματικών και κοινωνικών ωφελειών των πακέτων ανάκαμψης από τον COVID-19

διατριβής, η ένταξη διαφορετικών MOA στα πλαίσια της ανάλυσης θα πρέπει να θεωρείται ως σημαντική προϋπόθεση για την αποτύπωση ολόκληρου του χώρου λύσης ενός συγκεκριμένου ερευνητικού ερωτήματος, καθώς η έλλειψη τέτοιας ποικιλομορφίας μπορεί να δώσει λανθασμένα την αίσθηση ακρίβειας στις λύσεις, η οποία στην πραγματικότητα είναι μονομερής και απουσιάζει. Επομένως, είναι ιδιαίτερα σημαντική και χρήσιμη η ένταξη στα πλαίσια της παρούσας εφαρμογής των αποτελεσμάτων και από τα τρία MOA, ως επέκταση της μεθοδολογίας των υπολοίπων εφαρμογών της παρούσας διατριβής, προκειμένου να ληφθούν εύρωστα αποτελέσματα και αξιόπιστα συμπεράσματα από τους φορείς χάραξης πολιτικής.

Κεφάλαιο 9

9 Συμπεράσματα και προοπτικές

Από τις καθημερινές αποφάσεις έως τις αποφάσεις για παγκόσμια ζητήματα ο άνθρωπος αποφασίζει με γνώμονα πολλά και συχνά αλληλοσυγκρουόμενα κριτήρια. Ως εκ τούτου, τα μονοστοχικά μοντέλα βελτιστοποίησης δίνουν τη θέση τους σε πολυστοχικά μοντέλα όπου η έννοια της βέλτιστης λύσης δεν υπάρχει. Στα πολυστοχικά μοντέλα, η λύση που αναζητείται είναι η, σύμφωνα με τον αποφασίζοντα, «βέλτιστη» λύση. Έτσι, οι μέθοδοι επίλυσης των προβλημάτων πολυστοχικής βελτιστοποίησης δεν είναι «μαύρα κουτιά» στα οποία ο αποφασίζων δεν επεμβαίνει και απλώς αποδέχεται τα αποτελέσματα που προκύπτουν, αλλά στην ουσία συστήματα υποστήριξης αποφάσεων, στα οποία ο αποφασίζων εμπλέκεται άμεσα, κάνοντας την όλη διαδικασία πολύ πιο ενδιαφέρουσα. Ο αποφασίζων εξετάζει τις πληροφορίες που του δίνουν, προβληματίζεται, συγκρίνει, κατανοεί καλύτερα το πρόβλημα και τελικά είναι αυτός που παίρνει την απόφαση επιλέγοντας την πορεία που θα ακολουθήσει. Ταυτόχρονα, απαίτηση των σύγχρονων προβλημάτων λήψης απόφασης δεν είναι μόνο η εύρεση των βέλτιστων λύσεων, αλλά και η δυνατότητα επίτευξης της βελτιστοποίησης εντός περιορισμένου χρόνου και με συγκεκριμένο υπολογιστικό κόστος.

Στα πλαίσια της παρούσας διατριβής τα επιλεγέντα προβλήματα βελτιστοποίησης επιλύονται επεκτείνοντας μια ευρέως καθιερωμένη μέθοδο γραμμικού ακέραιου προγραμματισμού, τη μέθοδο Augmecon. Είναι γεγονός πως ο ακέραιος προγραμματισμός μπορεί να εφαρμοστεί σε ένα ευρύ φάσμα πρακτικών προβλημάτων και αποτελεί ένα ισχυρό πλαίσιο μοντελοποίησης που δίνει μεγάλη ευελιξία στην έκφραση διακριτών προβλημάτων βελτιστοποίησης. Σε αυτό το πλαίσιο, η δυνατότητα διαχείρισης ακεραίων μεταβλητών αποτελεί μια πολύ χρήσιμη, αν και απαιτητική, δυνατότητα που μπορεί να διευρύνει σημαντικά το πεδίο εφαρμογής του πολυκριτηριακού γραμμικού προγραμματισμού. Ο προτεινόμενος στην παρούσα

διατριβή αλγόριθμος βελτιστοποίησης προσφέρει τη δυνατότητα παραγωγής του πλήρους και ακριβούς συνόλου λύσεων προβλημάτων ακέραιου γραμμικού προγραμματισμού, και λόγω της αυξημένης υπολογιστικής του ικανότητας, είναι αποτελεσματικός και στην επίλυση προβλημάτων μη ακεραίων μεταβλητών, με την μετατροπή τους σε ακέραιες πολλαπλασιάζοντας με κατάλληλες δυνάμεις του δέκα. Ταυτόχρονα η υλοποίηση του προτεινόμενου αλγορίθμου σε *rython*, επιπρόσθετα της υλοποίησης σε περιβάλλον GAMS όπου αρχικά αναπτύχθηκε ο αλγόριθμος της *Augmeco*, προσφέρει μια ευρεία επιλογή πρόσθετων βιβλιοθηκών με καλύτερες δυνατότητες για την προ- και μετα-επεξεργασία δεδομένων, καθώς και για την οπτικοποίηση των αποτελεσμάτων, δίνοντας μεγαλύτερη ευελιξία επίλυσης. Η χρήση της *rython* αποδείχθηκε ένα εύχρηστο και ευέλικτο εργαλείο ως προς την παραμετροποίηση του μοντέλου ή/ και των περιορισμών του, το οποίο θα ήταν δύσκολο να υλοποιηθεί στο GAMS.

Το επόμενο ζήτημα που αφορά την επίλυση προβλημάτων πολυστοχικής βελτιστοποίησης και αντιμετωπίζεται στα πλαίσια της παρούσας διατριβής, είναι η ύπαρξη αβεβαιότητας ως προς τις παραμέτρους του προβλήματος. Προκειμένου να αντιμετωπισθεί αυτή η αβεβαιότητα, η οποία συχνά οφείλεται στην ασάφεια και στην έλλειψη ακρίβειας στον καθορισμό των παραμέτρων, αναπτύχθηκαν κατάλληλες μεθοδολογίες διαχείρισης αβεβαιότητας, τις οποίες υποστηρίζει τεχνικά ο αναπτυγμένος αλγόριθμος. Για παράδειγμα, η βελτίωση της απόδοσης επίλυσης του προτεινόμενου αλγορίθμου δίνει στον χρήστη τη δυνατότητα να πραγματοποιήσει πολλαπλές επαναλαμβανόμενες εκτελέσεις του μοντέλου, οι οποίες σε μεγάλα προβλήματα ήταν αδύνατο να πραγματοποιηθούν με τα διαθέσιμα στη βιβλιογραφία εργαλεία. Η ενσωμάτωση δυνατότητας επαναλαμβανόμενης επίλυσης του προβλήματος, με διαφορετικές τιμές εισόδου, καθιστά τον αποφασίζοντα ενήμερο για την ευαισθησία των παραγόμενων λύσεων σε μεταβολές των εισόδων, πληροφορία ιδιαίτερα χρήσιμη σε πλήθος εφαρμογών, όπου η μοντελοποίηση του προβλήματος δε δύναται να είναι επακριβής. Παράλληλα, η δυνατότητα εύκολης επιλογής των παραμέτρων στοχαστικής προσομοίωσης και η ανάπτυξη κατάλληλης ρουτίνας μετεπεξεργασίας δεδομένων που συλλέγει τα αποτελέσματα των πολλαπλών εκτελέσεων μοντέλου και τα καθιστά προσβάσιμα για περαιτέρω ανάλυση σε διάφορες μορφές εξόδου, επιτρέπει στους χρήστες, πέρα από την εύκολη ανάλυση και

αξιολόγηση της ευαισθησίας των παραγόμενων λύσεων, την περαιτέρω σύνδεση με εργαλεία της επιλογής τους.

Αξιοποιώντας τα πλεονεκτήματα της αναπτυγμένης μεθόδου βελτιστοποίησης, αυτή εντάσσεται σε ένα σύνολο ολοκληρωμένων μεθοδολογιών επίλυσης πραγματικών προβλημάτων πολυστοχικής βελτιστοποίησης κλιματικών στρατηγικών υπό αβεβαιότητα. Βασικός σκοπός των παρουσιαζόμενων εφαρμογών, πέρα της καθαρής υπόδειξης λύσεων σε επίπεδο πολιτικής, είναι να υποστηρίξουν τον προβληματισμό των εμπειρογνομόνων εμπλεκοντάς τους στη διαδικασία απόφασης, να μελετήσουν τα ανακύπτοντα προβλήματα από διάφορες πλευρές – κριτήρια αξιολόγησης και να καταδείξουν τις δυνατότητες της εκάστοτε εφαρμοζόμενης μεθοδολογίας ως προς την παραγωγή εύρωστων λύσεων. Οι παρουσιαζόμενες εφαρμογές είναι τρεις και σε μεθοδολογικό επίπεδο εφαρμόζονται συμπληρωματικά, απαντώντας η κάθε μία στις εντοπιζόμενες ανάγκες βελτίωσης της προηγούμενης και επεκτείνοντας την αξία της.

Η πρώτη εξ αυτών, λαμβάνοντας υπόψη τις εθνικές δεσμεύσεις για αύξηση της ενεργειακής αποδοτικότητας και μη παραβλέποντας τις αβεβαιότητες της ελληνικής πραγματικότητας που απειλούν την επιτυχή υλοποίηση των μέτρων που σχετίζονται με τις εν λόγω δεσμεύσεις, προτείνει ένα ολοκληρωμένο πλαίσιο πολυστοχικής αξιολόγησης μέτρων πολιτικής ενεργειακής απόδοσης, το οποίο εμπλέκει άμεσα και αποτελεσματικά τον ανθρώπινο παράγοντα στη διαδικασία λήψης απόφασης. Με βάση τα χαρακτηριστικά του προβλήματος, η μεθοδολογία της πρώτης αυτής εφαρμογής κρίνεται επιτυχής ως προς την αξιολόγηση κλιματικών στρατηγικών σε εθνικό επίπεδο, οι οποίες εξετάζονται σε βραχυπρόθεσμο ορίζοντα και αξιολογούνται υπό κριτήρια που βασίζονται στην οικονομική απόδοση της επένδυσης, στο σχετιζόμενο ρίσκο, και στην αποδοτικότητά της ως προς την εξοικονόμηση ενέργειας. Ως προς τη διαχείριση της αβεβαιότητας που συνδέεται με τη διαδικασία λήψης απόφασης, η ένταξη της ανθρώπινης γνώσης για την αποτύπωση και αξιολόγηση των σημαντικότερων κινδύνων που σχετίζονται με το υπό εξέταση πακέτο μέτρων κρίνεται επιτυχής και πλήρης. Η υπολειπόμενη αβεβαιότητα, η οποία προσεγγίζεται ως μία έλλειψη γνώσης που δεν μπορεί να μεταφραστεί στην μορφή συγκεκριμένων κινδύνων, αποτελεί την αφορμή για την ένταξή της στο μοντέλο βελτιστοποίησης ως στοχαστική αβεβαιότητα, έναντι της οποίας τα αποτελέσματα του μοντέλου δοκιμάζονται μέσω της τεχνικής προσομοίωσης Monte Carlo, τεχνική η οποία, λόγω

της αποτελεσματικότητάς της και της ευκολίας εφαρμογής, επιλέγεται ως βάση για την εξέταση της αβεβαιότητας στο σύνολο των εφαρμογών της διατριβής και προτείνεται από την παρούσα διατριβή ως μια αξιόπιστη μεθοδολογία παραγωγής βέλτιστων στρατηγικών υπό συνθήκες αβεβαιότητας που μπορεί να αποτελέσει ένα πολύ χρήσιμο εργαλείο σε πληθώρα εφαρμογών. Ως προς τον εντοπισμό πιθανών προεκτάσεων της συγκεκριμένης εφαρμογής κρίνεται σημαντική η επαρκής μοντελοποίηση και ένταξη των κοινωνικοοικονομικών προκλήσεων που συνδέονται με τις εξεταζόμενες πολιτικές στα κριτήρια αξιολόγησης, πρόταση η οποία έχει συμπεριληφθεί στην τρίτη εφαρμογή της διατριβής προκειμένου να διασφαλιστεί η πληρότητα του προτεινόμενου μεθοδολογικού πλαισίου.

Η δεύτερη εφαρμογή επιτυγχάνει την ενσωμάτωση της επιλεγμένης μεθόδου πολυστοχικής βελτιστοποίησης σε ένα ολοκληρωμένο μεθοδολογικό πλαίσιο που προτείνεται για την επίλυση ενός τριστοχικού προβλήματος βελτιστοποίησης, τα αποτελέσματα του οποίου καταπονούνται τόσο έναντι σεναρίων αναφοράς τα οποία προσομοιώνουν τα κοινά κοινωνικοοικονομικά μονοπάτια, αλλά και έναντι στοχαστικής αβεβαιότητας για κάθε ένα εκ των σεναρίων αυτών. Έτσι, γίνεται σαφές πως η προτεινόμενη μέθοδος πολυστοχικής βελτιστοποίησης μπορεί να εφαρμοστεί σε συνδυαστικές προσεγγίσεις αναφορικά με την θεωρηθείσα φύση της αβεβαιότητας. Ταυτόχρονα, η συγκεκριμένη μεθοδολογία προτείνει τη δυεπίπεδη σύνδεση της μεθόδου βελτιστοποίησης και ενός μοντέλου κλίματος -οικονομίας και δίνει στους φορείς χάραξης πολιτικής ένα ολοκληρωμένο εργαλείο για την αντιμετώπιση περιβαλλοντικών και ενεργειακών προβλημάτων, διευκολύνοντας την ανταλλαγή δεδομένων εισόδου και αποτελεσμάτων των μοντέλων. Η χρησιμότητα του εργαλείου γίνεται εμφανής στο πλαίσιο μιας εφαρμογής η οποία εφαρμόζεται σε περιφερειακό επίπεδο και αξιολογείται τόσο σε βράχυ – όσο και μεσοπρόθεσμο χρονικό ορίζοντα, με σκοπό να διερευνηθούν στρατηγικές που συνεισφέρουν ταυτόχρονα στον μετριασμό της κλιματικής αλλαγής, στην αύξηση της πρόσβασης σε καθαρή και σύγχρονης μορφής ενέργεια και στη μείωση της έκθεσης στην ατμοσφαιρική ρύπανση, μεγέθη που συμπεριλαμβάνονται στους στόχους βιώσιμης ανάπτυξης του ΟΗΕ. Ορμώμενοι από την επιτυχή σύνδεση του μοντέλου βελτιστοποίησης και του ΜΟΑ, και δεδομένης της αξίας της προτεινόμενης ολοκληρωμένης προσέγγισης, στην οποία διαφορετικές μεθοδολογίες συμπληρώνουν η μία την άλλη προκειμένου να δώσουν εύρωστα

αποτελέσματα που χαίρουν ευρείας αποδοχής και εμπιστοσύνης, μπορούμε να συμπεράνουμε ότι η πρόταση της συγκεκριμένης εφαρμογής δύναται να είναι ιδιαίτερα ωφέλιμη στη διαμόρφωση κλιματικής πολιτικής. Ταυτόχρονα, ωστόσο, και λαμβάνοντας υπόψη τη ποικιλομορφία των διαφόρων ΜΟΑ, αναγνωρίζεται ότι αποτελεί σπουδαία πρόκληση αλλά και σημαντική μελλοντική προοπτική της συγκεκριμένης εφαρμογής, η σύνδεση του μοντέλου βελτιστοποίησης με περισσότερα του ενός μοντέλα κλίματος-οικονομίας και η συγκριτική αξιολόγηση των αποτελεσμάτων τους, προκειμένου να ενισχυθεί η ευρωστία των λύσεων. Αυτή την πρόκληση επιχειρεί να απαντήσει μεταξύ άλλων η τρίτη εφαρμογή της παρούσας διατριβής.

Η τρίτη εφαρμογή αποδεικνύει πως ο προτεινόμενος αλγόριθμος πολυστοχικής βελτιστοποίησης μπορεί να ενοποιηθεί με ΜΟΑ διαφορετικής μαθηματικής δομής και οικονομετρικής προσέγγισης, συνεισφέροντας στη διαχείριση της αβεβαιότητας των αποτελεσμάτων της ανάλυσης που προκύπτει από τα διαφορετικά χαρακτηριστικά και μηχανισμούς επίλυσης του κάθε μοντέλου, καθώς η έλλειψη τέτοιας ποικιλομορφίας μπορεί να δώσει λανθασμένα την αίσθηση ακρίβειας στις λύσεις, η οποία στην πραγματικότητα είναι μονομερής και απουσιάζει. Σε δεύτερο επίπεδο, υλοποιείται η ένταξη κοινωνικών κριτηρίων στην ανάλυση βελτιστοποίησης με τη σύνδεση των τριών ΜΟΑ με βάσεις δεδομένων για τους συντελεστές απασχόλησης, οι οποίες παρέχουν αναλυτικά δεδομένα ανά κατηγορία τεχνολογικών παρεμβάσεων. Η συγκεκριμένη ένταξη συνεισφέρει, ταυτόχρονα, στην αύξηση της αξιοπιστίας των αποτελεσμάτων, αντιμετωπίζοντας τις επικρίσεις που συχνά δέχονται τα ΜΟΑ σχετικά με τη συνθετότητα στη μοντελική αναπαράσταση των αλληλεπιδράσεων κλίματος-οικονομίας και την αναπαράσταση δεδομένων σχετικά με την εργασία. Παράλληλα, σε επίπεδο εφαρμογής απαντάται ένα επίκαιρο ερώτημα πολιτικής που μελετά τον τρόπο βέλτιστης κατανομής των ανακοινωθέντων πακέτων ανάκαμψης από τον COVID – 19 σε έργα πράσινης ενέργειας με σκοπό τη μείωση των εκπομπών και τη δημιουργία νέων θέσεων εργασίας και καταδεικνύει τη συνεισφορά που μπορεί να έχουν οι εν λόγω χρηματοδοτήσεις σε καθέναν από τους παραπάνω στόχους σε έξι ισχυρές παγκόσμιες οικονομίες, διευρύνοντας την εφαρμογή της προτεινόμενης μεθοδολογίας σε διαφορετικές γεωγραφικές κλίμακες.

Τελικά γίνεται σαφές πως η προτεινόμενη μέθοδος πολυστοχικής βελτιστοποίησης μπορεί να εφαρμοστεί σε συνδυαστικές προσεγγίσεις αναφορικά με την θεωρηθείσα φύση της αβεβαιότητας (π.χ. μέσω της κατασκευής σεναρίων, της αξιοποίησης στοχαστικών κατανομών για έναν αριθμό παραμέτρων και της ένταξης διαφορετικών ΜΟΑ στα πλαίσια της ανάλυσης), και δύναται να ενοποιηθεί, τόσο με προσεγγίσεις για την αξιοποίηση της ποιοτικής πληροφορίας πολλαπλών ενδιαφερόμενων φορέων ή αποφασιζόντων (π.χ. προσεγγίσεις πολυκριτήριας αξιολόγησης κινδύνου) ενισχύοντας την ενεργό συμμετοχή τους στις επιστημονικές διεργασίες, όσο και με διαφορετικά μοντέλα κλίματος-οικονομίας, προσεγγίσεις οι οποίες και οι δύο αυξάνουν την ευρωστία των μοντέλων και των αποτελεσμάτων τους. Ταυτόχρονα, οι παρουσιαζόμενες εφαρμογές τοποθετούνται μεταξύ διαφορετικών χωρών ή και γεωγραφικών επιπέδων, δηλώνοντας την αποτελεσματικότητα των αναφερόμενων προσεγγίσεων μεταξύ διαφορετικών οικονομικών, κοινωνικών, πολιτικών και περιβαλλοντικών παραγόντων, οι οποίοι και διαμορφώνουν ένα μεταβλητό πρότυπο κινδύνων, ευκαιριών και προκλήσεων για τη διάχυση των πράσινων τεχνολογιών και των σχετικών δράσεων. Οι εφαρμογές επίσης αποδεικνύουν την ικανότητα του προτεινόμενου πλαισίου στην αποτελεσματική ανάλυση των διαφορετικών διαστάσεων της κλιματικής αλλαγής και δράσης, αναγνωρίζοντας την επίδραση και εντάσσοντας στην ανάλυση διαφορετικούς παράγοντες όπως οι στόχοι βιώσιμης ανάπτυξης και τα κοινωνικοοικονομικά μονοπάτια. Με τον τρόπο αυτό, η παρούσα έρευνα μπορεί να οδηγήσει σε βιώσιμες οικονομικά, αποδοτικές τεχνολογικά, και αποδεκτές κοινωνικά, εύρωστες και αποτελεσματικές συστάσεις πολιτικής στην προσπάθεια αντιμετώπισης και μετριασμού της κλιματικής αλλαγής. Στο σημείο αυτό είναι επίσης σημαντικό να τονιστεί πως ο προτεινόμενος στην παρούσα διδακτορική διατριβή αλγόριθμος δεν περιορίζονται αναγκαστικά στο εξεταζόμενο πεδίο μελέτης, καθώς δύναται να εφαρμοστεί σε οποιαδήποτε εφαρμογή απαιτεί αξιολόγηση πολλαπλών στόχων και μπορεί να εκφραστεί ή να μετατραπεί σε πρόβλημα ακέραιου γραμμικού προγραμματισμού.

Επιπλέον χαρακτηριστικά που δύναται να ενισχύσουν την παρούσα τεχνική υλοποίηση αφορούν α) σε επίπεδο βελτίωσης της αλληλεπίδρασης με τον χρήστη: τη διευκόλυνση εισόδου των δεδομένων των προβλημάτων, μέσω ανάπτυξης ολοκληρωμένης διεπαφής για το χρήστη β) ως προς την αυτοματοποίησης της

επίλυσης: την πλήρη ανεξαρτητοποίηση της επίλυσης της μεθόδου από την είσοδο του μοντέλου και την επεξεργασία των δεδομένων γ) ως προς τη διεύρυνση του πεδίου εφαρμογής: την επέκταση του εργαλείου για την επίλυση προβλημάτων πέραν του ακέραιου προγραμματισμού δ) ως προς τις επιλογές επίλυσης: τη δυνατότητα επιλογής του βήματος κατά την περιήγηση στο πλέγμα επίλυσης, παραμετροποιώντας την επιλογή του επιθυμητού βήματος, επιλογή η οποία αποδεικνύεται ιδιαίτερα σημαντική στην επίλυση μεγάλων προβλημάτων, όπου ο συμβιβασμός ανάμεσα στη δυνατότητα έγκαιρης επίλυσης και παραγωγής του πλήρους συνόλου λύσεων είναι απαραίτητος ε) σχετικά με τον χειρισμό των εξόδων: την επέκταση της δυνατότητας διαγραμματικής απεικόνισης των λύσεων σε περιπτώσεις προβλημάτων περισσότερων των τριών κριτηρίων και την ένταξη της ανάλυσης αποτελεσμάτων εντός ολοκληρωμένης διεπαφής. Τα παραπάνω χαρακτηριστικά αναγνωρίζονται σαφώς ως σημαντικές προεκτάσεις της παρούσας έρευνας, ωστόσο αυτά παρουσιάζονται περισσότερο ως τρόπος δημιουργίας προστιθέμενης αξίας, παρά για την κάλυψη κάποιας ουσιαστικής λειτουργικής ανάγκης της προτεινόμενης υλοποίησης.

Βιβλιογραφία

- ACCES (2014) 'Clean and Improved Cooking in Sub-Saharan Africa: A Landscape Report', (98664), p. 182. doi: 98664.
- Adabi, F., Mozafari, B., Ranjbar, A. M., & Soleymani, S. (2016). Applying portfolio theory-based modified ABC to electricity generation mix. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 80, 356-362.
- Agbemabiese, L. and Nkomo, J. (2012) 'Enabling innovations in energy access: An African perspective', *Energy Policy*. Elsevier, 47, pp. 38-47. doi: 10.1016/J.ENPOL.2012.03.051.
- Aksoy, Y. (1990). An interactive branch-and-bound algorithm for bicriterion nonconvex/mixed integer programming. *Naval Research Logistics*, σσ. 403-417.
- Albrecht, J. (2007). The future role of photovoltaics: A learning curve versus portfolio perspective. *Energy Policy*, 35(4), 2296-2304.
- Allan, G., Eromenko, I., McGregor, P., & Swales, K. (2011). The regional electricity generation mix in Scotland: A portfolio selection approach incorporating marine technologies. *Energy Policy*, 39(1), 6-22.
- Alves, M. J., & Climaco, J. (1999, 117 (3)). Using cutting planes in an interactive reference point approach for multiobjective integer linear programming problems. *European Journal of Operational Research*, σσ. 565-577.
- Alves, M., & Climaco, J. (2007). A Review of interactive methods for multiobjective integer and mixed-integer programming. . *European Journal of Operational Research*, 180, 99-115.

- Anderson, D., Sweeney, D., Williams, T., Camn, J., & Cochran, J. (2015). An Introduction to Management Science: Quantitative Approaches to Decision Making, 14th edition. Boston, MA: Cengage learning.
- Andrijevic, M., Schleussner, C.-F., Gidden, M. J., McCollum, D. L., & Rogelj, J. (2020). COVID-19 recovery funds dwarf clean energy investment needs. *Science*, 370(6514), 298–300. <https://doi.org/10.1126/science.abc9697>
- Angelopoulos, D., Doukas, H., Psarras, J., & Stamtsis, G. (2017). Risk-based analysis and policy implications for renewable energy investments in Greece. *Energy Policy*, 105, 512–523. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2017.02.048>
- Arancibia, A. L., Marques, G. F., & Mendes, C. A. B. (2016). Systems capacity expansion planning: Novel approach for environmental and energy policy change analysis. *Environmental modelling & software*, 85, 70-79.
- Aras, N., & Yurdakul, A. (2016). A new multi-objective mathematical model for the high-level synthesis of integrated circuits. *Applied Mathematical Modelling*, 40(3), 2274-2290.
- Arratia M., Schaeffer, S. E., & Cruz-Reyes, L. (2016). Static R&D project portfolio selection in public organizations. *Decision support systems*, 84, 53-63.
- Attia, A. M., Ghaithan, A. M., & Duffuaa, S. O. (2019). A Multi-Objective Optimization Model for Tactical Planning of Upstream Oil & Gas Supply Chains. *Computers & Chemical Engineering*.
- Aven, T. (2016). Risk assessment and risk management: Review of recent advances on their foundation. *European Journal of Operational Research*, 253(1), 1-13. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2011.06.053>
- Bababeik, M., Khademi, N., & Chen, A. (2018). Increasing the resilience level of a vulnerable rail network: The strategy of location and allocation of emergency relief trains. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 119, 110-128.
- Bailis, R. et al. (2013) 'Innovation in charcoal production: A comparative life-cycle assessment of two kiln technologies in Brazil', *Energy for Sustainable*

- Development. *International Energy Initiative*, 17(2), pp. 189–200. doi: 10.1016/j.esd.2012.10.008.
- Bailis, R. et al. (2015) 'The carbon footprint of traditional woodfuels', *Nature Climate Change*, 5(3), pp. 266–272. doi: 10.1038/nclimate2491.
- Bal, A., & Satoglu, S. I. (2018). A goal programming model for sustainable reverse logistics operations planning and an application. *Journal of cleaner production*, 201, 1081-1091.
- Balachandran, M., & Gero, J. S. (1985). The noninferior set estimation (NISE) method for three objective problems. *Engineering Optimization*, 9(2), 77-88.
- Bazaraa, M. S., Jarvis, J. J., & Sherali, H. D. (1990). *Linear Programming and Network Flows*, 2nd edition. New York: Wiley.
- Bazilian, M., & Roques, F. (2008). Analytic methods for energy diversity and security. *Applications of Mean Variance Portfolio Theory. A tribute to Shimon Awerbuch*
- Behmanesh, R., & Zandieh, M. (2019). Surgical case scheduling problem with fuzzy surgery time: An advanced bi-objective ant system approach. *Knowledge-Based Systems*, 104913.
- Benayoun, R., de Montgolfier, J., Tergny, J., & Laritchev, O. (1971). Linear programming with multiple objective functions: Step method (stem). *Mathematical Programming*, 1 (1), 366-375.
- Benka-Coker, M. L. et al. (2018) 'A case study of the ethanol CleanCook stove intervention and potential scale-up in Ethiopia', *Energy for Sustainable Development*. The Authors, 46, pp. 53–64. doi: 10.1016/j.esd.2018.06.009.
- Ben-Tal, A. (1980). Characterization of Pareto and lexicographic optimal solutions. Στο G. Fandel, & T. Gal, *Multiple Criteria Decision Making Theory and Application* (σσ. 1-11). Heidelberg: Springer Berlin.

- Bistline, J. E. (2016). Energy technology R&D portfolio management: Modeling uncertain returns and market diffusion. *Applied Energy*, 183, 1181–1196. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.09.062>
- Bitran, G. (1977). Linear multiple objective programs with zero–one variables. *Mathematical Programming*, 13, 121–139.
- Bitran, G. (1979). Theory and algorithms for linear multiple objective programs with zero–one variables. *Mathematical Programming*, 17 (3), 362–389.
- Bitran, G., & Riviera, J. (1982). A combined approach to solve binary multicriteria problems. *Naval Research Logistics Quarterly*, 29 (2), 181–201.
- Bootaki, B., Mahdavi, I., & Paydar, M. M. (2014). A hybrid GA-AUGMECON method to solve a cubic cell formation problem considering different worker skills. *Computers & Industrial Engineering*, 75, 31-40.
- Bootaki, B., Mahdavi, I., & Paydar, M. M. (2016). New criteria for configuration of cellular manufacturing considering product mix variation. *Computers & Industrial Engineering*, 98, 413-426.
- Bradley, S., Hax, A., & Magnanti, T. (1977). *Applied Mathematical Programming*. Reading, MA: Addison-Wesley Publishing Company.
- Brand, B., & Missaoui, R. (2014). Multi-criteria analysis of electricity generation mix scenarios in Tunisia. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 39, 251-261.
- Bruce, N. et al. (2018) 'The Government-led initiative for LPG scale-up in Cameroon: Programme development and initial evaluation', *Energy for Sustainable Development*. The Authors, 46, pp. 103–110. doi: 10.1016/j.esd.2018.05.010.
- Bukarica, V., & Tomšić, Ž. (2017). Energy efficiency policy evaluation by moving from techno-economic towards whole society perspective on energy efficiency market. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 70, 968– 975. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.12.002>

- Bürer, M. J., & Wüstenhagen, R. (2008). Cleantech venture investors and energy policy risk: An exploratory analysis of regulatory risk management strategies. In *Sustainable Innovation and Entrepreneurship* (pp. 290–309). <https://doi.org/10.4337/9781848441552.00022>
- Buurman, J., & Babovic, V. (2016). Adaptation Pathways and Real Options Analysis: An approach to deep uncertainty in climate change adaptation policies. *Policy and Society*, 35(2), 137-150
- Büyüközkan, G., & Güleriyüz, S. (2017). Evaluation of Renewable Energy Resources in Turkey using an integrated MCDM approach with linguistic interval fuzzy preference relations. *Energy*, 123, 149-163.
- Camero, C., & Sowlati, T. (2016). Incorporating social benefits in multi-objective optimization of forest-based bioenergy and biofuel supply chains. *Applied Energy*, 178, 721-735.
- Camero, C., Sowlati, T., & Pavel, M. (2016). Economic and life cycle environmental optimization of forest-based biorefinery supply chains for bioenergy and biofuel production. *Chemical Engineering Research and Design*, 107, 218-235.
- Chalmet, L., Lemonidis, L., & Elzinga, D. (1986). An algorithm for the bi-criterion integer programming problem. *European Journal of Operational Research*, 25, 292–300.
- Chankong, V., & Haimes, Y. (1983). *Multiobjective Decision Making: Theory and Methodology*. New York: North-Holland.
- Charnes, A., & Cooper, W. (1961). *Management Models and Industrial Applications of Linear Programming*, Vol. I. New York: Wiley.
- Chen, C. T. (2000). Extensions of the TOPSIS for group decision-making under fuzzy environment. *Fuzzy sets and systems*, 114(1), 1-9. DOI: 10.1016/S0165-0114(97)00377-1

- Chen, T. Y., & Tsao, C. Y. (2008). The interval-valued fuzzy TOPSIS method and experimental analysis. *Fuzzy Sets and Systems*, 159(11), 1410-1428. DOI: 10.1016/j.fss.2007.11.004
- Ciarli, T., & Savona, M. (2019). Modelling the Evolution of Economic Structure and Climate Change: A Review. *Ecological Economics*, 158(July 2018), 51–64. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2018.12.008>
- Clarke, J. F., & Edmonds, J. A. (1993). Modelling energy technologies in a competitive market. *Energy Economics*, 15(2), 123–129. [https://doi.org/10.1016/0140-9883\(93\)90031-L](https://doi.org/10.1016/0140-9883(93)90031-L)
- Clemens, H. et al. (2018) 'Africa Biogas Partnership Program: A review of clean cooking implementation through market development in East Africa', *Energy for Sustainable Development*. Elsevier, 46, pp. 23–31. doi: 10.1016/J.ESD.2018.05.012.
- Climaco, J., Ferreira, C., & Captivo, M. (1997). Multicriteria integer programming: An overview of the different algorithmic approaches. Στο J. Climaco, *Multicriteria Analysis* (σσ. 248-258). Springer-Verlag.
- Climate Action Tracker. (2021). Warming Projections Global Update, November 2021. <https://climateactiontracker.org/global/temperatures/>
- CMIE. (2022). India's employment challenge. <https://unemploymentinindia.cmie.com/kommon/bin/sr.php?kall=wtabnav&tab=4080&nvdt=20220103135752816&nvpc=091000000000&nvtype=INSIGHTS>
- Coello Coello, C. (1999). A comprehensive survey of evolutionary-based multiobjective optimization techniques. *Knowledge and Information Systems: An International Journal*, 1(3), 269-308.
- Coello Coello, C. A., & Pulido, G. (2001). A micro-genetic algorithm for multiobjective optimization. Στο E. Zitzler, K. Deb, L. Thiele, C. A. Coello Coello, & D. Corne, *First International Conference on Evolutionary Multi-Criterion*

- Optimization, Lecture Notes in Computer Science, No 1993 (σσ. 126-140). Springer-Verlag.
- Cohon, J. (1978). *Multiobjective Programming and Planning*. New York: Academic Press.
- Cohon, J. L. (1978). *Multiobjective Programming and Planning*. Academic Press.
- Coibion, O., Gorodnichenko, Y., & Weber, M. (2020, April). Labor Markets During the COVID-19 Crisis: A Preliminary View. <https://doi.org/10.3386/w27017>
- Corne, D. W., Knowles, J. D., & Oates, M. J. (2000). The Pareto envelope-based selection algorithm for multiobjective optimization. Στο M. Schoenauer, K. Deb, G. Rudolph, X. Yao, E. Lutton, J. J. Merelo, & H. Schwefel, *Proceedings of the Parallel Problem Solving form Nature VI Conference* (σσ. 839-848). Paris, France.
- CRS. (2021). Inflation in the Wake of COVID-19. <https://crsreports.congress.gov/product/pdf/R/R46890>
- D'Alessandro, S., Cieplinski, A., Distefano, T., & Dittmer, K. (2020). Feasible alternatives to green growth. *Nature Sustainability*, 3(4), 329–335. <https://doi.org/10.1038/s41893-020-0484-y>
- Dabiri, N., Tarokh, M. J., & Alinaghian, M. (2017). New mathematical model for the bi-objective inventory routing problem with a step cost function: A multi-objective particle swarm optimization solution approach. *Applied Mathematical Modelling*, 49, 302-318.
- Dächert, K., Gorski, J., & Klamroth, K. (2012). An augmented weighted Tchebycheff method with adaptively chosen parameters for discrete bicriteria optimization problems. *Computers & Operations Research*, 39(12), 2929-2943.
- Dafnomilis, I., Chen, H.-H., Elzen, M., Fragkos, P., Chewpreecha, U., Van Soest, H., Fragkiadakis, K., Karkatsoulis, P., Paroussos, L., Boer, H. S. de, Daioglou, V., Edelenbosch, O., Kiss-Dobronyi, B., & Van Vuuren, D. (2021). Targeted

Green Recovery Measures in a Post-COVID-19 World Enable the Energy Transition. Research Square. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-667715/v1>

Dalla Longa, F. et al. (2018) 'Advancing Energy Access Modelling with Geographic Information System Data', *Environmental Modeling & Assessment*, 23(6), pp. 627–637. doi: 10.1007/s10666-018-9627-1.

Dantzig, G. (1951). Maximization of a Linear Function of Variables Subject to Linear Inequalities. Στο T. Koopmans, *Activity Analysis of Production and Allocation*, Cowles Commission Monograph. New York: Wiley.

Das, I., & Dennis, J. (1998). Normal Boundary Intersection: A new method for generating the Pareto surface in Nonlinear Multicriteria Optimization Problems. *SIAM Journal on Optimization*, 8(3), 631-657.

Deb, K. (1999). Evolutionary algorithms for multi-criterion optimization in engineering design. Στο C. Miettinen, M. Makella, P. Niittananmaki, & J. Pieraux, *Evolutionary Algorithms in Engineering and Computer Science* (σσ. 135-161). New York: John Wiley & Sons.

Deb, K. (2001). *Multi-Objective Optimization using Evolutionary Algorithms*. New York: John Wiley & Sons.

Deb, K., Pratap, A., Agarwal, S., & Meyarivan, T. (2002). A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 6(2), 182-197.

Deckro, R., & Winkofski, E. (1986). Solving zero-one multiple objective programs through implicit enumeration. *European Journal of Operational Research*, σσ. 12, 362-374.

Deckro, R., & Winkofsky, E. (1983). Solving zero-one multiple objective programs through implicit enumeration. *European Journal of Operational Research*, 12, 362–374.

- Dellink, R., Chateau, J., Lanzi, E., & Magné, B. (2017). Long-term economic growth projections in the Shared Socioeconomic Pathways. *Global Environmental Change*, 42, 200-214.
- Deluque, I., Shittu, E., Deason, J. (2018). Evaluating the reliability of efficient energy technology portfolios. *EURO J. Decis. Process.* 6, 115–138. <https://doi.org/10.1007/s40070-018-0077-4>
- Desa, U. N. (2016). Transforming our world: The 2030 agenda for sustainable development.
- Di Lullo, G., Zhang, H., & Kumar, A. (2016). Evaluation of uncertainty in the well-to-tank and combustion greenhouse gas emissions of various transportation fuels. *Applied Energy*, 184, 413-426.
- Distelkamp, M., & Meyer, M. (2019). Pathways to a Resource-Efficient and Low-Carbon Europe. *Ecological Economics*, 155, 88–104. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2017.07.014>
- Dóci, G., & Gotchev, B. (2016). When energy policy meets community: Rethinking risk perceptions of renewable energy in Germany and the Netherlands. *Energy Research & Social Science*, 22, 26–35. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2016.08.019>
- Domínguez-Ríos, M. Á., Chicano, F., Alba, E., del Águila, I., & del Sagrado, J. (2019). Efficient anytime algorithms to solve the bi-objective Next Release Problem. *Journal of Systems and Software*.
- Doukas, H. et al. (2018) 'From Integrated to Integrative: Delivering on the Paris Agreement', *Sustainability*, 10(7). doi: 10.3390/su10072299.
- EC, European Commission. (2015). COMMUNICATION FROM THE COMMISSION TO THE EUROPEAN PARLIAMENT AND THE COUNCIL The Paris Protocol – A blueprint for tackling global climate change beyond 2020/* COM/2015/081 final */
- EC, European Commission. (2019). COMMUNICATION FROM THE COMMISSION TO THE EUROPEAN PARLIAMENT, THE EUROPEAN COUNCIL, THE

COUNCIL, THE EUROPEAN ECONOMIC AND SOCIAL COMMITTEE AND
THE COMMITTEE OF THE REGIONS The European Green
Deal/COM/2019/640 final

- Ehrenstein, M., Wang, C. H., & Guillén-Gosálbez, G. (2019). Strategic planning of supply chains considering extreme events: Novel heuristic and application to the petrochemical industry. *Computers & Chemical Engineering*, *125*, 306-323.
- Ehrgott, M. (2005). *Multicriteria Optimization*. Berlin - Heidelberg: Springer.
- Ehrgott, M., & Gandibleux, X. (2000). A survey and annotated bibliography of multiobjective combinatorial optimization. *OR Spectrum*, *σσ. 22 (4)*, 425-460.
- Ehrgott, M., & Ryan, D. M. (2002). Constructing robust crew schedules with bicriteria optimization. *Journal of Multi-Criteria Decision Analysis*, *σσ. 139-150*.
- Elias, R. J. and Victor, D. G. (2005) 'Energy transitions in developing countries: a review of concepts and literature', Program on Energy and Sustainable Development, Working Paper. Stanford: Stanford University.
- Enevoldsen, P. (2016). Onshore wind energy in Northern European forests: Reviewing the risks. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *60*, 1251–1262. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.02.027>
- Eppen, G., Gould, F., Schmidt, C., Moore, J., & Weatherford, L. (1998). *Introductory Management Science: Decision Modeling with Spreadsheets*, 5th Edition. London: Pearson College Div.
- European Parliament. (2021). Rise in Inflation: Temporary or Sign of a More Permanent Trend? [https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/STUD/2021/695447/IPOL_STU\(2021\)695447_EN.pdf](https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/STUD/2021/695447/IPOL_STU(2021)695447_EN.pdf)
- Eurostat. (2020). September 2020 - Euro area unemployment at 8.3%. <https://ec.europa.eu/eurostat/documents/2995521/10663786/3-30102020-CP-EN.pdf/f93787e0-0b9a-e10e-b897-c0a5f7502d4e>

- Evans, G. (1984). An overview of techniques for multiobjective mathematical programs. *Management Science*, 30, 1268-1282.
- EY. (2020). A Green Covid-19 Recovery and Resilience Plan for Europe. https://assets.ey.com/content/dam/ey-sites/ey-com/it_it/news/2020/ey-summary-report-green-recovery-v2.pdf
- Falkner, R. (2016). The Paris Agreement and the new logic of international climate politics. *International Affairs*, 92(5), 1107-1125.
- Florios, K., & Mavrotas, G. (2014). Generation of the exact Pareto set in multi-objective traveling salesman and set covering problems. *Applied Mathematics and Computation*, 237, 1-19.
- Fonseca, C. M., & Fleming, P. (1993). Genetic algorithms for multiobjective optimization: Formulation, discussion and generalization. Στο S. Forest, Proceedings of the Fifth International Conference on Genetic Algorithms (San Mateo, California, July 1993) (σσ. 416-423). California: Morgan Kaufman.
- Fonseca, C. M., & Fleming, P. J. (1995). An overview of evolutionary algorithms in multiobjective optimization. *Evolutionary Computation*, 3(1).
- Forouli, A., Nikas, A., Van de Ven, D. J., Sampedro, J., & Doukas, H. (2020). A multiple-uncertainty analysis framework for integrated assessment modelling of several sustainable development goals. *Environmental Modelling and Software*, 131, 104795. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2020.104795>
- Forouzanfar, M. H. et al. (2016) 'Global, regional, and national comparative risk assessment of 79 behavioural, environmental and occupational, and metabolic risks or clusters of risks, 1990–2015: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2015', *The Lancet*. Elsevier, 388(10053), pp. 1659–1724. doi: 10.1016/S0140-6736(16)31679-8.
- Forster, P. M., Forster, H. I., Evans, M. J., Gidden, M. J., Jones, C. D., Keller, C. A., Lamboll, R. D., Quéré, C. Le, Rogelj, J., Rosen, D., Schleussner, C.-F., Richardson, T. B., Smith, C. J., & Turnock, S. T. (2020). Current and future

global climate impacts resulting from COVID-19. *Nature Climate Change*, 10(10), 913–919. <https://doi.org/10.1038/s41558-020-0883-0>

Fouquet, R. (2010) 'The slow search for solutions: Lessons from historical energy transitions by sector and service', *Energy Policy*. Elsevier, 38(11), pp. 6586–6596. doi: 10.1016/J.ENPOL.2010.06.029.

Fragkos, P., & Paroussos, L. (2018). Employment creation in EU related to renewables expansion. *Applied Energy*, 230(April), 935–945. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.09.032>

Fragkos, P., Fragkiadakis, K., Paroussos, L., Pierfederici, R., Vishwanathan, S. S., Köberle, A. C., Iyer, G., He, C. M., & Oshiro, K. (2018). Coupling national and global models to explore policy impacts of NDCs. *Energy Policy*, 118, 462–473. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2018.04.002>

Fricko, O., Havlik, P., Rogelj, J., Klimont, Z., Gusti, M., Johnson, N., ... & Riahi, K. (2017). The marker quantification of the Shared Socioeconomic Pathway 2: A middle-of-the-road scenario for the 21st century. *Global Environmental Change*, 42, 251-267.

Fujimori, S., Hasegawa, T., Takahashi, K., Dai, H., Liu, J. Y., Ohashi, H., Xie, Y., Zhang, Y., Matsui, T., & Hijioka, Y. (2020). Measuring the sustainable development implications of climate change mitigation. *Environmental Research Letters*, 15(8). <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab9966>

Fuss, S., Szolgayová, J., Khabarov, N., & Obersteiner, M. (2012). Renewables and climate change mitigation: Irreversible energy investment under uncertainty and portfolio effects. *Energy Policy*, 40, 59-68.

Gabbani, D., & Magazine, M. (1986). An interactive heuristic approach for multi-objective integer programming problems. *Journal of the Operational Research Society*, σσ. 285-291.

Gaglia, A.G., Tsikaloudaki, A.G., Laskos, C.M., Dialynas, E.N. and Argiriou, A.A. (2017). The impact of the energy performance regulations' updated on the

construction technology, economics and energy aspects of new residential buildings: The case of Greece. *Energy and Buildings*, 155, pp.225-237.

García-García, P., Carpintero, Ó., & Buendía, L. (2020). Just energy transitions to low carbon economies: A review of the concept and its effects on labour and income. *Energy Research and Social Science*, 70(January), 101664. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2020.101664>

Gass, S., & Saaty, T. (1955). The computational algorithm for the parametric objective function. *Naval research logistics quarterly*, (1-2), 39-45.

Gatzert, N., & Kosub, T. (2016). Risks and risk management of renewable energy projects: The case of onshore and offshore wind parks. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 60, 982–998. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.01.103>

Gatzert, N., & Vogl, N. (2016). Evaluating investments in renewable energy under policy risks. *Energy Policy*, 95, 238–252. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2016.04.027>

Gavranis, A., & Kozanidis, G. (2017). Mixed integer biobjective quadratic programming for maximum-value minimum-variability fleet availability of a unit of mission aircraft. *Computers & Industrial Engineering*, 110, 13-29.

Geels, F. W. and Schot, J. (2007) 'Typology of sociotechnical transition pathways', *Research Policy*, 36(3), pp. 399–417. doi: 10.1016/j.respol.2007.01.003.

Geels, F. W., Berkhout, F., & van Vuuren, D. P. (2016). Bridging analytical approaches for low-carbon transitions. *Nature Climate Change*, 6(6), 576.

Geoffrion, A. M. (1968). Proper efficiency and the theory of vector optimization. *Journal of Mathematical Analysis and Application*, $\sigma\sigma$. 22, 618-630.

Geoffrion, A. M., Dyer, J. S., & Feinberg, A. (1972). An Interactive Approach for MultiCriterion Optimization, with an Application to the Operation of an Academic Department. *Management Science*, 19 (4), 357-368.

- Giarola, S., Mittal, S., Vielle, M., Perdana, S., Campagnolo, L., Delpiazzi, E., Bui, H., Kraavi, A. A., Kolpakov, A., Sognaes, I., Peters, G., Hawkes, A., Köberle, A. C., Grant, N., Gambhir, A., Nikas, A., Doukas, H., Moreno, J., & van de Ven, D. J. (2021). Challenges in the harmonisation of global integrated assessment models: A comprehensive methodology to reduce model response heterogeneity. *Science of the Total Environment*, 783, 146861. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146861>
- Goldberg, D. (1989). *Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning*. Boston, MA.: Kluwer Academic Publishers.
- Gonzalez, J., Reeves, G., & Franz, L. (1985). An Interactive Procedure for Solving Multiple Objective Integer Linear Programming Problems. Στο Y. Haimes, & V. Chankong, *Decision Making with Multiple Objectives* (σσ. 250-260). Springer - Verlag.
- Gopal, A. R. and Kammen, D. M. (2009) 'Molasses for ethanol: the economic and environmental impacts of a new pathway for the lifecycle greenhouse gas analysis of sugarcane ethanol', *Environmental Research Letters*, 4(4), p. 044005. doi: 10.1088/1748-9326/4/4/044005.
- Gosens, J., & Jotzo, F. (2020). China's post-COVID-19 stimulus: No Green New Deal in sight. *Environmental Innovation and Societal Transitions*, 36(August), 250–254. <https://doi.org/10.1016/j.eist.2020.07.004>
- Government of Canada. (2021). *Budget 2021: A Recovery Plan for Jobs, Growth, and Resilience*. <https://www.canada.ca/en/department-finance/news/2021/04/budget-2021-a-recovery-plan-for-jobs-growth-and-resilience.html>
- Gwavuya, S. G. et al. (2012) 'Household energy economics in rural Ethiopia: A cost-benefit analysis of biogas energy', *Renewable Energy*. Pergamon, 48, pp. 202–209. doi: 10.1016/j.renene.2012.04.042.
- Habibi, F., Barzinpour, F., & Sadjadi, S. J. (2019). A mathematical model for project scheduling and material ordering problem with sustainability

considerations: A case study in Iran. *Computers & industrial engineering*, 128, 690-710.

Hanger-Kopp, S., Nikas, A., & Lieu, J. (2019). Framing risks and uncertainties associated with low-carbon pathways. In Hanger-Kopp, S., Lieu, A., & Nikas, A. (eds.) *Narratives of Low-Carbon Transitions*, pp. 10- 21. Routledge, Abingdon.

Hepburn, C., O'Callaghan, B., Stern, N., Stiglitz, J., & Zenghelis, D. (2020). Will COVID-19 fiscal recovery packages accelerate or retard progress on climate change? *Oxford Review of Economic Policy*, 36(Supplement_1), S359–S381. <https://doi.org/10.1093/OXREP/GRAA015>

Hillier, F. S., & Lieberman, G. J. (2005). *Introduction to operations research*. 8th Edition. McGraw-Hill.

Hillier, F., & Lieberman, G. (1995). *Introduction to operation research*. Ney York: McGraw-Hill.

HM Government. (2020). *The Ten Point Plan for a Green Industrial Revolution*. https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/936567/10_POINT_PLAN_BOOKLET.pdf

Holland, J. (1975). *Adaptation in natural and artificial systems*. University of Michigan Press.

Holma, A., Leskinen, P., Myllyviita, T., Manninen, K., Sokka, L., Sinkko, T., & Pasanen, K. (2018). Environmental impacts and risks of the national renewable energy targets – A review and a qualitative case study from Finland. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82, 1433–1441. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.146>

Hombach, L. E., & Walther, G. (2015). Pareto-efficient legal regulation of the (bio) fuel market using a bi-objective optimization model. *European Journal of Operational Research*, 245(1), 286-295.

Horn, J., & Nafpliotis, N. (1993). Multiobjective optimization using the niched Pareto genetic algorithm, IlliGAL Report 91011,. Illinois Genetic Algorithms Laboratory, University of Illinois: Urbana - Champaign.

- Hua, S., Liang, J., Zeng, G., Xu, M., Zhang, C., Yuan, Y., Li, X., Li, P., Liu, J., & Huang, L. (2015). How to manage future groundwater resource of China under climate change and urbanization: An optimal stage investment design from modern portfolio theory. *Water research*, 85, 31-37.
- Huang, Y. H., & Wu, J. H. (2008). A portfolio risk analysis on electricity supply planning. *Energy policy*, 36(2), 627-641.
- Hwang, C. -L., & Masud, A. S. (1979). *Objective Decision Making. Methods and Applications: A state of the art survey*. Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems Vol. 164. Berlin: Springer-Verlag.
- Hwang, C. L., & Yoon, K. P. (1981). *Multiple attributes decision making methods and applications*. Berlin: Springer.
- Hwang, C. L., Paidy, S. R., Yoon, K., & Masud, A. S. (1980). Mathematical programming with multiple objectives: A tutorial. *Computers & Operations Research*, 7 (1-2), 5-31.
- IEA (2017a) *Energy Access Outlook 2017: From poverty to prosperity*. doi: 10.1787/9789264285569-en.
- IEA (2017b) *Energy Balances of OECD Countries 1960-2015 and Energy Balances of Non-OECD Countries 1971-2015*. Paris, France: International Energy Agency.
- IEA. (2020). *Covid-19 impact on renewable energy growth*. <https://www.iea.org/reports/renewable-energy-market-update/COVID-19-impact-on-renewable-energy-growth>
- IEA. (2021a). *COP26 climate pledges could help limit global warming to 1.8 °C, but implementing them will be the key*. <https://www.iea.org/commentaries/cop26-climate-pledges-could-help-limit-global-warming-to-1-8-c-but-implementing-them-will-be-the-key>
- IEA. (2021b). *Global Covid-19 fiscal support and its components: long-term economic and sustainable recovery spending, as of July 2021*.

<https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/global-covid-19-fiscal-support-and-its-components-long-term-economic-and-sustainable-recovery-spending-as-of-july-2021>

IEA. (2021c). What is the impact of increasing commodity and energy prices on solar PV, wind and biofuels? <https://www.iea.org/articles/what-is-the-impact-of-increasing-commodity-and-energy-prices-on-solar-pv-wind-and-biofuels>

Ignizio, J. P., & Thomas, L. C. (1984). An enhanced conversion scheme for lexicographic, multiobjective integer programs. *European journal of operational research*, 18(1), 57-61.

IISD. (2020). Japan Unveils USD 700 Billion Stimulus Package. <https://www.iisd.org/sustainable-recovery/news/japan-unveils-usd-700-billion-stimulus-package/>

Iiyama, M. et al. (2014) 'The potential of agroforestry in the provision of sustainable woodfuel in sub-Saharan Africa', *Current Opinion in Environmental Sustainability*. Elsevier, 6, pp. 138–147. doi: 10.1016/J.COSUST.2013.12.003.

IMF. (2021). World Economic Outlook: Recovery During a Pandemic - Health Concerns, Supply Disruptions, and Price Pressures. <https://iiep.gwu.edu/2021/10/26/imf-world-economic-outlook-recovery-during-a-pandemic-health-concerns-supply-disruptions-and-price-pressures/>

Inghels, D., Dullaert, W., & Bloemhof, J. (2016). A model for improving sustainable green waste recovery. *Resources, Conservation and Recycling*, 110, 61-73.

Intergovernmental Panel on Climate Change. (2018). Global Warming of 1.5° C: An IPCC Special Report on the Impacts of Global Warming of 1.5° C Above Pre-industrial Levels and Related Global Greenhouse Gas Emission Pathways, in the Context of Strengthening the Global Response to the Threat of Climate Change, Sustainable Development, and Efforts to Eradicate Poverty. Intergovernmental Panel on Climate Change.

- Ioannou, A., Angus, A., & Brennan, F. (2017). Risk-based methods for sustainable energy system planning: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 74(Supplement C), 602–615. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.02.082>
- IPCC (2007) *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M.Tignor and H.L. Miller . Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- IPCC. (2014). *Climate change 2014: synthesis report. Contribution of Working Groups I, II and III to the fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (p. 151).
- IPCC. (2021). *Summary for Policymakers. In: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M. I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T. K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press. In Press.
- Jackson, J. (2010). Promoting energy efficiency investments with risk management decision tools. *Energy Policy*, 38, 3865–3873. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2010.03.006>
- Jaeger, J., Walls, G., Clarke, E., Altamirano, J. C., Harsono, A., Mountford, H., Burrow, S., Smith, S., & Tate, A. (2021). *The Green Jobs Advantage: How Climate-Friendly Investments Are Better Job Creators* (Issue October). <https://doi.org/10.46830/wriwp.20.00142>
- Janssens-Maenhout, G. et al. (2017) *Fossil CO2 and GHG emissions of all world countries*. doi: 10.2760/709792.

- Jiang, L., & O'Neill, B. C. (2018). Determinants of urban growth during demographic and mobility transitions: Evidence from India, Mexico, and the US. *Population and development review*, (2), 363-389.
- Jun, K. S., Chung, E. S., Kim, Y. G., & Kim, Y. (2013). A fuzzy multi-criteria approach to flood risk vulnerability in South Korea by considering climate change impacts. *Expert Systems with Applications*, 40(4), 1003-1013.
- Karaivanova, J.N., Narula, S.C., Vassilev V. (1993). An interactive procedure for multiple objective integer linear programming problems. *European Journal of Operational Research* 68, 344-351.
- Kaya, T., & Kahraman, C. (2011). Multicriteria decision making in energy planning using a modified fuzzy TOPSIS methodology. *Expert Systems with Applications*, 38(6), 6577-6585.
- Kemp, L. (2018). A Systems Critique of the 2015 Paris Agreement on Climate. In *Pathways to a Sustainable Economy* (pp. 25-41). Springer, Cham.
- Keppo, I., Butnar, I., Bauer, N., Caspani, M., Edelenbosch, O., Emmerling, J., Fragkos, P., Guivarch, C., Harmsen, M., Lefevre, J., Le Gallic, T., Leimbach, M., Mcdowall, W., Mercure, J. F., Schaeffer, R., Trutnevyte, E., & Wagner, F. (2021). Exploring the possibility space: taking stock of the diverse capabilities and gaps in integrated assessment models. *Environmental Research Letters*, 16(5). <https://doi.org/10.1088/1748-9326/abe5d8>
- Keramidas, K., Fosse, F., Diaz-Vazquez, A., Schade, B., Tchung-Ming, S., Weitzel, M., Vandyck, T., & Wojtowicz, K. (2021). *Global Energy and Climate Outlook 2020: A New Normal Beyond Covid-19*. Publications Office of the European Union. <https://doi.org/10.2760/608429>
- Khalili-Damghani, K., & Amiri, M. (2012). Solving binary-state multi-objective reliability redundancy allocation series-parallel problem using efficient epsilon-constraint, multi-start partial bound enumeration algorithm, and DEA. *Reliability Engineering & System Safety*, 103, 35-44.

- Khalili-Damghani, K., Abtahi, A. R., & Tavana, M. (2013). A new multi-objective particle swarm optimization method for solving reliability redundancy allocation problems. *Reliability Engineering & System Safety*, 111, 58-75.
- Kikstra, J. S., Vinca, A., Lovat, F., Boza-Kiss, B., van Ruijven, B., Wilson, C., Rogelj, J., Zakeri, B., Fricko, O., & Riahi, K. (2021). Climate mitigation scenarios with persistent COVID-19-related energy demand changes. *Nature Energy*. <https://doi.org/10.1038/s41560-021-00904-8>
- Kiruki, H. M. et al. (2017) 'Land Cover Change and Woodland Degradation in a Charcoal Producing Semi-Arid Area in Kenya', *Land Degradation & Development*. John Wiley & Sons, Ltd, 28(2), pp. 472-481. doi: 10.1002/ldr.2545.
- Kitzing, L. (2014). Risk implications of renewable support instruments: Comparative analysis of feed-in tariffs and premiums using a mean-variance approach. *Energy*, 64, 495-505. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2013.10.008>
- Kiziltan, G., & Yucaoglu, E. (1983). An algorithm for multiobjective zero-one linear programming. *Management Science*, 29 (12), 1444-1453.
- Klein, D., & Hannan, E. (1982). An algorithm for the multiple objective integer linear programming problem. *European Journal of Operational Research*, 9, 378-385.
- Knowles, J. D., & Corne, D. (2005). Memetic algorithms for multiobjective optimization: issues, methods and prospects. Στο W. Hart, N. Krasnogor, & J. Smith, *Recent Advances in Memetic Algorithms*, Vol. 166 (σσ. 313-352). Springer Studies in Fuzziness and Soft Computing.
- Knowles, J. D., & Corne, D. W. (2000, 8(2)). Approximating the nondominated front using the Pareto archived evolution strategy. *Evolutionary Computation*, σσ. 149-172.

- Korhonen, P., & Laakso, J. (1986). A Visual Interactive Method for Solving the Multiple Criteria Problem. *European Journal of Operational Research*, 24, 277-287.
- Korhonen, P., & Wallenius, J. (1988). A Pareto Race. *Naval Research Logistics*, 35, 615-623.
- Krohling, R. A., & Campanharo, V. C. (2011). Fuzzy TOPSIS for group decision making: A case study for accidents with oil spill in the sea. *Expert Systems with applications*, 38(4), 4190-4197.
- Lahcen, B., Brusselaers, J., Vrancken, K., Dams, Y., Da Silva Paes, C., Eyckmans, J., & Rousseau, S. (2020). Green Recovery Policies for the COVID-19 Crisis: Modelling the Impact on the Economy and Greenhouse Gas Emissions. *Environmental and Resource Economics*, 76(4), 731-750. <https://doi.org/10.1007/s10640-020-00454-9>
- Laurikka, H., & Springer, U. (2003). Risk and return of project-based climate change mitigation: a portfolio approach. *Global Environmental Change*, 13(3), 207-217.
- Lemoine, D. M., Fuss, S., Szolgayova, J., Obersteiner, M., & Kammen, D. M. (2012). The influence of negative emission technologies and technology policies on the optimal climate mitigation portfolio. *Climatic change*, 113(2), 141-162.
- Leontief, W. (1951). *The Structure of the American Economy, 1919 -1939*. Oxford: Oxford University Press.
- Li, D. D., & Li, S. (1996). A theory of corporate scope and financial structure. *The Journal of Finance*, 51(2), 691-709.
- Lin, Z., & Beck, M. B. (2012). Accounting for structural error and uncertainty in a model: An approach based on model parameters as stochastic processes. *Environmental modelling & software*, 27, 97-111.
- Malik, A., Bertram, C., Kriegler, E., & Luderer, G. (2021). Climate policy accelerates structural changes in energy employment. *Energy Policy*, 159(January), 112642. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2021.112642>

- Mandelli, S. et al. (2016) 'Off-grid systems for rural electrification in developing countries: Definitions, classification and a comprehensive literature review', *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Elsevier, 58(May), pp. 1621–1646. doi: 10.1016/j.rser.2015.12.338.
- Marcotte, O., & Soland, R. (1986). An interactive branch and bound algorithm for multiple criteria optimization. *Management Science*, $\sigma\sigma$. 61-75.
- Marinoni, O., Adkins, P., & Hajkowicz, S. (2011). Water planning in a changing climate: Joint application of cost utility analysis and modern portfolio theory. *Environmental Modelling & Software*, 26(1), 18-29.
- Markandya, A., Arto, I., González-Eguino, M., & Román, M. V. (2016). Towards a green energy economy? Tracking the employment effects of low-carbon technologies in the European Union. *Applied Energy*, 179(2016), 1342–1350. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.02.122>
- Markowitz, H. (1952). Portfolio selection. *The journal of finance*, 7(1), 77-91.
- Marlow, W. (1993). *Mathematics for operations research*. New York: Courier Corporation.
- Marrero, G. A., Puch, L. A., & Ramos-Real, F. J. (2015). Mean-variance portfolio methods for energy policy risk management. *International Review of Economics & Finance*, 40, 246-264.
- Masera, O. R. et al. (2015) 'Environmental Burden of Traditional Bioenergy Use', *Annual Review of Environment and Resources*, 40(1), pp. 121–150. doi: 10.1146/annurev-environ-102014-021318.
- Mavrotas G, Florios K. (2013), An improved version of the augmented ε -constraint method (AUGMECON2) for finding the exact Pareto set in Multi-Objective Integer Programming problems, *Advanced Mathematics and Computation*, 219 (18), pp. 9652-9669.
- Mavrotas, G., & Diakoulaki, D. (1998). A branch and bound algorithm for mixed zero–one multiple objective linear programming. *European Journal of Operational Research*. 107, 530–541.

- Mavrotas, G., Figueira, J.R., Siskos, E. (2015a). Robustness analysis methodology for multi-objective combinatorial optimization problems and application to project selection. *Omega*, 52, 142–155. <https://doi.org/10.1016/j.omega.2014.11.005>
- Mavrotas, G., Gakis, N., Skoulaxinou, S., Katsouros, V., & Georgopoulou, E. (2015c). Municipal solid waste management and energy production: Consideration of external cost through multi-objective optimization and its effect on waste-to-energy solutions. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 51, 1205-1222.
- Mavrotas, G., Pechak, O., Siskos, E., Doukas, H., Psarras, J. (2015b), Robustness analysis in Multi-Objective Mathematical Programming using Monte Carlo simulation, *European journal of Operational Research*, 240 (1), pp. 193-201.
- Mavrotas, G., Skoulaxinou, S., Gakis, N., Katsouros, V., & Georgopoulou, E. (2013). A multi-objective programming model for assessment the GHG emissions in MSW management. *Waste Management*, 33(9), 1934-1949.
- McLohglin, E., & Bazilian, M. (2006). Application of Portfolio Analysis to the Irish Generating Mix in 2020.
- Mengistu, M. G. et al. (2015) 'A review on biogas technology and its contributions to sustainable rural livelihood in Ethiopia', *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Pergamon, 48, pp. 306–316. doi: 10.1016/J.RSER.2015.04.026.
- Messac, A., & Mattson, C. A. (2002). Generating Well-Distributed Sets of Pareto Points for Engineering Design Using Physical Programming. *Optimization and Engineering*, 3(4), 431–450.
- Messac, A., Ismail-Yahaya, A., & Mattson, C. A. (2003). The normalized normal constraint method for generating the Pareto frontier. *Structural and multidisciplinary optimization*, 25(2), 86-98.
- Messac, A., Sukam, C. P., & Melachrinoudis, E. (2001). Mathematical and Pragmatic Perspectives of Physical Programming. *AIAA Journal*, 39(5), 885–893.

- Mitra, G., Lucas, C., Moody, S., & Hadjiconstantinou, E. (1974). Tools for reformulating logical forms into zero-one mixed integer programs. *European Journal of Operational Research*, *σσ*. 262-276.
- Mitra, G., Lucas, C., Moody, S., & Hadjiconstantinou, E. (1994). Tools for reformulating logical forms into zero-one mixed integer programs. *European Journal of Operational Research*, *σσ*. 262-276.
- Mohammadi, M., Jula, P., & Tavakkoli-Moghaddam, R. (2019). Reliable single-allocation hub location problem with disruptions. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, *123*, 90-120.
- Mohammadkhani, N., Sedighizadeh, M., & Esmaili, M. (2018). Energy and emission management of CCHPs with electric and thermal energy storage and electric vehicle. *Thermal Science and Engineering Progress*, *8*, 494-508.
- Mohammed, A. M., & Duffuaa, S. O. (2020). A tabu search based algorithm for the optimal design of multi-objective multi-product supply chain networks. *Expert Systems with Applications*, *140*, 112808.
- Montanari, A. (2007). What do we mean by 'uncertainty'? The need for a consistent wording about uncertainty assessment in hydrology. *Hydrological Processes: An International Journal*, *21*(6), 841-845.
- Montanari, R. (2004). Environmental efficiency analysis for enel thermo-power plants. *Journal of cleaner production*, *12*(4), 403-414.
- Moss, R. H., Edmonds, J. A., Hibbard, K. A., Manning, M. R., Rose, S. K., Van Vuuren, D. P., ... & Wilbanks, T. J. (2010). The next generation of scenarios for climate change research and assessment. *Nature*, *463*(7282), 747-756.
- Mourhir, A., Rachidi, T., Papageorgiou, E. I., Karim, M., & Alaoui, F. S. (2016). A cognitive map framework to support integrated environmental assessment. *Environmental Modelling & Software*, *77*, 81-94.
- Mousazadeh, M., Torabi, S. A., Pishvae, M. S., & Abolhassani, F. (2018). Accessible, stable, and equitable health service network redesign: A robust mixed

possibilistic-flexible approach. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 111, 113-129.

Mudombi, S. et al. (2018) 'User perceptions about the adoption and use of ethanol fuel and cookstoves in Maputo, Mozambique', *Energy for Sustainable Development*. Elsevier, 44, pp. 97–108. doi: 10.1016/J.ESD.2018.03.004.

Muñoz, J.I., Sánchez de la Nieta, A.A., Contreras, J., Bernal-Agustín, J.L. (2009). Optimal investment portfolio in renewable energy: The Spanish case. *Energy Policy*, 37, 5273–5284. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2009.07.050>

Murphy, J. T. (2001) 'Making the energy transition in rural east Africa: Is leapfrogging an alternative?', *Technological Forecasting and Social Change*. North-Holland, 68(2), pp. 173–193. doi: 10.1016/S0040-1625(99)00091-8.

Musavi, M., & Bozorgi-Amiri, A. (2017). A multi-objective sustainable hub location-scheduling problem for perishable food supply chain. *Computers & Industrial Engineering*, 113, 766-778.

Nakicenovic, N., Alcamo, J., Davis, G., Vries, B. D., Fenhann, J., Gaffin, S., ... & Zhou, D. (2000). Special report on emissions scenarios.

Narita, D., & Klepper, G. (2016). Economic incentives for carbon dioxide storage under uncertainty: A real options analysis. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 53, 18-27.

Ndegwa, G. M. et al. (2016) 'Charcoal production through selective logging leads to degradation of dry woodlands: a case study from Mutomo District, Kenya', *Journal of Arid Land*, 8(4), pp. 618–631. doi: 10.1007/s40333-016-0124-6.

Nerini, F. F. et al. (2017) 'Mapping synergies and trade-offs between energy and the Sustainable Development Goals', *Nature Energy*, pp. 1–6. doi: 10.1038/s41560-017-0036-5.

- Nerini, F. F., Ray, C. and Boulkaid, Y. (2017) 'The cost of cooking a meal. the case of Nyeri County, Kenya', *Environmental Research Letters*, 12(6). doi: 10.1088/1748-9326/aa6fd0.
- Nicola, M., Alsafi, Z., Sohrabi, C., Kerwan, A., Al-Jabir, A., Iosifidis, C., Agha, M., & Agha, R. (2020). The socio-economic implications of the coronavirus pandemic (COVID-19): A review. *International Journal of Surgery*, 78(April), 185–193. <https://doi.org/10.1016/j.ijssu.2020.04.018>
- Nikas, A., Doukas, H., & Papandreou, A. (2019). A detailed overview and consistent classification of climate-economy models. In *Understanding Risks and Uncertainties in Energy and Climate Policy* (pp. 1-54). Springer, Cham.
- Nikas, A., Elia, A., Boitier, B., Koasidis, K., Doukas, H., Cassetti, G., Anger-Kraavi, A., Bui, H., Campagnolo, L., De Miglio, R., Delpiazzo, E., Fougeyrollas, A., Gambhir, A., Gargiulo, M., Giarola, S., Grant, N., Hawkes, A., Herbst, A., Köberle, A. C., ... Chiodi, A. (2021). Where is the EU headed given its current climate policy? A stakeholder-driven model inter-comparison. *Science of The Total Environment*, 793, 148549. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148549>
- Nikas, A., Fountoulakis, A., Forouli, A., & Doukas, H. (2020). A robust augmented ϵ -constraint method (AUGMECON-R) for finding exact solutions of multi-objective linear programming problems. *Operational Research*, 0123456789. <https://doi.org/10.1007/s12351-020-00574-6>
- Nikas, A., Ntanos, E., & Doukas, H. (2017). ESQAPE: A Fuzzy Cognitive Mapping decision support tool for evaluating climate policy. *Energy for Society: 1st International Conference on Energy Research and Social Science*, Elsevier, 2-5 April 2017, Sitges, Spain
- Nikas, A., Xexakis, G., Koasidis, K., Acosta-Fernández, J., Arto, I., Calzadilla, A., Domenech, T., Gambhir, A., Giljum, S., Gonzalez-Eguino, M., Herbst, A., Ivanova, O., van Sluisveld, M. A. E., Van De Ven, D.-J., Karamaneas, A., & Doukas, H. (2022). Coupling circularity performance and climate action: From disciplinary silos to transdisciplinary modelling science.

Sustainable Production and Consumption, 30, 269–277.
<https://doi.org/10.1016/j.spc.2021.12.011>

Nyadzi, G. I. et al. (2003) 'Rotational woodlot technology in northwestern Tanzania: Tree species and crop performance', *Agroforestry Systems*, 59(3), pp. 253–263. doi: 10.1023/B:AGFO.0000005226.62766.05.

O'Neill, B. C., Kriegler, E., Ebi, K. L., Kemp-Benedict, E., Riahi, K., Rothman, D. S., ... & Levy, M. (2017). The roads ahead: Narratives for shared socioeconomic pathways describing world futures in the 21st century. *Global Environmental Change*, 42, 169-180.

O'Neill, B. C., Kriegler, E., Riahi, K., Ebi, K. L., Hallegatte, S., Carter, T. R., ... & van Vuuren, D. P. (2014). A new scenario framework for climate change research: the concept of shared socioeconomic pathways. *Climatic change*, 122(3), 387-400.

Observer Research Foundation. (2021). Green recovery pathway for India.
<https://www.orfonline.org/expert-speak/green-recovery-pathway-india/>

Oke, O., & Siddiqui, S. (2015). Efficient automated schematic map drawing using multiobjective mixed integer programming. *Computers & Operations Research*, 61, 1-17.

Onu, P. U., Quan, X., Xu, L., Orji, J., & Onu, E. (2017). Evaluation of sustainable acid rain control options utilizing a fuzzy TOPSIS multi-criteria decision analysis model frame work. *Journal of Cleaner Production*, 141, 612-625.

Pai, S., Emmerling, J., Drouet, L., Zerriffi, H., & Jewell, J. (2021). Meeting well-below 2°C target would increase energy sector jobs globally. *One Earth*, 4(7), 1026–1036. <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2021.06.005>

Papadelis, S., Flamos, A., & Psarras, J. (2013). A framework to address uncertainties in energy policy formulation. *Energy Sources, Part B: Economics, Planning, and Policy*, 8(3), 270-278.

- Pasternak, H., & Passy, U. (1973). Bicriterion mathematical programs with Boolean variables. Στο J. Cochrane, & M. Zeleny, Multiple Criteria Decision Making (327–348). University of South Carolina Press.
- Patrizio, P., Leduc, S., Kraxner, F., Fuss, S., Kindermann, G., Mesfun, S., Spokas, K., Mendoza, A., Mac Dowell, N., Wetterlund, E., Lundgren, J., Dotzauer, E., Yowargana, P., & Obersteiner, M. (2018). Reducing US Coal Emissions Can Boost Employment. *Joule*, 2(12), 2633–2648. <https://doi.org/10.1016/j.joule.2018.10.004>
- Pérez Odeh, R., Watts, D., & Negrete-Pincetic, M. (2018). Portfolio applications in electricity markets review: Private investor and manager perspective trends. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 81(Part 1), 192–204. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.07.031>
- Peters, G. P. (2016). The 'best available science' to inform 1.5 C policy choices. *Nature Climate Change*, 6(7), 646. Pindyck, R. S. (2013). Climate change policy: what do the models tell us?. *Journal of Economic Literature*, 51(3), 860-72.
- Pollitt, H., Lewney, R., Kiss-Dobronyi, B., & Lin, X. (2021). Modelling the economic effects of COVID-19 and possible green recovery plans: a post-Keynesian approach. *Climate Policy*, 1–15. <https://doi.org/10.1080/14693062.2021.1965525>
- Pope, D. et al. (2017) 'Real-life effectiveness of "improved" stoves and clean fuels in reducing PM2.5 and CO: Systematic review and meta-analysis', *Environment International*. Pergamon, 101, pp. 7–18. doi: 10.1016/J.ENVINT.2017.01.012.
- Pugh, G., Clarke, L., Marlay, R., Kyle, P., Wise, M., McJeon, H., & Chan, G. (2011). Energy R&D portfolio analysis based on climate change mitigation. *Energy Economics*, 33(4), 634-643.
- Qiu, R., Zhang, H., Gao, X., Zhou, X., Guo, Z., Liao, Q., & Liang, Y. (2019). A multi-scenario and multi-objective scheduling optimization model for liquefied light hydrocarbon pipeline system. *Chemical Engineering Research and Design*, 141, 566-579.

- Quinn, A. K. et al. (2018) 'An analysis of efforts to scale up clean household energy for cooking around the world', *Energy for Sustainable Development*. Elsevier, 46, pp. 1–10. doi: 10.1016/J.ESD.2018.06.011.
- Rabbani, M., Saravi, N. A., Farrokhi-Asl, H., Lim, S. F. W., & Tahaei, Z. (2018). Developing a sustainable supply chain optimization model for switchgrass-based bioenergy production: A case study. *Journal of cleaner production*, 200, 827-843.
- Rahimi, Y., Torabi, S. A., & Tavakkoli-Moghaddam, R. (2019). A new robust-possibilistic reliable hub protection model with elastic demands and backup hubs under risk. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 86, 68-82.
- Rahman, M. M. et al. (2014) 'Hybrid application of biogas and solar resources to fulfill household energy needs: A potentially viable option in rural areas of developing countries', *Renewable Energy*. Pergamon, 68, pp. 35–45. doi: 10.1016/j.renene.2014.01.030.
- Ram, M., Aghahosseini, A., & Breyer, C. (2020). Job creation during the global energy transition towards 100% renewable power system by 2050. *Technological Forecasting and Social Change*, 151(July 2019), 119682. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2019.06.008>
- Ram, M., Osorio-Aravena, J. C., Aghahosseini, A., Bogdanov, D., & Breyer, C. (2022). Job creation during a climate compliant global energy transition across the power, heat, transport, and desalination sectors by 2050. *Energy*, 238, 121690. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.121690>
- Ramesh, R., Karwan, M., & Zionts, S. (1990). An interactive method for bicriteria integer programming. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, σσ. 395–403.
- Ramesh, R., Zionts, S., & Karwan, M. (1986). A Class of Practical Interactive Branch and Bound Algorithms for Multicriteria Integer Programming. *European Journal of Operational Research*, σσ. 161-172.

- Rao, N. D. and Pachauri, S. (2017) 'Energy access and living standards: some observations on recent trends', *Environmental Research Letters*, 12(2), p. 025011. doi: 10.1088/1748-9326/aa5b0d.
- Rasmussen, L. M. (1986). Zero-one programming with multiple criteria. *European Journal of Operational Research*, *σσ.* 26, 83-95.
- Rayat, F., Musavi, M., & Bozorgi-Amiri, A. (2017). Bi-objective reliable location-inventory-routing problem with partial backordering under disruption risks: A modified AMOSA approach. *Applied Soft Computing*, 59, 622-643.
- Razm, S., Nickel, S., & Sahebi, H. (2019). A multi-objective mathematical model to redesign of global sustainable bioenergy supply network. *Computers & Chemical Engineering*, 128, 1-20.
- Resat, H. G., & Turkay, M. (2015). Design and operation of intermodal transportation network in the Marmara region of Turkey. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 83, 16-33.
- Resat, H. G., & Unsal, B. (2019). A novel multi-objective optimization approach for sustainable supply chain: A case study in packaging industry. *Sustainable Production and Consumption*, 20, 29-39.
- Riahi, K., Van Vuuren, D. P., Kriegler, E., Edmonds, J., O'neill, B. C., Fujimori, S., ... & Tavoni, M. (2017). The Shared Socioeconomic Pathways and their energy, land use, and greenhouse gas emissions implications: An overview. *Global environmental change*, 42, 153-168.
- Richardson, J. T., Palmer, M. R., Liepins, G., & Hilliard, M. (1989). Some guidelines for genetic algorithms. *Proceedings of the Third International Conference on Genetic (σσ.* 191-197). San Mateo, California: Schaffer, J.D. (editor).
- Rochedo, P. R. R., Fragkos, P., Garaffa, R., Couto, L. C., Baptista, L. B., Cunha, B. S. L., Schaeffer, R., & Szklo, A. (2021). Is Green Recovery Enough? Analysing the Impacts of Post-COVID-19 Economic Packages. *Energies*, 14(17), 5567. <https://doi.org/10.3390/en14175567>

- Romejko, K., & Nakano, M. (2017). Portfolio analysis of alternative fuel vehicles considering technological advancement, energy security and policy. *Journal of Cleaner Production*, 142, 39-49.
- Roshan, M., Tavakkoli-Moghaddam, R., & Rahimi, Y. (2019). A two-stage approach to agile pharmaceutical supply chain management with product substitutability in crises. *Computers & Chemical Engineering*, 127, 200-217.
- Rutovitz, J., Dominish, E., & Downes, J. (2015). Calculating Global Energy Sector Jobs: 2015 Methodology Update. prepared for Greenpeace International by the Institute for Sustainable Futures. University of Technology Sydney. <https://opus.lib.uts.edu.au/bitstream/10453/43718/1/Rutovitzetal2015Calculatingglobalenergysectorjobsmethodology.pdf>
- Saedinia, R., Vahdani, B., Etebari, F., & Nadjafi, B. A. (2019). Robust gasoline closed loop supply chain design with redistricting, service sharing and intra-district service transfer. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 123, 121-141.
- Sakthivel, G., Ilangkumaran, M., & Gaikwad, A. (2015). A hybrid multi-criteria decision modeling approach for the best biodiesel blend selection based on ANP-TOPSIS analysis. *Ain Shams Engineering Journal*, 6(1), 239-256.
- Samir, K. C., & Lutz, W. (2017). The human core of the shared socioeconomic pathways: Population scenarios by age, sex and level of education for all countries to 2100. *Global Environmental Change*, 42, 181-192.
- Santos, M. J. et al. (2017) 'Modeling the Effects of Future Growing Demand for Charcoal in the Tropics', *Frontiers in Environmental Science*, 5. doi: 10.3389/fenvs.2017.00028.
- Santos-Alamillos, F. J., Thomaidis, N. S., Usaola-García, J., Ruiz-Arias, J. A., & Pozo-Vázquez, D. (2017). Exploring the mean-variance portfolio optimization approach for planning wind repowering actions in Spain. *Renewable Energy*, 106, 335-342.

- Sazvar, Z., Rahmani, M., & Govindan, K. (2018). A sustainable supply chain for organic, conventional agro-food products: The role of demand substitution, climate change and public health. *Journal of cleaner production*, 194, 564-583
- Schaffer, J. (1984). Some experiments in machine learning using vector evaluated genetic algorithms, PhD thesis. Nashville: Vanderbilt University.
- Sedighzadeh, M., Esmaili, M., & Mohammadkhani, N. (2018). Stochastic multi-objective energy management in residential microgrids with combined cooling, heating, and power units considering battery energy storage systems and plug-in hybrid electric vehicles. *Journal of cleaner production*, 195, 301-317.
- Shakouri, M., Lee, H. W., & Choi, K. (2015). PACPIM: new decision-support model of optimized portfolio analysis for community-based photovoltaic investment. *Applied Energy*, 156, 607-617.
- Shan, Y., Ou, J., Wang, D., Zeng, Z., Zhang, S., Guan, D., & Hubacek, K. (2021). Impacts of COVID-19 and fiscal stimuli on global emissions and the Paris Agreement. *Nature Climate Change*, 11(3), 200–206. <https://doi.org/10.1038/s41558-020-00977-5>
- Shekarian, M., Nooraie, S. V. R., & Parast, M. M. (2019). An examination of the impact of flexibility and agility on mitigating supply chain disruptions. *International Journal of Production Economics*.
- Shin, W. S., & Ravidran, A. (1991). Interactive multiple objective optimization: Survey I--continuous case. *Computers and Operations Research*, 18 (1), 97-114.
- Shin, W., & Allen, D. (1994). An interactive paired comparison method for bicriterion integer programming. *Naval Research Logistics*, 41, 423–434.
- Siddiqui, A. S., Tanaka, M., & Chen, Y. (2016). Are targets for renewable portfolio standards too low? The impact of market structure on energy policy. *European Journal of Operational Research*, 250(1), 328-341.

- Singh, D., Pachauri, S. and Zerriffi, H. (2017) 'Environmental payoffs of LPG cooking in India', *Environmental Research Letters*, 12(11). doi: 10.1088/1748-9326/aa909d.
- Smeets, E., Johnson, F. X. and Ballard-Tremeer, G. (2012) 'Keynote Introduction: Traditional and Improved Use of Biomass for Energy in Africa', in Janssen, R. and Rutz, D. (eds) *Bioenergy for Sustainable Development in Africa*. Dordrecht: Springer Netherlands, pp. 3–12. doi: 10.1007/978-94-007-2181-4_1.
- Sognaes, I., Gambhir, A., van de Ven, D. J., Nikas, A., Anger-Kraavi, A., Bui, H., Campagnolo, L., Delpiazzi, E., Doukas, H., Giarola, S., Grant, N., Hawkes, A., Köberle, A. C., Kolpakov, A., Mittal, S., Moreno, J., Perdana, S., Rogelj, J., Vielle, M., & Peters, G. P. (2021). A multi-model analysis of long-term emissions and warming implications of current mitigation efforts. *Nature Climate Change*, 11(12), 1055–1062. <https://doi.org/10.1038/s41558-021-01206-3>
- Solanki, R. (1991). Generating the noninferior set in mixed integer biobjective linear programs: An application to a location problem. *Computers and Operations Research*, 18 (1), 1–15.
- Spijker, E., Anger-Kraavi, A., Pollitt, H., & van de Ven, D. J. (2020). Evaluating integrated impacts of low-emission transitions in the livestock sector. *Environmental Innovation and Societal Transitions*, 35(December 2019), 482–492. <https://doi.org/10.1016/j.eist.2019.11.003>
- Srinivas, N., & Deb, K. (1993). Multiobjective optimization using nondominated sorting in genetic algorithms, Technical Report. Kanpur, India: Department of Mechanical Engineering, Indian Institute of Technology.
- Steuer, R. (1977). An Interactive Multiple Objective Linear Programming Procedure. *TIMS Studies in the Management Sciences*, 6, 225-239.
- Steuer, R. (1989). *Multiple Criteria Optimization-Theory, Computation and Application*, 2nd edition. Malabar FL: Krieger.

- Steuer, R., & Choo, E. (1983). An interactive Weighted Tchebycheff Procedure for Multiple Objective Programming. *Mathematical Programming*, 26, 326-344.
- Steur, R. (1986). *Multiple Criteria Optimization; Theory, Computation and Application*. New York: Wiley Series in Probability and Mathematical Statistics - Applies, Wiley.
- Stoll, C., & Mehling, M. A. (2020). COVID-19: Clinching the Climate Opportunity. *One Earth*, 3(4), 400–404. <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2020.09.003>
- Sylva, J., & Crema, A. (2004). A method for finding the set of nondominated vectors for multiple objective integer linear programs. *European Journal of Operational Research*, 158, 46–55.
- Szabó, S. et al. (2011) 'Energy solutions in rural Africa: mapping electrification costs of distributed solar and diesel generation versus grid extension', *Environmental Research Letters*, 6(3), p. 034002. doi: 10.1088/1748-9326/6/3/034002.
- Szabó, S. et al. (2013) 'Sustainable energy planning: Leapfrogging the energy poverty gap in Africa', *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Pergamon, 28, pp. 500–509. doi: 10.1016/J.RSER.2013.08.044.
- Szumilo, N., & Fuerst, F. (2017). Income risk in energy efficient office buildings. *Sustainable Cities and Society*, 34, 309–320. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2017.06.024>
- Tanaka, K., Azar, C., Boucher, O., Ciais, P., Gaucher, Y., & Johansson, D. (2021). Paris Agreement requires substantial, broad, and sustained engagements beyond COVID-19 recovery packages. *Earth and Space Science Open Archive*, 8. <https://doi.org/10.1002/essoar.10508048.1>
- Tartibu, L. K., Sun, B., & Kaunda, M. A. E. (2015). Multi-objective optimization of the stack of a thermoacoustic engine using GAMS. *Applied Soft Computing*, 28, 30-43.

The New York Times. (2020). A Look at What's in the Stimulus Package Trump Signed.

<https://www.nytimes.com/2020/12/28/business/economy/second-stimulus-package.html>

Thollander, P., Danestig, M., Rohdin, P. (2007). Energy policies for increased industrial energy efficiency: Evaluation of a local energy programme for manufacturing SMEs. *Energy Policy*, 35, 5774–5783. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2007.06.013>

Togeby, M., Dyhr-Mikkelsen, K., Larsen, A.E., Bach, P. (2012). A Danish case: portfolio evaluation and its impact on energy efficiency policy. *Energy Effic.*, 5, 37–49. <https://doi.org/10.1007/s12053-011-9117-7>

Torabi, S. A., Hamed, M., & Ashayeri, J. (2013). A new optimization approach for nozzle selection and component allocation in multi-head beam-type SMD placement machines. *Journal of Manufacturing Systems*, 32(4), 700-714.

Trachanas, G. P., Forouli, A., Gkonis, N., & Doukas, H. (2018). Hedging uncertainty in energy efficiency strategies: a minimax regret analysis. *Operational Research*, 1-16.

Tukker, A. (2005) 'Leapfrogging into the future: developing for sustainability', *International Journal of Innovation and Sustainable Development*, 1(1/2), p. 65. doi: 10.1504/IJISD.2005.008087.

Ulungu, E. L., & Teghem, J. (1994). Multi-objective combinatorial optimization problems: A survey. *Journal of Multi-Criteria Decision Analysis*, 5, 83-104.

UNFCCC, United Nations Framework Convention on Climate Change (2016). The Paris Agreement. https://unfccc.int/sites/default/files/resource/parisagreement_publication.pdf

UNFCCC, United Nations Framework Convention on Climate Change (2021). Outcomes of the Glasgow Climate Change Conference - Advance Unedited Versions (AUVs) and list of submissions from the sessions in Glasgow.

<https://unfccc.int/process-and-meetings/conferences/glasgow-climate-change-conference-october-november-2021/outcomes-of-the-glasgow-climate-change-conference>

- Usmani, F., Steele, J. and Jeuland, M. (2017) 'Can economic incentives enhance adoption and use of a household energy technology? Evidence from a pilot study in Cambodia', *Environmental Research Letters*, 12(3), p. 035009. doi: 10.1088/1748-9326/aa6008.
- Uusitalo, L., Lehtikoinen, A., Helle, I., & Myrberg, K. (2015). An overview of methods to evaluate uncertainty of deterministic models in decision support. *Environmental Modelling & Software*, 63, 24-31.
- Vafaeenezhad, T., Tavakkoli-Moghaddam, R., & Cheikhrouhou, N. (2019). Multi-objective mathematical modeling for sustainable supply chain management in the paper industry. *Computers & Industrial Engineering*.
- Van de Ven, D. J., Sampedro, J., Johnson, F. X., Bailis, R., Forouli, A., Nikas, A., ... & Doukas, H. (2019). Integrated policy assessment and optimisation over multiple sustainable development goals in Eastern Africa. *Environmental Research Letters*.
- Van Groenendaal, W. J., & Kleijnen, J. P. (2002). Deterministic versus stochastic sensitivity analysis in investment problems: an environmental case study. *European Journal of Operational Research*, 141(1), 8-20.
- Van Ruijven, B. J., Levy, M. A., Agrawal, A., Biermann, F., Birkmann, J., Carter, T. R., Ebi, K.L., Garschagen, M., Jones, B., Jones, R., & Kemp-Benedict, E. (2014). Enhancing the relevance of Shared Socioeconomic Pathways for climate change impacts, adaptation and vulnerability research. *Climatic Change*, 122(3), 481-494.
- Van Veldhuizen, D. A. (1999). *Multiobjective Evolutionary Algorithms: Classifications, Analyses and New Innovations*, PhD thesis. Wright-Patterson AFB, OH: Department of Electrical and Computer Engineering, Graduate School of Engineering, Air Force Institute of Technology.

- Van Veldhuizen, D. A., & Garry, L. (2000). Multiobjective evolutionary algorithms: analyzing the state-of-the-art. *Evolutionary Computation*, 8(2), 125-147.
- Varian, H. (1999). *Intermediate Microeconomics - A Modern Approach*, Fifth edition. New York: W.W. Norton & Company.
- Verdolini, E., Anadón, L. D., Baker, E., Bosetti, V., & Aleluia Reis, L. (2018). Future prospects for energy technologies: insights from expert elicitations. *Review of Environmental Economics and Policy*, 12(1), 133-153.
- Vieira, M., Pinto-Varela, T., & Barbosa-Póvoa, A. P. (2017). Production and maintenance planning optimisation in biopharmaceutical processes under performance decay using a continuous-time formulation: A multi-objective approach. *Computers & Chemical Engineering*, 107, 111-139.
- Villareal, B., & Karwan, M. (1981). Multicriteria integer programming: A (hybrid) dynamic programming recursive approach. *Mathematical Programming*, 21, 204-223.
- Vithayasrichareon, P., MacGill, I.F. (2012). Portfolio assessments for future generation investment in newly industrializing countries – A case study of Thailand. *Energy*, 44, 1044-1058. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2012.04.042>
- von Neumann, J. (1936). Über Eines Ökonomisches Gleichungssystem und eine Verallgemeinerung des Brouwerschen Fixpunktsatzes. *Ergebnisse eines mathematischen Kolloquium*, σσ. 8, 73-83.
- Vose, D. (1997). Monte Carlo risk analysis modeling. *Fundamentals of risk analysis and risk management*, 67-116.
- Vose, D. (2008). *Risk analysis: a quantitative guide*. John Wiley & Sons.
- Wang, H., Chen, W., Bertram, C., Malik, A., Kriegler, E., Luderer, G., Després, J., Jiang, K., & Krey, V. (2020). Early transformation of the Chinese power sector to avoid additional coal lock-in. *Environmental Research Letters*, 15(2). <https://doi.org/10.1088/1748-9326/AB5D99>

- Westner, G., & Madlener, R. (2010). The benefit of regional diversification of cogeneration investments in Europe: A mean-variance portfolio analysis. *Energy Policy*, 38(12), 7911-7920.
- Weyant, J. (2017). Some contributions of integrated assessment models of global climate change. *Review of Environmental Economics and Policy*, 11(1), 115-137.
- White, D. (1984). A branch and bound method for multiobjective boolean problems. *European Journal of Operational Research*, 15, 126–130.
- Wierzbicki, A. (1982). A Mathematical Basis for Satisficing Decision Making. *Mathematical Modelling*, 3, 391-405.
- Williams, H. P. (1999). *Model Building in Mathematical Programming*. 4th Edition. New York: Wiley.
- Winston, W. L. (2004). *Operations Research: Applications and Algorithms*. Belmont, CA: Brooks/Cole—Thomson Learning.
- Wirl, F. (2000). Lessons from Utility Conservation Programs. *The Energy Journal*, 21(1), 87–108. <https://doi.org/10.5547/ISSN0195-6574-EJ-Vol21-No1-4>
- World Bank (2015) 'Beyond Connections: Energy Access Redefined', Technical Report, 008/15, pp. 1–244. Available at: [http://www.worldbank.org/content/dam/Worldbank/Topics/Energy and Extract/Beyond_Connections_Energy_Access_Redefined_Exec_ESMAP_2015.pdf](http://www.worldbank.org/content/dam/Worldbank/Topics/Energy%20and%20Extract/Beyond_Connections_Energy_Access_Redefined_Exec_ESMAP_2015.pdf).
- World Bank and IEA (2017) GLOBAL TRACKING FRAMEWORK 2017: Progress toward Sustainable Energy. doi: 10.18356/1ae18cd9-en.
- Xia, F., Lu, X., & Song, F. (2020). The role of feed-in tariff in the curtailment of wind power in China. *Energy Economics*, 86. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2019.104661>

- Xidonas, P., Mavrotas, G., Zopounidis, C., & Psarras, J. (2011). IPSSIS: An integrated multicriteria decision support system for equity portfolio construction and selection. *European Journal of Operational Research*, 210(2), 398-409.
- Xin, S., Liang, Y., Zhou, X., Wenjing, L. I., Zhang, J., Song, X., ... & Zhang, H. (2019). A two-stage strategy for the pump optimal scheduling of refined products pipelines. *Chemical Engineering Research and Design*.
- Yu, L., Zhang, C., Yang, H., & Miao, L. (2018). Novel methods for resource allocation in humanitarian logistics considering human suffering. *Computers & Industrial Engineering*, 119, 1-20.
- Zadeh, L. (1963). Optimality and non-scalar-valued performance criteria. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 8(59).
- Zadeh, L.A. (2005). Toward a generalized theory of uncertainty (GTU)—an outline. *Information Science*, 172(1-2):1-40. doi: 10.1016/j.ins.2005.01.017.
- Zeleny, M. (1982). *Multiple Criteria Decision Making*. New York: McGraw Hill.
- Zerrahn, A. (2017). Wind Power and Externalities. *Ecological Economics*, 141, 245–260. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2017.02.016>
- Zhang, W., & Reimann, M. (2014). A simple augmented ϵ -constraint method for multi-objective mathematical integer programming problems. *European Journal of Operational Research*, 234(1), 15-24.
- Zhang, Y., Masuku, C. M., & Biegler, L. T. (2019). An MPCC reactive distillation optimization model for multi-objective Fischer–Tropsch synthesis. In *Computer Aided Chemical Engineering* (Vol. 46, pp. 451-456). Elsevier.
- Zhang, Y.-J., & Chen, M.-Y. (2017). Evaluating the dynamic performance of energy portfolios: Empirical evidence from the DEA directional distance function. *European Journal of Operational Research*. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2017.08.008>

- Zhu, L., & Fan, Y. (2010). Optimization of China's generating portfolio and policy implications based on portfolio theory. *Energy*, 35(3), 1391–1402. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2009.11.024>
- Zionts, S., & Wallenius, J. (1976). An Interactive Programming Method for Solving the Multiple Criteria Problem. *Management Science*, 22, 652-663.
- Zitzler, E., & Thiele, L. (1998). An evolutionary algorithm for multiobjective optimization: A comparative case study. *Parallel Problem Solving from Nature*, σσ. 292-301, 1998.
- Zitzler, E., Deb, K., & Thiele, L. (2000). Comparison of multiobjective evolutionary algorithms: empirical results. *Evolutionary Computation*, σσ. 173-195.
- Zitzler, E., Laumanns, M., & Thiele, L. (2001). SPEA 2: Improving the strength Pareto evolutionary algorithm, TIK-Report 103. Zurich, Switzerland: Swiss Federal Institute of Technology.
- Zon, A. V., & Fuss, S. (2006). Irreversible investment under uncertainty in electricity generation: A clay-clay-vintage portfolio approach with an application to climate change policy in the UK (No. 035). United Nations University-Maastricht Economic and Social Research Institute on Innovation and Technology (MERIT).
- Αποστολοπούλου, Μ. (2011). Μαθηματικές Μέθοδοι Βελτιστοποίησης Προβλημάτων Μεγάλης Κλίμακας. Πάτρα: Διδακτορική Διατριβή, Πανεπιστήμιο Πατρών, Σχολή Θετικών Επιστημών, Τμήμα Μαθηματικών.
- Γεωργίου, Π. (2010). Ανάπτυξη Μοντέλου Μαθηματικού Προγραμματισμού & Κατασκευή Πληροφοριακού Συστήματος Υποστήριξης Αποφάσεων για το Μακροχρόνιο Ενεργειακό Σχεδιασμό του Ελληνικού Συστήματος Ηλεκτροπαραγωγής, Διδακτορική Διατριβή. Αθήνα: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Χημικών Μηχανικών, Τομέας Ανάλυσης, Σχεδιασμού & Ανάπτυξης Διεργασιών & Συστημάτων.
- Εθνικό Σχέδιο Δράσης Ενεργειακής Απόδοσης, ΕΣΔΕΑ. (2014), Γενική Γραμματεία Ενέργειας και Ορυκτών Πρώτων Υλών, Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών και

Εξοικονόμησης Ενέργειας (ΚΑΠΕ), Υπουργείου Περιβάλλοντος Ενέργειας και Κλιματικής Αλλαγής (ΥΠΕΚΑ), Διαθέσιμο στο <https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/20142207.pdf>.

Εθνικό Σχέδιο Δράσης Ενεργειακής Απόδοσης, ΕΣΔΕΑ. (2017), Γενική Γραμματεία Ενέργειας και Ορυκτών Πρώτων Υλών, Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών και Εξοικονόμησης Ενέργειας (ΚΑΠΕ), Υπουργείου Περιβάλλοντος και Ενέργειας (ΥΠΠΕΝ), Διαθέσιμο στο https://ec.europa.eu/energy/sites/default/files/documents/el_neear_2017_el.pdf.

Ετήσια Έκθεση Επίτευξης Εθνικών Στόχων Ενεργειακής Απόδοσης. (2016), Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας, Διεύθυνση Ενεργειακών Πολιτικών & Ενεργειακής Αποδοτικότητας, Τμήμα Ενεργειακής Αποδοτικότητας, Διαθέσιμη στο: <http://ec.europa.eu/energy/en/topics/energy-efficiency/energy-efficiency-directive/national-energy-efficiency-action-plans>.

Ευρωπαϊκή Επιτροπή, Έκθεση της Επιτροπής προς το Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο και το Συμβούλιο, Αξιολόγηση του 2016 σχετικά με την πρόοδο που σημείωσαν τα κράτη μέλη το 2014 προς την επίτευξη των εθνικών στόχων ενεργειακής απόδοσης για το 2020 και την εφαρμογή της οδηγίας 2012/27/ΕΕ για την ενεργειακή απόδοση, όπως ορίζεται στο άρθρο 24 παράγραφος 3 της οδηγίας 2012/27/ΕΕ για την ενεργειακή απόδοση, Βρυξέλλες, 1.2.2017, COM(2017) 56 final, Διαθέσιμο στο: <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EL/TXT/PDF/?uri=CELEX:52017DC0056&from=EN>.

Ευστρατιάδης, Α. (2008). Μη γραμμικές μέθοδοι σε πολυκριτηριακά προβλήματα βελτιστοποίησης υδατικών πόρων, με έμφαση στη βαθμονόμηση υδρολογικών μοντέλων. Αθήνα: Διδακτορική Διατριβή, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος.

Ευστρατιάδης, Α., & Μακρόπουλος, Χ. (2012). Θεμελιώδεις έννοιες βελτιστοποίησης και κλασικές μαθηματικές μέθοδοι. Σημειώσεις στα πλαίσια

του μαθήματος: Βελτιστοποίηση συστημάτων υδατικών πόρων – Υδροπληροφορική, Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος.

Καρατζάς, Γ., & Παπαδοπούλου, Μ. (2016). Μέθοδοι Βελτιστοποίησης Περιβαλλοντικών Συστημάτων. Θεσσαλονίκη: Εκδόσεις Δισίγμα.

Καρλάυτης, Μ., & Λάγαρος, Δ. Ν. (2010). Επιχειρησιακή έρευνα και βελτιστοποίηση για μηχανικούς. Αθήνα: Συμμετρία.

Κρασόπουλος, Χ. (2017). Σχεδίαση και βελτιστοποίηση λειτουργίας κινητήρων μονίμων μαγνητών: ανάπτυξη αλγορίθμων εκμάθησης και θεώρηση του κύκλου φόρτισης. Αθήνα: Διδακτορική Διατριβή, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, Τομέας Ηλεκτρικής Ισχύος, Εργαστήριο Ηλεκτρικών Μηχανών και Ηλεκτρονικών Ισχύος.

Μαυρωτάς, Γ. (2000). Πολυκριτηριακός προγραμματισμός σε συνθήκες αβεβαιότητας. Κατασκευή συστήματος υποστήριξης αποφάσεων και εφαρμογή στον ενεργειακό σχεδιασμό. Αθήνα: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Τμήμα Χημικών Μηχανικών, Εργαστήριο Βιομηχανικής & Ενεργειακής Οικονομίας.

Μπενιάκαρ, Μ. (2014). Πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση κινητήρων με θεώρηση των απωλειών των μονίμων μαγνητών για εφαρμογές ηλεκτροκίνησης. Αθήνα: Διδακτορική Διατριβή, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, Τομέας Ηλεκτρικής Ισχύος.

Νόμος 4342/2015 - ΦΕΚ 143/Α/9-11-2015, Συνταξιοδοτικές ρυθμίσεις, ενσωμάτωση στο Ελληνικό Δίκαιο της Οδηγίας 2012/27/ΕΕ του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου της 25ης Οκτωβρίου 2012 «Για την ενεργειακή απόδοση, την τροποποίηση των Οδηγιών 2009/125/ΕΚ και 2010/30/ΕΕ και την κατάργηση των Οδηγιών 2004/8/ΕΚ και 2006/32/ΕΚ», όπως τροποποιήθηκε από την Οδηγία 2013/12/ΕΕ του Συμβουλίου της 13ης Μαΐου 2013 «Για την προσαρμογή της Οδηγίας 2012/27/ΕΕ του Ευρωπαϊκού

Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου για την ενεργειακή απόδοση, λόγω της προσχώρησης της Δημοκρατίας της Κροατίας» και άλλες διατάξεις.

Οδηγία 2012/27/ΕΕ του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου της 25ης Οκτωβρίου 2012 για την ενεργειακή απόδοση, την τροποποίηση των οδηγιών 2009/125/ΕΚ και 2010/30/ΕΕ και την κατάργηση των οδηγιών 2004/8/ΕΚ και 2006/32/ΕΚ, Διαθέσιμη στο: <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EL/TXT/PDF/?uri=CELEX:32012L0027&from=EL>.

Παράρτημα 1

Άρθρα σε έγκριτα επιστημονικά περιοδικά

Van de Ven, D. J., Nikas, A., Koasidis, K., Forouli, A., Casseti, G., Chiodi, A., ... & Gambhir, A. (2022). Different shades of green: diverse emissions and employment trade-offs from COVID-19 recovery spending in clean energy among major economies. *One Earth*, in press.

Forouli, A., Pagonis, A., Nikas, A., Koasidis, K., Xexakis, G., Koutsellis, T., ... & Doukas, H. AUGMECON-Py: A Python Framework for Multi-Objective Linear Optimisation Under Uncertainty. Available at SSRN 4133131.

Forouli, A., Nikas, A., Van de Ven, D. J., Sampedro, J., & Doukas, H. (2020). A multiple-uncertainty analysis framework for integrated assessment modelling of several sustainable development goals. *Environmental Modelling & Software*, 131, 104795.

Nikas, A., Fountoulakis, A., Forouli, A., & Doukas, H. (2020). A robust augmented ϵ -constraint method (AUGMECON-R) for finding exact solutions of multi-objective linear programming problems. *Operational Research*, 1-42.

Trachanas, G. P., Forouli, A., Gkonis, N., & Doukas, H. (2020). Hedging uncertainty in energy efficiency strategies: a minimax regret analysis. *Operational Research*, 20(4), 2229-2244.

Forouli, A., Gkonis, N., Nikas, A., Siskos, E., Doukas, H., & Tourkolias, C. (2019). Energy efficiency promotion in Greece in light of risk: Evaluating policies as portfolio assets. *Energy*, *170*, 818-831.

Forouli, A., Doukas, H., Nikas, A., Sampedro, J., & Van de Ven, D. J. (2019). Identifying optimal technological portfolios for European power generation towards climate change mitigation: a robust portfolio analysis approach. *Utilities Policy*, *57*, 33-42.

Van de Ven, D. J., Sampedro, J., Johnson, F. X., Bailis, R., Forouli, A., Nikas, A., ... & Doukas, H. (2019). Integrated policy assessment and optimisation over multiple sustainable development goals in Eastern Africa. *Environmental Research Letters*, *14*(9), 094001.

Κεφάλαια σε διεθνή επιστημονικά βιβλία

Nikas, A., Gkonis, N., Forouli, A., Siskos, E., Arsenopoulos, A., Papapostolou, A., ... & Doukas, H. (2019). Greece: From near-term actions to long-term pathways—risks and uncertainties associated with the national energy efficiency framework. In *Narratives of Low-Carbon Transitions* (pp. 180-198). Routledge.

Ανακοινώσεις σε επιστημονικά συνέδρια

Forouli, A., van de Ven, D. J., Koasidis, K., Nikas, A., Gambhir, A., Koutsellis, T., ... & Doukas, H. (2021, June). Multi-Objective Evaluation of Renewable Technology Subsidy Portfolios from COVID-19 Recovery Packages. In *Energy, COVID, and Climate Change, 1st IAEE Online Conference, June 7-9, 2021*. International Association for Energy Economics.

Nikas, A., Forouli, A., van de Ven, D. J., Koasidis, K., Gambhir, A., Koutsellis, T., Doukas, H., Identifying optimal COVID-19 recovery packages: a robust IAM-

portfolio analysis of renewable energy technological subsidization, In *31st European Conference on Operational Research, EURO 2021, July 11-14, 2021*.

van de Ven, D. J., Forouli, A., Koasidis, K., Gambhir, A., Koutsellis, T., Doukas H., Nikas, A. Allocation of European Green COVID-19 recovery packages to mitigate emissions and create jobs in crisis years. In *XVI Congreso de la Asociación Española para la Economía Energética, June 29-30, 2021*

Nikas A., Van de Ven, D.J., Forouli, A., Koasidis, K. Mittal, S., Giarola, S., Gambhir, A., Köberle, A., Chiodi, A., Cassetti, G., Perdana, S., Vielle, M., Koutsellis, T., Doukas, H. Allocating global COVID-19 recovery packages over low-carbon technologies to optimize between emission reductions and employment gains. In *Fourteenth Annual Meeting of the IAMC, 29 November - 3 December 2021*.

Nikas A., Van de Ven, D.J., Forouli, A., Koasidis, K. Mittal, S., Giarola, S., Gambhir, A., Köberle, A., Chiodi, A., Cassetti, G., Perdana, S., Vielle, M., Koutsellis, T., Doukas, H. Investigating optimal allocation of green recovery funds in the EU. In *2021 EU Conference on Modelling for Policy support: collaborating across disciplines to tackle key policy challenges, 22 – 26 November 2021*

Forouli, A. Nikas, A., Van de Ven, D.J., Samperdo, J., Doukas, H., Analysing policy robustness based on Shared Socioeconomic Pathways in an integrated assessment study with portfolio analysis over multiple objectives in eastern Africa, *12th Annual Meeting of the Integrated Assessment Modelling Consortium*, December 2019, Tsukuba, Japan

Forouli, A., Doukas, H., Nikas, A., Sampedro, J., & Van de Ven, D. J. (2019). Identifying optimal technological portfolios for European power generation towards climate change mitigation. *XIV Conference of the Spanish Association for Energy Economics*, January-February 2019, Coruna, Spain.

Van De Ven, D. Sampedro, J., Johnson, F., Bailis, R., Forouli, A. et al., (2018). Identifying optimal subsidy portfolios to simultaneously achieve SDG 3 (health),

7 (energy access) and 13 (climate action) in Eastern Africa. *Eleventh Annual Meeting of the Integrated Assessment Modelling Consortium*, November 2018, Seville, Spain.

Nikas, A., Gkonis, N., Forouli, A., & Doukas, H. (2018). Fostering innovative energy policy making through integrated approaches. *6th International Conference on Renewable Energy Sources & Energy Efficiency*, November 1-2, 2018, Nicosia, Cyprus.

Πρόσθετες δημοσιεύσεις

Forouli, A., Papazoglou, G., Bakirtzis, E. A., Biskas, P., Bakirtzis, A. (2022). Design of a continuous local flexibility market with AC power flow constraints. *11th Bulk Power Systems Dynamics and Control Symposium*, July 2022, Banff, Canada.

Papazoglou, G., Forouli, A., Bakirtzis, E. A., Biskas, P., Bakirtzis, A. (2022). Day-Ahead Local Flexibility Market for Active and Reactive Power with Linearized Network Constraints. *Electric Power Systems Research*, 212, 108317.

Forouli, A., Bakirtzis, E. A., Papazoglou, G., Oureilidis, K., Gkountis, V., Candido, L., ... & Biskas, P. (2021). Assessment of Demand Side Flexibility in European Electricity Markets: A Country Level Review. *Energies*, 14(8), 2324.

Karakosta, C., Flamos, A., & Forouli, A. (2018). Identification of climate policy knowledge needs: a stakeholders consultation approach. *International Journal of Climate Change Strategies and Management*. 10(5), 772-795.

Παράρτημα 2

Δεδομένα προβλήματος 4kp40

Table c(J,K) 'matrix of objective function coefficients C'

| | k2 | k4 | k3 | k1 |
|-----|----|----|----|----|
| j1 | 7 | 22 | 17 | 5 |
| j2 | 13 | 10 | 11 | 25 |
| j3 | 16 | 20 | 5 | 8 |
| j4 | 19 | 20 | 11 | 18 |
| j5 | 24 | 20 | 3 | 20 |
| j6 | 24 | 3 | 7 | 10 |
| j7 | 23 | 24 | 4 | 7 |
| j8 | 6 | 7 | 19 | 20 |
| j9 | 5 | 24 | 8 | 17 |
| j10 | 20 | 16 | 8 | 11 |
| j11 | 10 | 24 | 3 | 10 |
| j12 | 7 | 14 | 7 | 15 |
| j13 | 23 | 20 | 9 | 2 |
| j14 | 3 | 8 | 15 | 20 |
| j15 | 7 | 3 | 16 | 23 |
| j16 | 20 | 19 | 19 | 18 |
| j17 | 9 | 10 | 10 | 10 |
| j18 | 13 | 4 | 12 | 5 |
| j19 | 20 | 2 | 12 | 4 |
| j20 | 18 | 17 | 13 | 11 |
| j21 | 17 | 10 | 12 | 23 |
| j22 | 6 | 10 | 7 | 24 |
| j23 | 7 | 15 | 19 | 8 |
| j24 | 10 | 7 | 11 | 15 |
| j25 | 11 | 12 | 24 | 12 |
| j26 | 5 | 7 | 22 | 8 |
| j27 | 22 | 10 | 5 | 3 |
| j28 | 16 | 17 | 21 | 21 |
| j29 | 16 | 7 | 13 | 16 |
| j30 | 3 | 10 | 14 | 5 |
| j31 | 8 | 23 | 24 | 11 |
| j32 | 3 | 11 | 4 | 19 |
| j33 | 20 | 10 | 5 | 2 |
| j34 | 18 | 15 | 7 | 9 |

| | | | | |
|-----|----|----|----|----|
| j35 | 10 | 4 | 5 | 19 |
| j36 | 22 | 9 | 8 | 21 |
| j37 | 6 | 19 | 13 | 8 |
| j38 | 20 | 10 | 10 | 3 |
| j39 | 12 | 24 | 17 | 6 |
| j40 | 11 | 24 | 16 | 21 |

Table a(J,I) 'matrix of constraint coefficients A'

| | i1 | i2 | i3 | i4 |
|-----|-----|-----|-----|-----|
| j1 | 78 | 59 | 53 | 76 |
| j2 | 94 | 67 | 75 | 51 |
| j3 | 97 | 88 | 117 | 88 |
| j4 | 116 | 107 | 101 | 102 |
| j5 | 50 | 65 | 77 | 90 |
| j6 | 62 | 77 | 88 | 114 |
| j7 | 66 | 93 | 52 | 107 |
| j8 | 110 | 89 | 64 | 94 |
| j9 | 63 | 107 | 118 | 57 |
| j10 | 59 | 110 | 87 | 71 |
| j11 | 118 | 95 | 66 | 58 |
| j12 | 104 | 77 | 101 | 114 |
| j13 | 117 | 111 | 116 | 106 |
| j14 | 120 | 97 | 105 | 94 |
| j15 | 65 | 100 | 65 | 109 |
| j16 | 102 | 95 | 97 | 73 |
| j17 | 100 | 69 | 84 | 81 |
| j18 | 97 | 99 | 55 | 77 |
| j19 | 61 | 66 | 99 | 53 |
| j20 | 102 | 113 | 103 | 85 |
| j21 | 71 | 89 | 115 | 71 |
| j22 | 86 | 73 | 91 | 99 |
| j23 | 53 | 85 | 98 | 56 |
| j24 | 110 | 88 | 64 | 84 |
| j25 | 58 | 84 | 113 | 101 |
| j26 | 87 | 58 | 60 | 50 |
| j27 | 69 | 76 | 83 | 69 |
| j28 | 69 | 79 | 111 | 83 |
| j29 | 71 | 96 | 81 | 113 |
| j30 | 83 | 75 | 64 | 94 |
| j31 | 85 | 112 | 110 | 84 |

| | | | | |
|-----|-----|-----|-----|-----|
| j32 | 88 | 81 | 80 | 75 |
| j33 | 109 | 63 | 61 | 71 |
| j34 | 115 | 103 | 56 | 80 |
| j35 | 106 | 112 | 69 | 105 |
| j36 | 95 | 68 | 75 | 76 |
| j37 | 98 | 71 | 71 | 83 |
| j38 | 87 | 52 | 52 | 80 |
| j39 | 102 | 94 | 109 | 54 |
| j40 | 56 | 107 | 63 | 101 |

Δεδομένα προβλήματος 4kp50

Table c(J,K) 'matrix of objective function coefficients C'

| | k1 | k3 | k2 | k4 |
|-----|----|----|----|----|
| j1 | 68 | 65 | 65 | 66 |
| j2 | 66 | 50 | 63 | 69 |
| j3 | 59 | 53 | 57 | 62 |
| j4 | 55 | 68 | 69 | 68 |
| j5 | 57 | 51 | 58 | 60 |
| j6 | 67 | 56 | 63 | 70 |
| j7 | 55 | 62 | 53 | 56 |
| j8 | 54 | 64 | 53 | 59 |
| j9 | 57 | 67 | 59 | 65 |
| j10 | 64 | 50 | 62 | 66 |
| j11 | 68 | 59 | 58 | 54 |
| j12 | 62 | 70 | 69 | 50 |
| j13 | 53 | 60 | 67 | 65 |
| j14 | 70 | 62 | 60 | 58 |
| j15 | 52 | 64 | 51 | 63 |
| j16 | 55 | 64 | 53 | 53 |
| j17 | 64 | 56 | 61 | 53 |
| j18 | 52 | 61 | 57 | 57 |
| j19 | 65 | 63 | 70 | 57 |
| j20 | 57 | 69 | 63 | 67 |
| j21 | 61 | 56 | 57 | 61 |
| j22 | 54 | 68 | 61 | 59 |
| j23 | 50 | 64 | 52 | 68 |
| j24 | 57 | 67 | 64 | 52 |
| j25 | 57 | 65 | 57 | 57 |
| j26 | 58 | 67 | 66 | 58 |
| j27 | 63 | 64 | 60 | 57 |

| | | | | |
|-----|----|----|----|----|
| j28 | 55 | 69 | 70 | 64 |
| j29 | 64 | 69 | 63 | 53 |
| j30 | 67 | 60 | 55 | 55 |
| j31 | 68 | 69 | 60 | 67 |
| j32 | 63 | 69 | 66 | 60 |
| j33 | 57 | 62 | 67 | 62 |
| j34 | 67 | 57 | 67 | 56 |
| j35 | 67 | 58 | 68 | 56 |
| j36 | 68 | 56 | 52 | 60 |
| j37 | 56 | 65 | 70 | 68 |
| j38 | 52 | 69 | 52 | 59 |
| j39 | 54 | 62 | 51 | 52 |
| j40 | 55 | 69 | 64 | 69 |
| j41 | 50 | 52 | 64 | 57 |
| j42 | 63 | 63 | 62 | 69 |
| j43 | 67 | 54 | 68 | 61 |
| j44 | 68 | 64 | 57 | 61 |
| j45 | 58 | 67 | 57 | 53 |
| j46 | 52 | 52 | 67 | 53 |
| j47 | 63 | 62 | 55 | 60 |
| j48 | 53 | 53 | 65 | 63 |
| j49 | 52 | 54 | 53 | 69 |
| j50 | 67 | 67 | 58 | 66 |

Table a(J,I) 'matrix of constraint coefficients A'

| | i1 | i2 | i3 | i4 |
|-----|----|----|----|----|
| j1 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| j2 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| j3 | 1 | 0 | 1 | 1 |
| j4 | 0 | 0 | 1 | 1 |
| j5 | 1 | 1 | 0 | 1 |
| j6 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| j7 | 1 | 1 | 1 | 0 |
| j8 | 1 | 1 | 0 | 0 |
| j9 | 1 | 0 | 1 | 1 |
| j10 | 0 | 1 | 0 | 1 |
| j11 | 1 | 0 | 1 | 1 |
| j12 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| j13 | 0 | 0 | 0 | 1 |

| | | | | |
|-----|---|---|---|---|
| j14 | 1 | 1 | 0 | 0 |
| j15 | 1 | 0 | 1 | 0 |
| j16 | 1 | 0 | 0 | 1 |
| j17 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| j18 | 1 | 0 | 1 | 1 |
| j19 | 0 | 1 | 1 | 0 |
| j20 | 1 | 1 | 0 | 0 |
| j21 | 0 | 1 | 1 | 0 |
| j22 | 1 | 1 | 0 | 1 |
| j23 | 1 | 0 | 1 | 0 |
| j24 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| j25 | 1 | 1 | 0 | 1 |
| j26 | 0 | 1 | 1 | 1 |
| j27 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| j28 | 1 | 1 | 0 | 1 |
| j29 | 1 | 1 | 0 | 1 |
| j30 | 1 | 1 | 0 | 0 |
| j31 | 0 | 0 | 1 | 1 |
| j32 | 1 | 0 | 1 | 1 |
| j33 | 1 | 1 | 0 | 0 |
| j34 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| j35 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| j36 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| j37 | 1 | 0 | 0 | 1 |
| j38 | 1 | 1 | 1 | 0 |
| j39 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| j40 | 1 | 0 | 0 | 1 |
| j41 | 1 | 1 | 0 | 0 |
| j42 | 0 | 0 | 1 | 1 |
| j43 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| j44 | 1 | 1 | 1 | 0 |
| j45 | 1 | 1 | 1 | 0 |
| j46 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| j47 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| j48 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| j49 | 1 | 1 | 0 | 0 |
| j50 | 0 | 0 | 1 | 0 |

Δεδομένα προβλήματος 5kr40

Table c(J,K) 'matrix of objective function coefficients C'

| | k1 | k2 | k3 | k4 | k5 |
|-----|----|----|----|----|----|
| j1 | 3 | 10 | 4 | 9 | 10 |
| j2 | 5 | 4 | 8 | 9 | 4 |
| j3 | 5 | 5 | 6 | 6 | 7 |
| j4 | 5 | 3 | 3 | 4 | 5 |
| j5 | 8 | 2 | 2 | 9 | 7 |
| j6 | 5 | 5 | 9 | 6 | 4 |
| j7 | 9 | 5 | 3 | 6 | 7 |
| j8 | 4 | 3 | 3 | 6 | 2 |
| j9 | 4 | 2 | 8 | 3 | 4 |
| j10 | 3 | 9 | 7 | 5 | 7 |
| j11 | 7 | 9 | 8 | 5 | 9 |
| j12 | 8 | 3 | 5 | 4 | 3 |
| j13 | 6 | 9 | 7 | 6 | 9 |
| j14 | 8 | 7 | 9 | 5 | 4 |
| j15 | 4 | 5 | 4 | 6 | 6 |
| j16 | 5 | 2 | 8 | 3 | 8 |
| j17 | 5 | 5 | 6 | 5 | 2 |
| j18 | 5 | 2 | 5 | 5 | 3 |
| j19 | 3 | 7 | 5 | 8 | 7 |
| j20 | 3 | 7 | 4 | 6 | 5 |
| j21 | 9 | 5 | 10 | 6 | 3 |
| j22 | 5 | 7 | 8 | 10 | 4 |
| j23 | 9 | 7 | 8 | 6 | 9 |
| j24 | 4 | 8 | 4 | 4 | 2 |
| j25 | 4 | 4 | 10 | 7 | 4 |
| j26 | 5 | 3 | 5 | 8 | 7 |
| j27 | 2 | 7 | 4 | 5 | 6 |
| j28 | 7 | 6 | 5 | 6 | 7 |
| j29 | 9 | 6 | 9 | 8 | 3 |
| j30 | 9 | 3 | 8 | 4 | 7 |
| j31 | 3 | 8 | 10 | 4 | 10 |
| j32 | 9 | 9 | 5 | 10 | 9 |
| j33 | 5 | 3 | 7 | 5 | 3 |
| j34 | 5 | 6 | 7 | 4 | 7 |
| j35 | 7 | 6 | 7 | 4 | 8 |
| j36 | 3 | 9 | 3 | 8 | 4 |
| j37 | 8 | 2 | 7 | 4 | 4 |

| | | | | | |
|-----|---|----|---|----|---|
| j38 | 5 | 7 | 7 | 3 | 9 |
| j39 | 8 | 10 | 9 | 8 | 5 |
| j40 | 8 | 4 | 8 | 10 | 7 |

Table a(J,I) 'matrix of constraint coefficients A'

| | i1 | i2 | i3 | i4 | i5 |
|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| j1 | 285 | 153 | 237 | 204 | 217 |
| j2 | 308 | 192 | 345 | 162 | 289 |
| j3 | 124 | 150 | 72 | 154 | 298 |
| j4 | 131 | 262 | 227 | 299 | 370 |
| j5 | 290 | 130 | 245 | 255 | 155 |
| j6 | 315 | 71 | 134 | 270 | 253 |
| j7 | 101 | 179 | 359 | 213 | 325 |
| j8 | 323 | 52 | 57 | 189 | 398 |
| j9 | 252 | 244 | 186 | 146 | 358 |
| j10 | 232 | 389 | 324 | 232 | 155 |
| j11 | 370 | 382 | 220 | 270 | 194 |
| j12 | 232 | 79 | 202 | 284 | 184 |
| j13 | 265 | 183 | 199 | 277 | 146 |
| j14 | 355 | 62 | 60 | 79 | 344 |
| j15 | 141 | 80 | 161 | 68 | 208 |
| j16 | 163 | 174 | 139 | 135 | 286 |
| j17 | 152 | 371 | 215 | 208 | 148 |
| j18 | 346 | 192 | 130 | 389 | 225 |
| j19 | 397 | 305 | 386 | 124 | 143 |
| j20 | 135 | 299 | 107 | 248 | 259 |
| j21 | 305 | 178 | 303 | 121 | 239 |
| j22 | 201 | 357 | 138 | 145 | 190 |
| j23 | 75 | 234 | 155 | 212 | 156 |
| j24 | 369 | 350 | 318 | 102 | 94 |
| j25 | 390 | 109 | 276 | 287 | 300 |
| j26 | 115 | 260 | 263 | 79 | 368 |
| j27 | 378 | 66 | 226 | 116 | 150 |
| j28 | 80 | 146 | 349 | 197 | 65 |
| j29 | 380 | 144 | 323 | 266 | 385 |
| j30 | 386 | 265 | 389 | 238 | 286 |
| j31 | 63 | 148 | 98 | 245 | 235 |
| j32 | 324 | 208 | 334 | 101 | 347 |
| j33 | 163 | 251 | 399 | 85 | 222 |
| j34 | 152 | 131 | 95 | 252 | 189 |

| | | | | | |
|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| j35 | 94 | 341 | 125 | 250 | 215 |
| j36 | 360 | 297 | 164 | 361 | 199 |
| j37 | 111 | 140 | 135 | 195 | 240 |
| j38 | 290 | 337 | 316 | 151 | 53 |
| j39 | 187 | 305 | 185 | 238 | 352 |
| j40 | 272 | 159 | 74 | 269 | 186 |

Δεδομένα προβλήματος 6kp50

Table c(J,K) 'matrix of objective function coefficients C'

| | k1 | k2 | k3 | k4 | k5 | k6 |
|-----|----|----|----|----|----|----|
| j1 | 2 | 2 | 5 | 3 | 0 | 1 |
| j2 | 5 | 3 | 3 | 4 | 4 | 3 |
| j3 | 0 | 3 | 0 | 1 | 0 | 2 |
| j4 | 0 | 2 | 1 | 3 | 5 | 4 |
| j5 | 5 | 4 | 5 | 4 | 3 | 4 |
| j6 | 4 | 3 | 1 | 4 | 5 | 5 |
| j7 | 2 | 0 | 1 | 3 | 3 | 5 |
| j8 | 3 | 1 | 4 | 1 | 0 | 2 |
| j9 | 2 | 2 | 2 | 1 | 5 | 5 |
| j10 | 0 | 5 | 3 | 0 | 1 | 4 |
| j11 | 1 | 4 | 4 | 3 | 1 | 2 |
| j12 | 2 | 0 | 1 | 0 | 5 | 4 |
| j13 | 5 | 4 | 1 | 2 | 1 | 3 |
| j14 | 2 | 0 | 4 | 2 | 3 | 3 |
| j15 | 1 | 4 | 2 | 4 | 1 | 2 |
| j16 | 4 | 1 | 3 | 1 | 4 | 2 |
| j17 | 2 | 1 | 2 | 4 | 4 | 2 |
| j18 | 0 | 4 | 2 | 4 | 4 | 4 |
| j19 | 4 | 4 | 3 | 3 | 0 | 4 |
| j20 | 3 | 2 | 0 | 0 | 2 | 3 |
| j21 | 1 | 3 | 2 | 5 | 1 | 1 |
| j22 | 3 | 1 | 2 | 3 | 0 | 1 |
| j23 | 4 | 1 | 1 | 3 | 0 | 1 |
| j24 | 4 | 4 | 3 | 5 | 1 | 0 |
| j25 | 4 | 5 | 4 | 2 | 4 | 2 |
| j26 | 4 | 3 | 4 | 0 | 4 | 4 |
| j27 | 1 | 4 | 1 | 3 | 1 | 2 |
| j28 | 3 | 4 | 0 | 0 | 2 | 4 |
| j29 | 2 | 4 | 1 | 0 | 4 | 1 |
| j30 | 3 | 2 | 3 | 3 | 5 | 1 |

| | | | | | | |
|-----|---|---|---|---|---|---|
| j31 | 5 | 4 | 0 | 2 | 4 | 0 |
| j32 | 4 | 4 | 3 | 4 | 0 | 1 |
| j33 | 3 | 2 | 1 | 2 | 5 | 2 |
| j34 | 0 | 3 | 5 | 0 | 3 | 2 |
| j35 | 3 | 1 | 4 | 3 | 3 | 1 |
| j36 | 4 | 4 | 2 | 2 | 3 | 1 |
| j37 | 2 | 2 | 1 | 3 | 1 | 2 |
| j38 | 2 | 4 | 2 | 5 | 1 | 3 |
| j39 | 5 | 5 | 3 | 0 | 4 | 1 |
| j40 | 0 | 2 | 5 | 2 | 1 | 3 |
| j41 | 4 | 0 | 5 | 1 | 1 | 3 |
| j42 | 3 | 2 | 5 | 2 | 4 | 3 |
| j43 | 4 | 2 | 4 | 5 | 4 | 5 |
| j44 | 3 | 4 | 4 | 3 | 3 | 0 |
| j45 | 1 | 4 | 2 | 4 | 3 | 3 |
| j46 | 3 | 4 | 1 | 5 | 2 | 2 |
| j47 | 1 | 3 | 2 | 2 | 5 | 2 |
| j48 | 4 | 4 | 4 | 3 | 3 | 0 |
| j49 | 1 | 1 | 4 | 3 | 4 | 2 |
| j50 | 1 | 3 | 2 | 3 | 3 | 5 |

Table a(J,I) 'matrix of constraint coefficients A'

| | i1 | i2 | i3 | i4 | i5 | i6 |
|-----|----|----|----|----|----|----|
| j1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| j2 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 |
| j3 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 |
| j4 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 |
| j5 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 |
| j6 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 |
| j7 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 |
| j8 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 |
| j9 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 |
| j10 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 |
| j11 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 |
| j12 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 |
| j13 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 |
| j14 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 |
| j15 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 |
| j16 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 |
| j17 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 |

| | | | | | | |
|-----|---|---|---|---|---|---|
| j18 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| j19 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 |
| j20 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 |
| j21 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 |
| j22 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 |
| j23 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 |
| j24 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 |
| j25 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| j26 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 |
| j27 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 |
| j28 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| j29 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 |
| j30 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 |
| j31 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 |
| j32 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 |
| j33 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 |
| j34 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| j35 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 |
| j36 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 |
| j37 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 |
| j38 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 |
| j39 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 |
| j40 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| j41 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 |
| j42 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 |
| j43 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 |
| j44 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| j45 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 |
| j46 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 |
| j47 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 |
| j48 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 |
| j49 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| j50 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 |

Παράρτημα 3

Υλοποίηση του αλγορίθμου επίλυσης της βελτιστοποίησης AUGMECON - R

```
import datetime
import pyomo.environ as p
import numpy as np
import copy
import math
import pandas as pd
from pathlib import Path

class Solution:
    def __init__(self, point, objective_values):
        self.point = point
        self.objective_values = objective_values

    def display(self):
        print('values:', self.objective_values, 'point:', self.point)

class MoipAugmeconR:
    def __init__(
        self,
        pyomo_model,
        solver=p.SolverFactory('gurobi', solver_io='python'),
        model_name="Unknown",
        min_to_nadir_undercut=.8,
        fixed_nadirs=None
    ):

        self.original_model = pyomo_model
        self.undo_auto_swap_proxy = pyomo_model.undo_auto_swap_proxy
        self.model = copy.deepcopy(self.original_model)
        self.created_date = datetime.datetime.now()
        self.name = model_name + '_' +
str(self.created_date).replace(':', '-')
        self.solver = solver
        self.fixed_nadirs = fixed_nadirs

        self.objectives_count = len(self.original_model.obj_list)
        self.decision_var_count =
len(self.original_model.DecisionVariable)

        # payoff table props
        self.min_to_nadir_undercut = min_to_nadir_undercut
        self.payoff_table = np.full((self.objectives_count + 1,
self.objectives_count + 1), np.inf)
        self.objective_maximums = np.zeros((self.objectives_count +
1))

        self.nadir_values = np.zeros((self.objectives_count + 1))

        # augmecon model props
        self.augmecon_model = copy.deepcopy(self.original_model)
```

```

self.current_grid_point = np.zeros((self.objectives_count +
1))

self.flags = {}
self.models_solved = 0
self.all_solutions = {}
self.pareto_front = {}
self.infeasibilities = 0

# run augmecon
self.before_aug_r = datetime.datetime.now()
self.after_aug_r = datetime.datetime.now()
# self.execute()

def get_obj_ordered_by_ranges_desc(self):
self.create_payoff_table()
ranges = [self.objective_maximums[i] - self.nadir_values[i]
for i in self.range_objectives()]
indices = np.argsort(ranges)
r = list(map(lambda x: x + 1, indices[::-1]))
return r

def execute(self):
self.create_payoff_table()
self.print_payoff_table()
self.build_augmecon_problem()
# self.print_augmecon_problem()
self.before_aug_r = datetime.datetime.now()
self.run_augmecon_r()
self.after_aug_r = datetime.datetime.now()
self.display_pareto()
print('total time', datetime.datetime.now() -
self.created_date)
print('total time of running the augmecon r algorithm',
self.after_aug_r - self.before_aug_r)
print('')
print("total models calculated", self.models_solved)
print("infeasibilities", self.infeasibilities)
print("pareto sol num", len(self.pareto_front.values()))

def range_objectives(self):
return range(1, self.objectives_count + 1)

def range_slacks(self):
return range(2, self.objectives_count + 1)

def range_decision_vars(self):
return range(self.decision_var_count)

def reset_solution_counters(self):
self.models_solved = 0
self.infeasibilities = 0

def solve_model(self):
self.solver.options['mipgap'] = 0.0
return self.solver.solve(self.model)

def solve_augmecon_model(self):
self.models_solved += 1
self.solver.options['mipgap'] = 0.0
return self.solver.solve(self.augmecon_model)

```



```

def activate_objective(self, i):
    self.model.obj_list[i].activate()

def deactivate_objective(self, i):
    self.model.obj_list[i].deactivate()

def deactivate_all_objectives(self):
    self.model.obj_list.deactivate()

def create_payoff_table(self):
    for i in self.range_objectives():
        self.activate_objective(i)
        self.solve_model()
        self.payoff_table[i, i] = self.model.obj_list[i]()
        self.deactivate_objective(i)
        self.objective_maximums[i] = self.model.obj_list[i]()

    self.model.aux_con = p.ConstraintList()
    aux_con_index = 0
    for i in self.range_objectives():
        self.model.aux_con.add(expr=self.model.obj_list[i].expr
== self.payoff_table[i, i])
        aux_con_index += 1
        for j_plus in range(i, i + self.objectives_count - 1):
            j = (j_plus % self.objectives_count) + 1
            if i != j:
                self.activate_objective(j)
                self.solve_model()
                temp_value = self.model.obj_list[j]()
                self.deactivate_objective(j)
                self.payoff_table[i, j] = round(temp_value, 10)

self.model.aux_con.add(expr=self.model.obj_list[j].expr ==
temp_value)
                aux_con_index += 1
            for x in range(1, aux_con_index + 1):
                self.model.aux_con[x].deactivate()
        del self.model.aux_con

    for j in self.range_objectives():
        self.nadir_values[j] = min(
            round(min(self.payoff_table[i, j] for i in
self.range_objectives()) * self.min_to_nadir_undercut, 0),
            round(min(self.payoff_table[i, j] for i in
self.range_objectives()) * (1/self.min_to_nadir_undercut), 0)
        )

def print_payoff_table(self):
    print('')
    print('=====')
    print('      payoff table      ')
    print('=====')
    print('')
    print(self.payoff_table)
    print('')
    print('=====      max      =====\n',
self.objective_maximums)
    print('')
    print('=====      nadir      =====\n', self.nadir_values)
    print('( note: undercut factor', self.min_to_nadir_undercut,
' )')

```

```

print('')
if self.fixed_nadirs:
    print('payoff nadirs will be ignored, due to user setting
exact nadir values for the grid.')
    print(self.fixed_nadirs)
print('')
print('')

def build_augmecon_problem(self):
    epsilon = 10e-3
    slack_epsilon = [10 ** (2-x) for x in
range(self.objectives_count+1)]

    self.augmecon_model.SlackVarSet = p.Set(initialize=[x for x
in self.range_slacks()])
    self.augmecon_model.SlackVar =
p.Var(self.augmecon_model.SlackVarSet, within=p.NonNegativeReals)
    self.augmecon_model.ObjRHS =
p.Param(self.augmecon_model.SlackVarSet, within=p.Reals,
mutable=True)

    for i in self.range_slacks():
        self.augmecon_model.obj_list[1].expr = \
            self.augmecon_model.obj_list[1].expr \
            + epsilon * slack_epsilon[i] * \
            self.augmecon_model.SlackVar[i] /
(self.objective_maximums[i] - self.nadir_values[i])

    self.augmecon_model.augmecon_objective = \
        p.Objective(expr=self.augmecon_model.obj_list[1].expr,
sense=p.maximize)

    self.augmecon_model.con_list = p.ConstraintList()
    for i in self.range_slacks():
        if self.augmecon_model.obj_list[i].sense == p.minimize:
            self.augmecon_model.con_list.add(
                expr=self.augmecon_model.obj_list[i].expr
                + self.augmecon_model.SlackVar[i] ==
self.augmecon_model.ObjRHS[i])
        if self.augmecon_model.obj_list[i].sense == p.maximize:
            self.augmecon_model.con_list.add(
                expr=self.augmecon_model.obj_list[i].expr
                - self.augmecon_model.SlackVar[i] ==
self.augmecon_model.ObjRHS[i])

    # self.augmecon_model.obj_list.deactivate()

def print_augmecon_problem(self):
    print('=====')
    print('    Augmecon R problem    ')
    print('=====')
    print('')
    print('== New Objective function ==')
    print(self.augmecon_model.augmecon_objective.expr)
    print('')
    print('==== New Constraints =====')
    for i in self.range_slacks():
        print(self.augmecon_model.con_list[i-1].expr)
    print('')
    print('')

```

```

def grid_point_key(self):
    separator = ','
    return separator.join(map(str, map(int,
self.current_grid_point)))

    @staticmethod
    def flag_point_key(flags_point):
        separator = ','
        return separator.join(map(str, map(int, flags_point)))

    def is_flagged_for_skipping(self, key):
        return self.flags.__contains__(key) and self.flags[key] > 0

    @staticmethod
    def is_solution_status_ok(solution):
        return solution.solver.status == p.SolverStatus.ok or \
            solution.solver.status == p.SolverStatus.warning

    @staticmethod
    def is_solution_optimal(solution):
        return solution.solver.termination_condition ==
p.TerminationCondition.optimal

    @staticmethod
    def is_solution_infeasible(solution):
        return solution.solver.termination_condition ==
p.TerminationCondition.infeasibleOrUnbounded or \
            solution.solver.termination_condition ==
p.TerminationCondition.infeasible

    def note_solution(self):
        self.all_solutions[str(self.models_solved)] = \
            Solution(
[round(p.value(self.augmecon_model.DecisionVariable[i]), 1) for i in
self.range_decision_vars()],
                [round(self.augmecon_model.obj_list[i](), 1) for i in
self.range_objectives()]
            )
        print("--> found SOLUTION",
            self.models_solved,
            [round(self.augmecon_model.obj_list[i](), 1) for i in
self.range_objectives()],
            "****",
            [round(self.augmecon_model.SlackVar[i](), 1) for i in
self.range_slacks()],
            )

    def flag_dominated_points(self):
        current_flags_point = np.zeros(self.objectives_count+1)
        self.nested_loops_flag_dominated(self.objectives_count,
current_flags_point)

    def nested_loops_flag_dominated(self, obj_idx,
current_flags_point):
        if obj_idx > 2:
            fromm = int(self.current_grid_point[obj_idx])
            to = int(self.current_grid_point[obj_idx] +
self.augmecon_model.SlackVar[obj_idx]())
            for point in range(fromm, to+1):
                current_flags_point[obj_idx] = point

```

```

        self.nested_loops_flag_dominated(obj_idx - 1,
current_flags_point)
    else: # obj_idx == 2:
        current_flags_point[obj_idx] =
self.current_grid_point[obj_idx]
        key = self.flag_point_key(current_flags_point)
        self.flags[key] =
math.floor(self.augmecon_model.SlackVar[obj_idx]() + 1)

    def flag_infeasibility_points(self):
        current_flags_point = np.zeros(self.objectives_count+1)
        self.nested_loops_flag_infeasibility(self.objectives_count,
current_flags_point)

    def nested_loops_flag_infeasibility(self, obj_idx,
current_flags_point):
        if obj_idx > 2:
            fromm = int(self.current_grid_point[obj_idx])
            to = int(self.objective_maximums[obj_idx])
            for point in range(fromm, to + 1):
                current_flags_point[obj_idx] = point
                self.nested_loops_flag_infeasibility(obj_idx - 1,
current_flags_point)
        else: # obj_idx == 2:
            current_flags_point[obj_idx] =
self.current_grid_point[obj_idx]
            key = self.flag_point_key(current_flags_point)
            self.flags[key] = round(self.objective_maximums[obj_idx]
+ 1, 0)

    def loop_through_grid(self, objective_idx):
        max_value = self.objective_maximums[objective_idx]
        cur = self.nadir_values[objective_idx]
        if self.fixed_nadirs:
            cur = self.fixed_nadirs[objective_idx]
        while cur <= max_value:
            self.current_grid_point[objective_idx] = round(cur, 0)
            self.augmecon_model.ObjRHS[objective_idx] = round(cur, 0)
            jump = self.calculate_jump(objective_idx)
            cur += jump

    def calculate_jump(self, objective_idx):
        if objective_idx > 2:
            self.loop_through_grid(objective_idx - 1)
            return 1

        key = self.grid_point_key()

        if self.is_flagged_for_skipping(key):
            return int(self.flags[key])

        sol = self.solve_augmecon_model()

        if not self.is_solution_status_ok(sol):
            print("ERROR solver status \n", sol)
            raise Exception("solver error")

        elif self.is_solution_optimal(sol):
            self.note_solution()
            self.flag_dominated_points()
            if self.augmecon_model.SlackVar[objective_idx]() > 0:

```

```

        return
    math.floor(self.augmecon_model.SlackVar[objective_idx]() + 1)
    else:
        return 1

    elif self.is_solution_infeasible(sol):
        print("infeasibility")
        self.infeasibilities += 1
        self.flag_infeasibility_points()
        return round(self.objective_maximums[objective_idx] + 1,
0)

    else:
        raise Exception("case of unhandled solution")

def run_augmecon_r(self):
    self.reset_solution_counters()
    self.loop_through_grid(self.objectives_count)

def display_pareto(self):
    for x in self.all_solutions.keys():
        unique = True
        for y in self.pareto_front.keys():
            comparison = np.array(self.all_solutions[x].point) ==
np.array(self.pareto_front[y].point)
            unique = not comparison.all()
            if not unique:
                break
        if unique:
            self.pareto_front[x] = self.all_solutions[x]

    print('')
    print('=====')
    print('      pareto front      ')
    print('=====')
    [print('values:', x.objective_values, 'point:', x.point) for
x in self.pareto_front.values()]
    print('')

def get_solution_points(self):
    solution_keys = []
    for solution_idx in self.pareto_front:
        solution_vector = self.pareto_front[solution_idx].point
        key_vector = \
            [decision_variable
             for decision_variable in range(len(solution_vector))]
        if solution_vector[decision_variable] > 0]
        separator = ','
        key = separator.join(map(str, key_vector))
        solution_keys.append(key)
    return solution_keys

def get_solution_values(self):
    sol_vals = []
    for solution_idx in self.pareto_front:
sol_vals.append(self.pareto_front[solution_idx].objective_values)
    return sol_vals

def display_pareto_with_variable_names(self):
    print('')

```

```

print('')
for solution_idx in self.pareto_front:
    solution_vector = self.pareto_front[solution_idx].point
    values_vector =
self.pareto_front[solution_idx].objective_values
    print('')
    print('=====')
    print('solution', solution_idx, values_vector)
    print('=====')
    for decision_variable in range(len(solution_vector)):
        if solution_vector[decision_variable] > 0:
            name =
self.get_decision_variable_name_by_index(decision_variable)
            tech = name.split('-')[0]
            level = name.split('-')[1]
            data = self.original_model.Datasheets
            contribution = []
            obj_cnt = 0
            for sheet in data:
                contribution.append(sheet)
                contribution.append(data[sheet][level][tech])
                if 'objective' in sheet:
contribution.append(round(data[sheet][level][tech] * 100 /
values_vector[obj_cnt], 0))
                    obj_cnt += 1
                    if 'constraint' in sheet:
contribution.append(round(data[sheet][level][tech] * 100 /
data[sheet].index.name, 0))
                        print(name, contribution)
                        print('=====')

    def get_decision_variable_name_by_index(self, dv):
        tech_names = self.model.Techs
        level_names = self.model.Levels
        num_of_levels = len(level_names)
        return \
            tech_names[math.ceil((dv + 1) / num_of_levels)] + \
            '-' + \
            level_names[(dv + 1 - (math.ceil((dv + 1) /
num_of_levels) - 1) * num_of_levels)]

    def save_solutions_to_excel(self):
        indexes = []
        columns = []
        output_data = []

        data = self.original_model.Datasheets

        for solution_idx in self.pareto_front:
            column_i = 0
            # out_solution = []
            solution_vector = self.pareto_front[solution_idx].point
            values_vector =
self.pareto_front[solution_idx].objective_values

            # the index for each solution
            indexes.append(f'solution {solution_idx}')

            # make a column name for each objective

```

```

        for sheet in data:
            if 'objective' in sheet:
                column_i += 1
                if len(columns) < column_i:
                    columns.append(sheet)

        # make a value for each objective
        out_solution = values_vector

        # for each tech-level
        for decision_variable in range(len(solution_vector)):
            # if it is selected
            if solution_vector[decision_variable] > 0:
                name =
self.get_decision_variable_name_by_index(decision_variable)
                tech = name.split('-')[0]
                level = name.split('-')[1]

                # make a column name
                column_i += 1
                if len(columns) < column_i:
                    columns.append('')

                # make a value
                out_solution.append(name)

                obj_cnt = 0
                for sheet in data:
                    # make 2 column names (abs value and
percentage)
                    column_i += 2
                    if len(columns) < column_i:
                        columns.append(f'{sheet}_abs')
                        columns.append(f'{sheet}_%')

                    # make 2 values (abs value and percentage)
                    out_solution.append(data[sheet][level][tech])
                    if 'objective' in sheet:

out_solution.append(round(data[sheet][level][tech] * 100 /
values_vector[obj_cnt], 0))
                        obj_cnt += 1
                        if 'constraint' in sheet:

out_solution.append(round(data[sheet][level][tech] * 100 /
data[sheet].index.name, 0))

                output_data.append(out_solution)

        output_file =
f"{Path().absolute()}\output\out_{self.name}.xlsx"
        writer = pd.ExcelWriter(output_file, engine='xlsxwriter')

        df = pd.DataFrame(output_data,
                            index=indexes,
                            columns=columns)
        df.to_excel(writer, sheet_name='pareto_solutions',
index=True)

        writer.save()

```

Παράρτημα 4

Χειρισμός εισόδων του εργαλείου πολυστοχικής βελτιστοποίησης

```
import pyomo.environ as p
from pyomo.environ import *
import pandas as pd
from pathlib import Path
import numpy as np

def four_kp_model(filename):
    model = ConcreteModel()

    # Define input files
    xlsx = pd.ExcelFile(f"{Path().absolute()}/input/{filename}.xlsx")
    a = pd.read_excel(xlsx, index_col=0, sheet_name='a').to_numpy()
    b = pd.read_excel(xlsx, index_col=0, sheet_name='b').to_numpy()
    c = pd.read_excel(xlsx, index_col=0, sheet_name='c').to_numpy()

    # Define variables
    model.ITEMS = Set(initialize=range(len(a[0])))
    model.DecisionVariable = Var(model.ITEMS, within=p.Binary)

    # -----
    # Define the objective functions
    # -----

    def objective1(model):
        return sum(c[0][i]*model.DecisionVariable[i] for i in
model.ITEMS)

    def objective2(model):
        return sum(c[1][i]*model.DecisionVariable[i] for i in
model.ITEMS)

    def objective3(model):
        return sum(c[2][i]*model.DecisionVariable[i] for i in
model.ITEMS)

    def objective4(model):
        return sum(c[3][i]*model.DecisionVariable[i] for i in
model.ITEMS)

    # -----
    # Define the regular constraints
    # -----

    def constraint1(model):
        return sum(a[0][i]*model.DecisionVariable[i] for i in
model.ITEMS) <= b[0][0]

    def constraint2(model):
        return sum(a[1][i]*model.DecisionVariable[i] for i in
model.ITEMS) <= b[1][0]
```



```

def constraint3(model):
    return sum(a[2][i]*model.DecisionVariable[i] for i in
model.ITEMS) <= b[2][0]

def constraint4(model):
    return sum(a[3][i]*model.DecisionVariable[i] for i in
model.ITEMS) <= b[3][0]

# -----
#   Add components to the model
# -----

# Add the constraints to the model
model.con1 = Constraint(rule=constraint1)
model.con2 = Constraint(rule=constraint2)
model.con3 = Constraint(rule=constraint3)
model.con4 = Constraint(rule=constraint4)

# Add the objective functions to the model using ObjectiveList().
Note
# that the first index is 1 instead of 0!
model.obj_list = ObjectiveList()
model.obj_list.add(expr=objective1(model), sense=maximize)
model.obj_list.add(expr=objective2(model), sense=maximize)
model.obj_list.add(expr=objective3(model), sense=maximize)
model.obj_list.add(expr=objective4(model), sense=maximize)

# By default deactivate all the objective functions
for o in range(len(model.obj_list)):
    model.obj_list[o + 1].deactivate()

return model

def get_non_white_str_list(enumerable):
    return list(x for x in enumerable if not str.startswith(x,
'Unnamed'))

def read_excel_model(xlsx_filename, randomness_percentage=[],
obj_order=None):

    def randomize_value(avg, std_dev_percentage=0):
        is_negative = avg < 0
        if is_negative:
            avg = -avg
        num_reps = 1
        decimal_digits = 0
        std_dev = std_dev_percentage * avg
        random_values = np.random.normal(avg, std_dev,
num_reps).round(decimal_digits)
        output = 0
        if is_negative:
            output = int(-random_values[0])
        else:
            output = int(random_values[0])
        return output

    def form_objective mdl, data):
        objective_expr = 0

```

```

idx = 0
cols = get_non_white_str_list(data.keys())
rows = get_non_white_str_list(data[cols[0]].keys())
if len(randomness_percentage) < len(rows):
    for x in range(len(randomness_percentage), len(rows)):
        randomness_percentage.append(0)

tech_index = 0
for tech in rows:
    for level in cols:
        coefficient = randomize_value(data[level][tech],
randomness_percentage[tech_index] or 0)
        objective_expr += coefficient *
mdl.DecisionVariable[idx]
        idx += 1
        tech_index += 1

    return objective_expr

def form_constraint(mdl, data):
    constraint_left_side = 0
    idx = 0
    cols = get_non_white_str_list(data.keys())
    rows = get_non_white_str_list(data[cols[0]].keys())

    for tech in rows:
        for level in cols:
            coefficient = data[level][tech]
            constraint_left_side += coefficient *
mdl.DecisionVariable[idx]
            idx += 1

    return constraint_left_side <= data.index.name

def form_mutual_exclusiveness_constraint(mdl, cols, rows,
current_row):
    expression = 0
    idx = 0
    for tech in rows:
        for level in cols:
            if tech == current_row:
                expression += mdl.DecisionVariable[idx]
            idx += 1
    return expression <= 1

# -----
#   READ EXCEL FILE
# -----
xlsx =
pd.ExcelFile(f"{Path().absolute()}/input/{xlsx_filename}.xlsx")
sheets = pd.read_excel(xlsx, sheet_name=None, index_col=0)

# -----
#   VALIDATE AND GET DATAFRAME INDEXES
# -----
_sheet_names = xlsx.sheet_names
_row_names =
get_non_white_str_list(sheets[xlsx.sheet_names[0]].index)
_col_names =
get_non_white_str_list(sheets[xlsx.sheet_names[0]].columns)
for sheet_name in sheets:

```

```

    sheet_data = sheets[sheet_name]
    column_names = get_non_white_str_list(sheet_data.columns)
    row_names = get_non_white_str_list(sheet_data.index)
    if not _row_names == row_names:
        raise Exception(f"{sheet_name}" row names differ from
the ones in first sheet')
    if not _col_names == column_names:
        raise Exception(f"{sheet_name}" column names differ from
the ones in first sheet.')
    # print("-----")
    # print(_sheet_names)
    # print(_row_names)
    # print(_col_names)
    # print("-----")

    # -----
    # CREATE MODEL
    # -----
    model = p.ConcreteModel()
    model.Datasheets = sheets
    model.Techs = p.Set(initialize=_row_names)
    model.Levels = p.Set(initialize=_col_names)
    model.ITEMS = p.Set(initialize=range(len(_row_names) *
len(_col_names)))
    model.DecisionVariable = p.Var(model.ITEMS, within=p.Binary)
    model.obj_list = p.ObjectiveList()
    model.constraint_list = p.ConstraintList()
    model.undo_auto_swap_proxy = np.argsort(obj_order)

    # -----
    # ADD OBJECTIVES AND CONSTRAINTS
    # -----
    cons = [sheet_name for sheet_name in sheets if 'constraint' in
sheet_name]
    obj = [sheet_name for sheet_name in sheets if 'objective' in
sheet_name]

    if obj_order: # read objectives in specific order
        # need to rearrange sheet names for objectives
        obj = [obj[i-1] for i in obj_order]

    # need also to rearrange the keys/values in model.Datasheets
    temp = {}
    obj_idx = 0
    for sheet_name in sheets:
        if 'constraint' in sheet_name:
            temp[sheet_name] = sheets[sheet_name]
        if 'objective' in sheet_name:
            temp[obj[obj_idx]] = sheets[sheet_name]
            obj_idx += 1
    model.Datasheets = temp

    for sheet_name in cons:
        model.constraint_list.add(expr=form_constraint(model,
sheets[sheet_name]))
    for sheet_name in obj:
        model.obj_list.add(expr=form_objective(model,
sheets[sheet_name]), sense=p.maximize)

    for row in _row_names:

```

```
model.constraint_list.add(expr=form_mutual_exclusiveness_constraint(m
odel, _col_names, _row_names, row))

model.obj_list.deactivate()

# for x in model.obj_list:
#     print('objective')
#     print(model.obj_list[x].expr)
# for x in model.constraint_list:
#     print('constraint')
#     print(model.constraint_list[x].expr)

return model
```

Παράρτημα 5

Χειρισμός εξόδων του εργαλείου πολυστοχικής βελτιστοποίησης

```
import copy
import random
import matplotlib.pyplot as plt
# import matplotlib.patches as mpatches
# from matplotlib import cm
from pathlib import Path
import reader
import augmecon
from collections import Counter
import pandas as pd
# import viz
# import numpy as np

class Options:
    def __init__(
        self,
        filename,
        save_graph_output,
        save_excel_output,
        mc_iterations,
        mc_std_deviation_percentage,
        name_graph_axes,
        scale_graph_axes,
        graph_title,
        graph_color,
        nadir_undercut,
        plot_all_output_solutions,
        plot_cutoff,
        fixed_nadirs=None
    ):
        self.filename = filename
        self.save_graph_output = save_graph_output
        self.save_excel_output = save_excel_output
        self.mc_iterations = mc_iterations
        self.mc_std_deviation_percentage =
mc_std_deviation_percentage
        self.name_graph_axes = name_graph_axes
        self.scale_graph_axes = scale_graph_axes
        self.graph_title = graph_title
        self.graph_color = graph_color
        self.nadir_undercut = nadir_undercut
        self.plot_all_output_solutions = plot_all_output_solutions
        self.plot_cutoff = plot_cutoff
        self.fixed_nadirs = fixed_nadirs

def flat_map(f, xs):
    ys = []
    for x in xs:
        ys.extend(f(x))
```

```

return ys

def print_counter_vertically(ct):
    keys = list(ct)
    keys.sort(key=lambda y: ct[y], reverse=True)
    for x in keys:
        print(ct[x], x)

def random_color():
    r = random.random()
    b = random.random()
    g = random.random()
    color = (r, g, b)
    return color

def draw_pareto(moip, options: Options, solution_points=[],
iterations=1):
    # viz.draw_multidimensional(moip)
    # return

    r = moip.undo_auto_swap_proxy
    solutions_counter = Counter(solution_points)
    is_monte_carlo = len(solutions_counter) > 0 and iterations > 1
    moip_solution_points = moip.get_solution_points()
    moip_solution_values = moip.get_solution_values()
    num_solutions = len(moip_solution_values)
    objectives_count = len(moip_solution_values[0])
    objective_values = [[moip_solution_values[i][x] for i in
range(num_solutions)] for x in range(objectives_count)]
    data = [sheet for sheet in moip.original_model.Datasheets if
'objective' in sheet]

    if is_monte_carlo:
        temp_moip_solution_points = []
        objective_values = []
        sol_idx = 0
        for x in moip_solution_points:
            if solutions_counter[x] / options.mc_iterations >
options.plot_cutoff:
                temp_moip_solution_points.append(x)

        objective_values.append(moip_solution_values[sol_idx])
        sol_idx += 1
        moip_solution_points = temp_moip_solution_points
        objective_values = [[objective_values[o][k] for o in
range(len(objective_values))] for k in range(objectives_count)]

    distinct_sols = set(solution_points)
    distinct_sols = [x for x in distinct_sols if
solutions_counter[x]/options.mc_iterations > options.plot_cutoff]

    opacity = .75
    if is_monte_carlo:
        if options.plot_all_output_solutions:
            opacity = [.75 if moip_solution_points.__contains__(sol)
else .15 for sol in distinct_sols]

    marker_size = None

```

```

    if is_monte_carlo:
        if options.plot_all_output_solutions:
            marker_size = [1000 ** (solutions_counter[point] /
iterations) for point in distinct_sols]
            objective_values = []
            for sheet in data:
                obj_vals_for_cur_objective = []
                for sol_point in distinct_sols:
                    solution_vector = sol_point.split(',')
                    current_obj_value = 0
                    for decision_variable in solution_vector:
                        name =
moip.get_decision_variable_name_by_index(int(decision_variable))
                        tech = name.split('-')[0]
                        level = name.split('-')[1]
                        current_obj_value +=
moip.original_model.Datasheets[sheet][level][tech]

                    obj_vals_for_cur_objective.append(current_obj_value)
                    objective_values.append(obj_vals_for_cur_objective)
                else:
                    marker_size =
[1000** (solutions_counter[point]/iterations) for point in
moip_solution_points]

            fig = plt.figure(figsize=(12, 9))
            fig.suptitle(options.graph_title or moip.name, fontweight='bold',
fontsize=14)

            if len(options.scale_graph_axes) < objectives_count:
                for x in range(len(options.scale_graph_axes),
objectives_count):
                    options.scale_graph_axes.append(1)

            if len(options.name_graph_axes) < objectives_count:
                for x in range(len(options.name_graph_axes),
objectives_count):
                    options.name_graph_axes.append('')

            if objectives_count < 2:
                raise Exception('Graph error: Less than 2 objectives in the
model!')
            elif objectives_count == 2:
                ax = fig.add_subplot(6, 5, (1, 20)) if is_monte_carlo else
fig.add_subplot()
                # ax.scatter(*objective_values, marker='o', s=marker_size)
                ax.scatter(
                    [x * options.scale_graph_axes[r[0]] for x in
objective_values[r[0]]],
                    [y * options.scale_graph_axes[r[1]] for y in
objective_values[r[1]]],
                    marker='o', s=marker_size, alpha=opacity,
                    c=options.graph_color or None)
                ax.set_xlabel(options.name_graph_axes[r[0]] or data[r[0]])
                ax.set_ylabel(options.name_graph_axes[r[1]] or data[r[1]])
                ax.margins(.1, .1)
                if is_monte_carlo:
                    ms = fig.add_subplot(6, 5, (26, 27))
                    points = distinct_sols if
options.plot_all_output_solutions else moip_solution_points
                    ms.scatter([(solutions_counter[point]/iterations) for

```

```

point in points],
                                [0 for point in points], marker='o',
                                s=marker_size, c=options.graph_color or None)
ms.set_xlabel('Occurrence (as % of iterations)')
ms.margins(.1, .05)
else:
    if objectives_count > 3:
        print('WARNING : maximum 3 objectives can be depicted! If
more they\'ll be ignored in this graph')
        ax = fig.add_subplot() if len(solutions_counter) == 0 else
fig.add_subplot(6, 5, (1, 20))
        graph = ax.scatter(
            # [x * options.scale_graph_axes[0] for x in
objective_values[0]],
            # [y * options.scale_graph_axes[1] for y in
objective_values[1]],
            # c=[z * options.scale_graph_axes[2] for z in
objective_values[2]],
            [x * options.scale_graph_axes[r[0]] for x in
objective_values[r[0]]],
            [y * options.scale_graph_axes[r[1]] for y in
objective_values[r[1]]],
            c=[z * options.scale_graph_axes[r[2]] for z in
objective_values[r[2]]],
            marker='o', cmap='gnuplot', s=marker_size, alpha=opacity)
        color_bar = plt.colorbar(graph)
        ax.set_xlabel(options.name_graph_axes[r[0]] or data[r[0]])
        ax.set_ylabel(options.name_graph_axes[r[1]] or data[r[1]])
        color_bar.set_label(options.name_graph_axes[r[2]] or
data[r[2]])
        ax.margins(.1, .1)
        if is_monte_carlo:
            ms = fig.add_subplot(6, 5, (26, 27))
            points = distinct_sols if
options.plot_all_output_solutions else moip_solution_points
            ms.scatter([(solutions_counter[point]/iterations) for
point in points],
                                [0 for point in points], marker='o',
                                s=marker_size, c=options.graph_color or None)
            ms.set_xlabel('Occurrence (as % of iterations)')
            ms.margins(.1, .05)
        if options.save_graph_output:
            jpg =
f"{Path().absolute()}\output\pareto_graph_{moip.name}.jpg"
            fig.savefig(jpg, format='jpg', dpi=800)

        # plt.show()

def run_model_from_excel(options: Options):
    problem = reader.read_excel_model(options.filename)
    moip = augmecon.MoipAugmeconR(problem,
                                model_name=options.filename,
min_to_nadir_undercut=options.nadir_undercut,
                                fixed_nadirs=options.fixed_nadirs)
    r = moip.get_obj_ordered_by_ranges_desc()
    options = reorder_options(options, r)
    problem = reader.read_excel_model(options.filename, obj_order=r)
    moip = augmecon.MoipAugmeconR(problem,
                                model_name=options.filename,

```



```

min_to_nadir_undercut=options.nadir_undercut,
                                fixed_nadirs=options.fixed_nadirs)

    moip.execute()
    moip.display_pareto_with_variable_names()
    draw_pareto(moip, options=options)
    print('total time of running the augmecon r algorithm',
moip.after_aug_r - moip.before_aug_r)

    if options.save_excel_output:
        moip.save_solutions_to_excel()

def reorder_options(options: Options, r):
    if options.fixed_nadirs:
        options.fixed_nadirs = options.fixed_nadirs[2:]
    opts = copy.deepcopy(options)
    for j in range(len(r)):
        if opts.fixed_nadirs:
            opts.fixed_nadirs.append(None)
            opts.scale_graph_axes.append(1)
            opts.name_graph_axes.append('')
        if opts.fixed_nadirs:
            opts.fixed_nadirs = [(opts.fixed_nadirs[i - 1] or None) for i
in r]
            opts.scale_graph_axes = [(opts.scale_graph_axes[i - 1] or 1) for
i in r]
            opts.name_graph_axes = [(opts.name_graph_axes[i - 1] or '') for i
in r]
        if opts.fixed_nadirs:
            opts.fixed_nadirs.insert(0, None)
            opts.fixed_nadirs.insert(0, None)
    return opts

def run_iterations(options: Options):
    if options.mc_iterations < 2:
        run_model_from_excel(options)
    return

    solution_points = []
    solution_values = []
    moip = {}

    problem_initial = reader.read_excel_model(options.filename)
    moip_initial = augmecon.MoipAugmeconR(problem_initial,

model_name=options.filename,

min_to_nadir_undercut=options.nadir_undercut,

fixed_nadirs=options.fixed_nadirs)
    r = moip_initial.get_obj_ordered_by_ranges_desc()
    reordered_options = reorder_options(options, r)
    problem_initial =
reader.read_excel_model(reordered_options.filename, obj_order=r)
    moip_initial = augmecon.MoipAugmeconR(problem_initial,

model_name=reordered_options.filename,

min_to_nadir_undercut=reordered_options.nadir_undercut,

```

```

fixed_nadirs=reordered_options.fixed_nadirs)
moip_initial.execute()
initial_moip_solution_points = moip_initial.get_solution_points()
initial_moip_solution_values = moip_initial.get_solution_values()

for iteration in range(options.mc_iterations):
    problem = reader.read_excel_model(reordered_options.filename,
reordered_options.mc_std_deviation_percentage, obj_order=r)
    moip = augmecon.MoipAugmeconR(problem,

model_name=reordered_options.filename,

min_to_nadir_undercut=reordered_options.nadir_undercut,

fixed_nadirs=reordered_options.fixed_nadirs)
moip.execute()
solution_points += moip.get_solution_points()
solution_values += moip.get_solution_values()

total_portfolios = len(solution_points)
total_unique_portfolios = len(set(solution_points))

print('')
print('')
print('')
print('=====')
print('          R E S U L T S          ')
print('=====')
print('iterations:', options.mc_iterations)
print('')
print('total number of solutions:', total_portfolios)
print('total number of UNIQUE solutions:',
total_unique_portfolios)
print('')
print('-----')
print('portfolios and times of occurrence:')
print('-----')
sols_in_text = map(
    lambda p: ';'.join(map(lambda t:
moip.get_decision_variable_name_by_index(int(t)), p.split(','))),
    solution_points
)
counter_of_sols = Counter(sols_in_text)
print_counter_vertically(counter_of_sols)
print('-----')

techs = flat_map(lambda z: z.split(','), solution_points)
total_techs = len(techs)
total_unique_techs = len(set(techs))
print('')
print('total num of techs:', total_techs)
print('total num of UNIQUE techs:', total_unique_techs)
print('')
print('-----')
print('techs and times of occurrence:')
print('-----')
techs_in_text = map(lambda index:
moip.get_decision_variable_name_by_index(index), map(int, techs))
counter_of_techs = Counter(techs_in_text)

```

```

print_counter_vertically(counter_of_techs)
print('-----')

# -----
# Save to excel file
# -----
if options.save_excel_output:
    output_file =
f"{Path().absolute()}\output\out_MC_{moip.name}.xlsx"
    writer = pd.ExcelWriter(output_file, engine='xlsxwriter')

    # write sheet one with portfolios
    save_mc_solutions_to_excel(writer, moip_initial,
initial_moip_solution_points,
                                solution_points, solution_values)

    # write sheet two with techs
    columns = ['Times of Occurrence', 'Tech']
    sheet_rows = []
    keys = list(counter_of_techs)
    keys.sort(key=lambda y: counter_of_techs[y], reverse=True)
    for x in keys:
        sheet_rows.append([counter_of_techs[x], x])

    df2 = pd.DataFrame(sheet_rows, columns=columns)
    df2.to_excel(writer, sheet_name='techs', index=False)

    writer.save()

# -----
# Draw pareto front with sensitivity
# -----
draw_pareto(moip_initial,
            options=reordered_options,
            solution_points=solution_points,
            iterations=reordered_options.mc_iterations)

def save_mc_solutions_to_excel(writer, moip_initial,
initial_moip_solution_points,
                                solution_points, solution_values):
    # zip solution points and objective values, for easier access
    sol_idx = 0
    idx_point_values_arr = []
    for sol_point in solution_points:
        idx_point_values_arr.append([sol_idx, sol_point,
solution_values[sol_idx]])
        sol_idx += 1

    column_headers = []
    rows = []

    data = moip_initial.original_model.Datasheets

    distinct_sols = set(solution_points)
    counter_of_sols = Counter(solution_points)

    for sol_point in distinct_sols:
        column_i = 0
        row = []
        solution_vector = sol_point.split(',')

```

```

# -----
# uncomment section below to add 'objective value averages'
columns (avg calculated among occurrences of a sol)
# -----
# # calculate average objective values, among occurrences of
solution
# related_ipv = filter(lambda y: (sol_point == y[1]),
idx_point_values_arr)
# related_obj_vals = list(map(lambda y: y[2], related_ipv))
# avg_obj_vals = np.average(related_obj_vals, axis=0)
# # sheet headers for average objective values
# for sheet in data:
#     if 'objective' in sheet:
#         column_i += 1
#         if len(column_headers) < column_i:
#             column_headers.append(sheet + ' (avg)')
# # sheet data for average objective values
# row += [i for i in avg_obj_vals]
# -----

obj_vals = []
for sheet in data:
    if 'objective' in sheet:
        # sheet headers for initial problem's objective
values
        column_i += 1
        if len(column_headers) < column_i:
            column_headers.append(sheet)
        # sheet data for initial problem's objective values
        current_obj_value = 0
        for decision_variable in solution_vector:
            name =
moip_initial.get_decision_variable_name_by_index(int(decision_variabl
e))
            tech = name.split('-')[0]
            level = name.split('-')[1]
            current_obj_value += data[sheet][level][tech]
            obj_vals.append(current_obj_value)
        row += [i for i in obj_vals]

active_vars = ''
# for each tech-level
for decision_variable in solution_vector:
    name =
moip_initial.get_decision_variable_name_by_index(int(decision_variabl
e))
    tech = name.split('-')[0]
    level = name.split('-')[1]
    active_vars += name + ', '

# make a column name
column_i += 1
if len(column_headers) < column_i:
    column_headers.append('')

# make a value
row.append(name)

obj_cnt = 0
for sheet in data:

```

```

        # make 2 column names (abs value and percentage)
        column_i += 2
        if len(column_headers) < column_i:
            column_headers.append(f'{sheet}_abs')
            column_headers.append(f'{sheet}_%')

        # make 2 values (abs value and percentage)
        row.append(data[sheet][level][tech])
        if 'objective' in sheet:
            row.append(round(data[sheet][level][tech] * 100 /
obj_vals[obj_cnt], 0))
            obj_cnt += 1
        if 'constraint' in sheet:
            row.append(round(data[sheet][level][tech] * 100 /
data[sheet].index.name, 0))

        # make a value for in initial problem
        row.insert(0, 1 if sol_point in initial_moip_solution_points
else 0)
        # make a value for active variables
        row.insert(0, active_vars[:-2]) # trimming last 2 chars
cause they are , and space
        # make a value for times of occurrence
        row.insert(0, int(counter_of_sols[sol_point]))

        rows.append(row)
        rows.sort(key=lambda y: y[0], reverse=True)

        # make a column name for in initial problem
        column_headers.insert(0, 'In Initial Problem')
        # make a column name for active variables
        column_headers.insert(0, 'active variables')
        # make a column name for times of occurrence
        column_headers.insert(0, 'Times of Occurrence')

        df = pd.DataFrame(rows, columns=column_headers)
        df.to_excel(writer, sheet_name='portfolios', index=False)

```

Παράρτημα 6

Συμπληρωματικά δεδομένα εισόδου Κεφαλαίου 8

Πίνακας 0-1: Δείκτες απασχόλησης ανά περιοχή, τεχνολογία και κλάδο δραστηριότητας

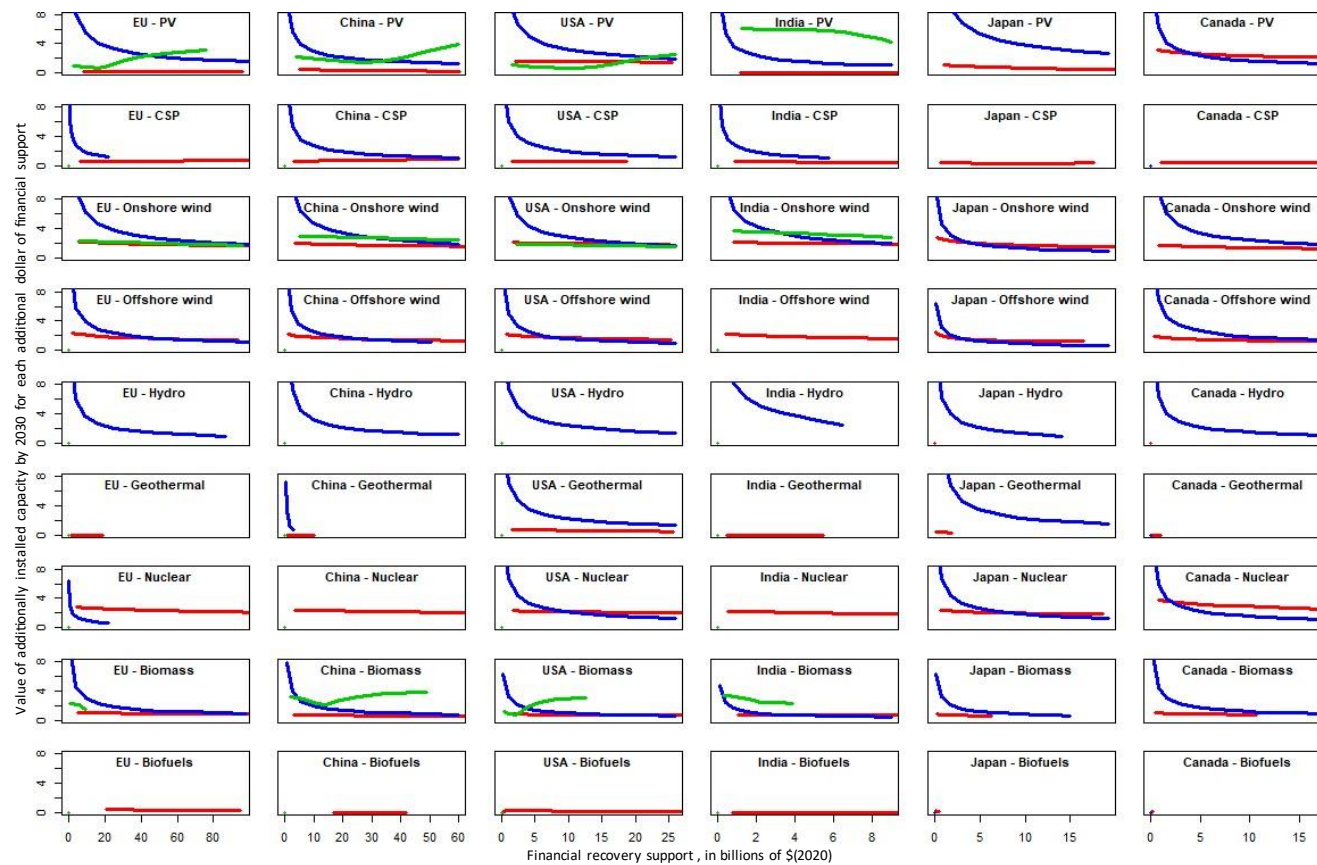
| Περιοχή | Τεχνολογία | Τομέας Απασχόλησης | Βιομηχανία | | Κατασκευή & Εγκατάσταση | | Λειτουργία & Συντήρηση | | Εξόρυξη καυσίμου | Διύλιση |
|---------|----------------------------------|-----------------------|-------------------------|-----------|----------------------------|-----------|---------------------------|-----------|-------------------------|---------------|
| | | Χρονολογία | 2020-2025 | 2025-2030 | 2020-2025 | 2025-2030 | 2020-2025 | 2025-2030 | 2020-2030 | 2020- 2030 |
| | | Μονάδες Μέτρησης | Χιλιάδες εργατοέτη / GW | | | | | | Χιλιάδες εργατοέτη / PJ | |
| ΕΕ | Θαλάσσια αιολικά πάρκα | | 4,2500140 | 4,1565930 | 2,8936265 | 2,8300207 | 0,2781155 | 0,2671732 | | |
| ΕΕ | Υπεράκτια αιολικά πάρκα | | 12,820836 | 12,313308 | 6,5747877 | 6,3145170 | 0,1826438 | 0,1739657 | | |
| ΕΕ | Μεγάλης κλίμακας PV | | 0,8787072 | 0,7783931 | 7,3251944 | 6,4889433 | 0,3667051 | 0,3318888 | | |
| ΕΕ | PV στέγης | | 0,8133470 | 0,6620301 | 13,560661 | 11,037805 | 0,7404623 | 0,6637776 | | |
| ΕΕ | Βιομάζα | | 2,6905074 | 2,6514282 | 12,988656 | 12,799998 | 1,5 | 1,5 | 29,90 | |
| ΕΕ | Υδροηλεκτρι κή ενέργεια | | 3,3956744 | 3,3603395 | 7,1794260 | 7,1047179 | 0,1878509 | 0,1815080 | | |
| ΕΕ | Γεωθερμία | | 3,687214 | 3,5953147 | 6,4289897 | 6,2687540 | 0,3745825 | 0,3666666 | | |
| ΕΕ | Ηλιοθερμική ενέργεια (CSP) | | 3,6273185 | 3,4847601 | 7,2546370 | 6,9695203 | 0,4047619 | 0,3571428 | | |
| ΕΕ | Άνθρακας | | 5,4 | 5,4 | 11,2 | 11,2 | 0,14 | 0,14 | 12,7863532 | |

| | | | | | | | | | |
|-------------|----------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-------------|----------|
| ΕΕ | Πυρηνικά | 1,3 | 1,3 | 11,8 | 11,8 | 0,6 | 0,6 | 0 | |
| ΕΕ | Αέριο | 0,93 | 0,93 | 1,3 | 1,3 | 0,14 | 0,14 | 1,832654408 | |
| ΕΕ | Πετρέλαιο | 0,93 | 0,93 | 1,3 | 1,3 | 0,14 | 0,14 | 1,849925061 | 1,543530 |
| ΕΕ | Βιοκαύσιμα | | | | | | | | 7,316187 |
| Κίνα | Θαλάσσια αιολικά πάρκα | 3,5896201 | 3,5107154 | 2,8936265 | 2,8300207 | 0,2781155 | 0,2671732 | | |
| Κίνα | Υπεράκτια αιολικά πάρκα | 10,828654 | 10,399989 | 6,5747877 | 6,3145170 | 0,1826438 | 0,1739657 | | |
| Κίνα | Μεγάλης κλίμακας PV | 3,7752925 | 3,3443015 | 7,3251944 | 6,4889433 | 0,3667051 | 0,3318888 | | |
| Κίνα | PV στέγης | 3,4944781 | 2,8443575 | 13,560661 | 11,037805 | 0,7404623 | 0,6637776 | | |
| Κίνα | Βιομάζα | 2,6905074 | 2,6514282 | 12,988656 | 12,799998 | 1,5 | 1,5 | 29,90 | |
| Κίνα | Υδροηλεκτρι κή ενέργεια | 3,3956744 | 3,3603395 | 7,1794260 | 7,1047179 | 0,1878509 | 0,1815080 | | |
| Κίνα | Γεωθερμία | 3,6872146 | 3,5953147 | 6,4289897 | 6,2687540 | 0,3745825 | 0,3666666 | | |
| Κίνα | Ηλιοθερμική ενέργεια (CSP) | 3,6273185 | 3,4847601 | 7,2546370 | 6,9695203 | 0,4047619 | 0,3571428 | | |
| Κίνα | Άνθρακας | 5,4 | 5,4 | 11,2 | 11,2 | 0,14 | 0,14 | 69,41602214 | |
| Κίνα | Πυρηνικά | 1,3 | 1,3 | 11,8 | 11,8 | 0,6 | 0,6 | 11,5298991 | |
| Κίνα | Αέριο | 0,93 | 0,93 | 1,3 | 1,3 | 0,14 | 0,14 | 11,30935756 | |
| Κίνα | Πετρέλαιο | 0,93 | 0,93 | 1,3 | 1,3 | 0,14 | 0,14 | 6,561761237 | 2,699147 |
| Κίνα | Βιοκαύσιμα | | | | | | | | 6,073734 |
| ΗΠΑ | Θαλάσσια αιολικά πάρκα | 3,8598497 | 3,7750050 | 2,8936265 | 2,8300207 | 0,2781155 | 0,2671732 | | |
| ΗΠΑ | Υπεράκτια αιολικά πάρκα | 11,643844 | 11,182908 | 6,5747877 | 6,3145170 | 0,1826438 | 0,1739657 | | |

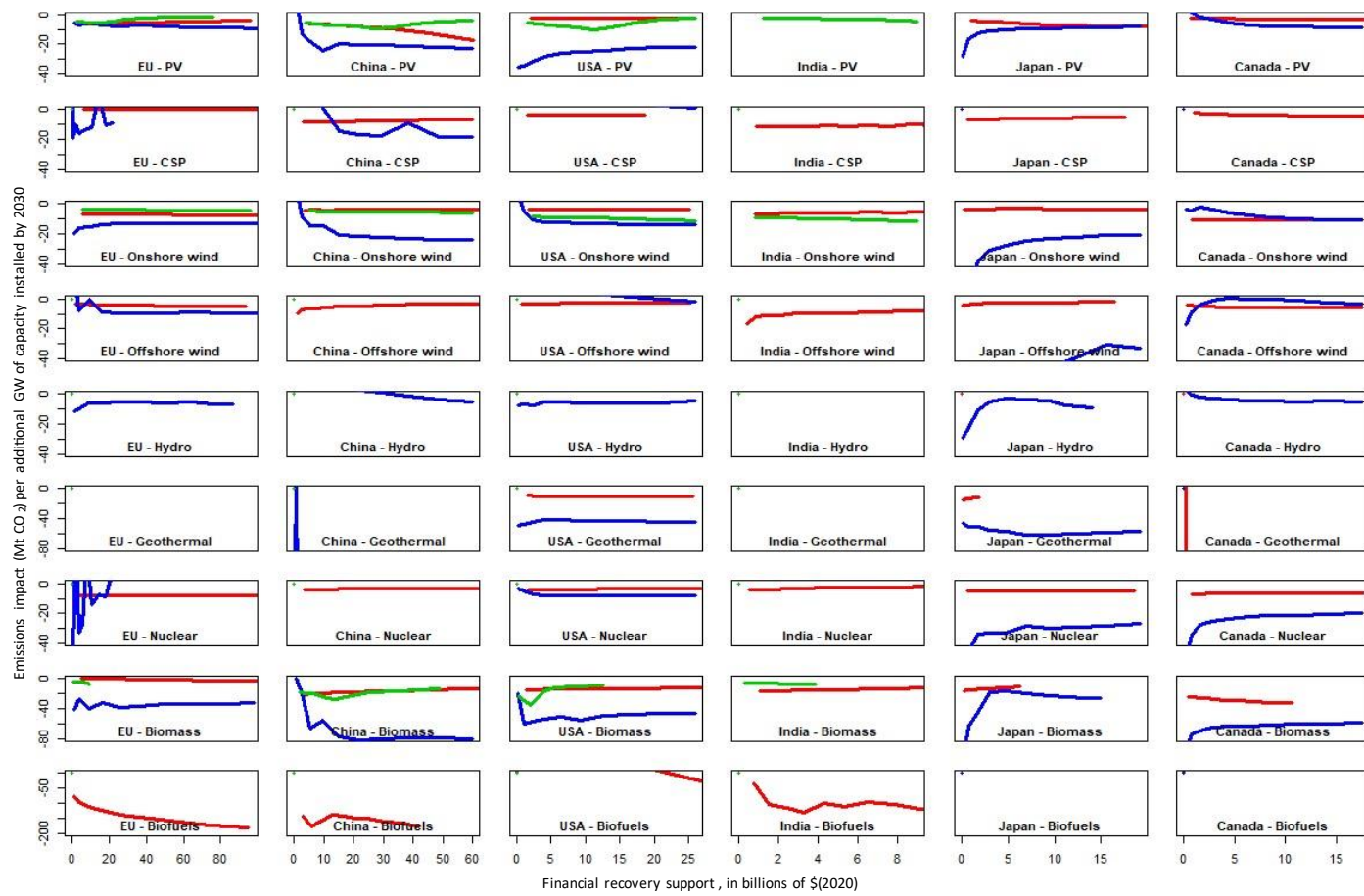
| | | | | | | | | |
|--------------|----------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------------|----------------|-------------|
| ΗΠΑ | Μεγάλης κλίμακας PV | 0,8993569 | 0,796685 | 7,3251944 | 6,4889433 | 0,3667051 | 0,3318888 | |
| ΗΠΑ | PV στέγης | 0,8324608 | 0,6775879 | 13,560661 | 11,037805 | 0,7404623 84 | 0,6637776 3 | |
| ΗΠΑ | Βιομάζα | 2,6905074 | 2,6514282 | 12,988656 | 12,799998 | 1 | 1,5 | 29,90 |
| ΗΠΑ | Υδροηλεκτρική ενέργεια | 3,3956744 | 3,3603395 | 7,1794260 | 7,1047179 | 0,1878509 | 0,1815080 | |
| ΗΠΑ | Γεωθερμία | 3,6872146 | 3,5953147 | 6,4289897 | 6,2687540 | 0,3745825 | 0,3666666 | |
| ΗΠΑ | Ηλιοθερμική ενέργεια (CSP) | 3,6273185 | 3,4847601 | 7,2546370 | 6,9695203 | 0,4047619 | 0,3571428 | |
| ΗΠΑ | Άνθρακας | 5,4 | 5,4 | 11,2 | 11,2 | 0,14 | 0,14 | 3,230715764 |
| ΗΠΑ | Πυρηνικά | 1,3 | 1,3 | 11,8 | 11,8 | 0,6 | 0,6 | 0,017411517 |
| ΗΠΑ | Αέριο | 0,93 | 0,93 | 1,3 | 1,3 | 0,14 | 0,14 | 4,306220096 |
| ΗΠΑ | Πετρέλαιο | 0,93 | 0,93 | 1,3 | 1,3 | 0,14 | 0,14 | 9,693555796 |
| ΗΠΑ | Βιοκαύσιμα | | | | | | | 1,803184 |
| ΗΠΑ | | | | | | | | 5,583906 |
| Ινδία | Θαλάσσια αιολικά πάρκα | 0,7713473 | 0,7543921 | 2,8936265 | 2,8300207 | 0,2781155 | 0,2671732 | |
| Ινδία | Υπεράκτια αιολικά πάρκα | 2,3268907 | 2,2347780 | 6,5747877 | 6,3145170 | 0,1826438 | 0,1739657 | |
| Ινδία | Μεγάλης κλίμακας PV | 0,3032447 | 0,2686260 | 7,3251944 | 6,4889433 | 0,3667051 | 0,3318888 | |
| Ινδία | PV στέγης | 0,2806887 | 0,2284688 | 13,560661 | 11,037805 | 0,7404623 | 0,6637776 | |
| Ινδία | Βιομάζα | 2,6905074 | 2,6514282 | 12,988656 | 12,799998 | 1,5 | 1,5 | 29,90 |
| Ινδία | Υδροηλεκτρική ενέργεια | 3,3956744 | 3,3603395 | 7,1794260 | 7,1047179 | 0,1878509 | 0,1815080 | |
| Ινδία | Γεωθερμία | 3,6872146 | 3,5953148 | 6,4289897 | 6,2687540 | 0,3745825 | 0,3666666 | |
| Ινδία | Ηλιοθερμική ενέργεια (CSP) | 3,6273185 | 3,4847601 | 7,2546370 | 6,9695203 | 0,4047619 | 0,3571428 | |

| | | | | | | | | | |
|----------------|----------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-------------|----------|
| Ινδία | Άνθρακας | 5,4 | 5,4 | 11,2 | 11,2 | 0,14 | 0,14 | 24,58856207 | |
| Ινδία | Πυρηνικά | 1,3 | 1,3 | 11,8 | 11,8 | 0,6 | 0,6 | 4,850306349 | |
| Ινδία | Αέριο | 0,93 | 0,93 | 1,3 | 1,3 | 0,14 | 0,14 | 5,523110732 | |
| Ινδία | Πετρέλαιο | 0,93 | 0,93 | 1,3 | 1,3 | 0,14 | 0,14 | 1,577616693 | 3,892770 |
| Ινδία | Βιοκαύσιμα | | | | | | | | 7,643710 |
| Ιαπωνία | Θαλάσσια αιολικά πάρκα | 0,4424827 | 0,4327564 | 2,8936265 | 2,8300207 | 0,2781155 | 0,2671732 | | |
| Ιαπωνία | Υπεράκτια αιολικά πάρκα | 1,3348189 | 1,2819785 | 6,5747877 | 6,3145170 | 0,1826438 | 0,1739657 | | |
| Ιαπωνία | Μεγάλης κλίμακας PV | 0,5464312 | 0,4840501 | 7,3251944 | 6,4889433 | 0,3667051 | 0,3318888 | | |
| Ιαπωνία | PV στέγης | 0,5057865 | 0,4116888 | 13,560661 | 11,037805 | 0,7404623 | 0,6637776 | | |
| Ιαπωνία | Βιομάζα | 2,6905074 | 2,6514282 | 12,988656 | 12,799998 | 1,5 | 1,5 | 29,90 | |
| Ιαπωνία | Υδροηλεκτρι κή ενέργεια | 3,3956744 | 3,3603395 | 7,1794260 | 7,1047179 | 0,1878509 | 0,1815080 | | |
| Ιαπωνία | Γεωθερμία | 3,6872146 | 3,5953147 | 6,4289897 | 6,2687540 | 0,3745825 | 0,3666666 | | |
| Ιαπωνία | Ηλιοθερμική ενέργεια (CSP) | 3,6273185 | 3,4847601 | 7,2546370 | 6,9695203 | 0,4047619 | 0,3571428 | | |
| Ιαπωνία | Άνθρακας | 5,4 | 5,4 | 11,2 | 11,2 | 0,14 | 0,14 | 0,119100761 | |
| Ιαπωνία | Πυρηνικά | 1,3 | 1,3 | 11,8 | 11,8 | 0,6 | 0,6 | 0 | |
| Ιαπωνία | Αέριο | 0,93 | 0,93 | 1,3 | 1,3 | 0,14 | 0,14 | 0,205475493 | |
| Ιαπωνία | Πετρέλαιο | 0,93 | 0,93 | 1,3 | 1,3 | 0,14 | 0,14 | 0,021443359 | 2,141595 |
| Ιαπωνία | Βιοκαύσιμα | | | | | | | | 4,606128 |
| Καναδάς | Θαλάσσια αιολικά πάρκα | 1,4301297 | 1,3986935 | 2,8936265 | 2,8300207 | 0,2781155 | 0,2671732 | | |

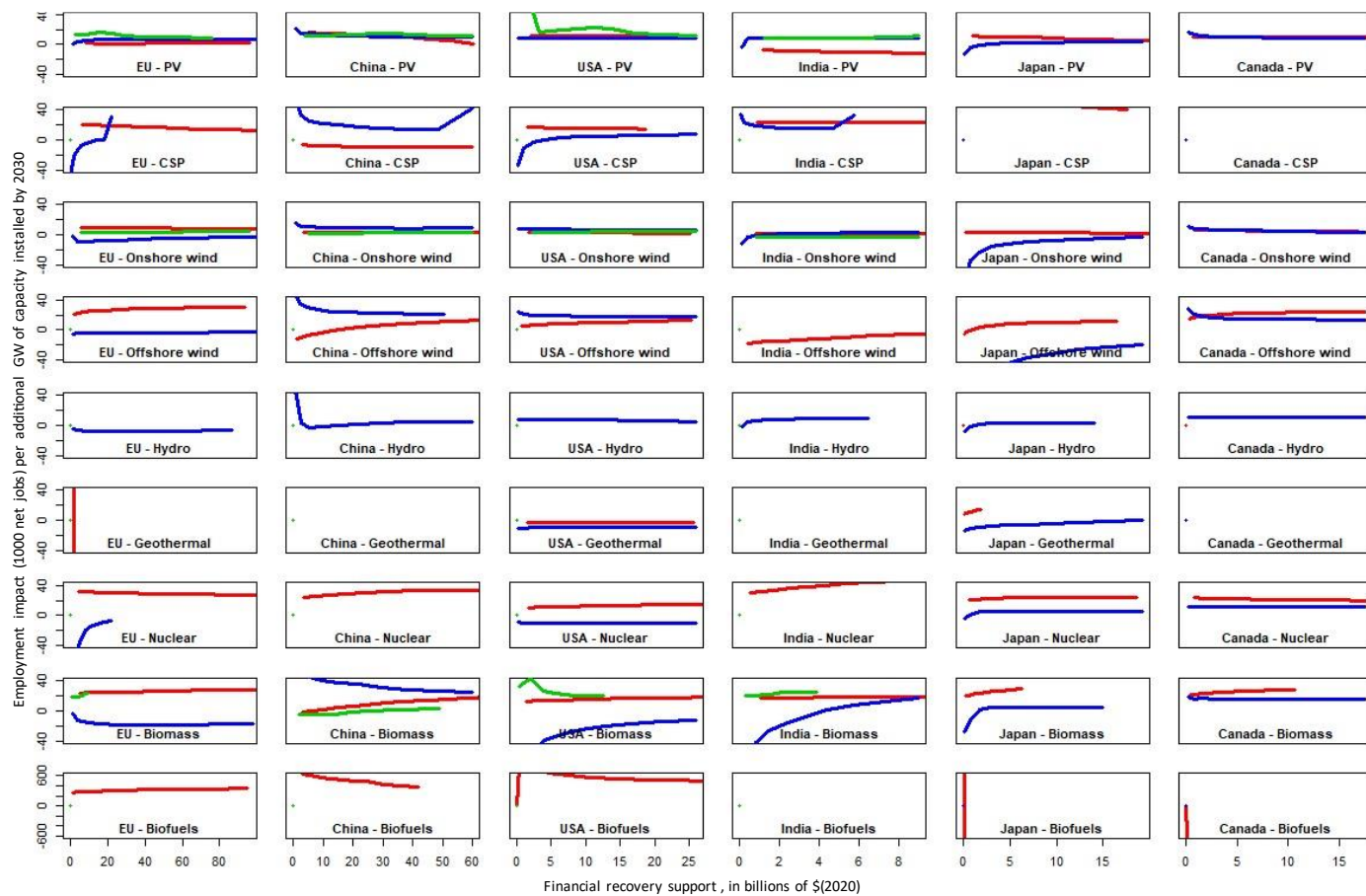
| | | | | | | | | |
|----------------|----------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-------------|
| Καναδάς | Υπεράκτια αιολικά πάρκα | 4,3142113 | 4,1434282 | 6,5747877 | 6,3145170 | 0,1826438 | 0,1739657 | |
| Καναδάς | Μεγάλης κλίμακας PV | 0 | 0 | 7,3251944 | 6,4889433 | 0,3667051 | 0,3318888 | |
| Καναδάς | PV στέγης | 0 | 0 | 13,560661 | 11,037805 | 0,7404623 | 0,6637776 | |
| Καναδάς | Βιομάζα | 2,6905074 | 2,6514282 | 12,988656 | 12,799998 | 1,5 | 1,5 | 29,90 |
| Καναδάς | Υδροηλεκτρι κή ενέργεια | 3,3956744 | 3,3603395 | 7,1794260 | 7,1047179 | 0,1878509 | 0,1815080 | |
| Καναδάς | Γεωθερμία | 3,6872146 | 3,5953147 | 6,4289897 | 6,2687540 | 0,3745825 | 0,3666666 | |
| Καναδάς | Ηλιοθερμική ενέργεια (CSP) | 3,6273185 | 3,4847601 | 7,2546370 | 6,9695203 | 0,4047619 | 0,3571428 | |
| Καναδάς | Άνθρακας | 5,4 | 5,4 | 11,2 | 11,2 | 0,14 | 0,14 | 23,78187085 |
| Καναδάς | Πυρηνικά | 1,3 | 1,3 | 11,8 | 11,8 | 0,6 | 0,6 | 1,61 |
| Καναδάς | Αέριο | 0,93 | 0,93 | 1,3 | 1,3 | 0,14 | 0,14 | 8,07400319 |
| Καναδάς | Πετρέλαιο | 0,93 | 0,93 | 1,3 | 1,3 | 0,14 | 0,14 | 5,741626794 |
| Καναδάς | Βιοκαύσιμα | | | | | | | 4,364798 |
| | | | | | | | | 6,078469 |



Σχήμα 0-1: Προσθήκη εγκατεστημένης δυναμικότητας παραγωγής ανά μονάδα χρηματοδότησης, για όλες τις χώρες, τεχνολογίες και MOA



Σχήμα 0-2: Επιρροή στις εκπομπές κάθε πρόσθετης μονάδας εγκατεστημένης δυναμικότητας παραγωγής (GW) έως το 2030, για όλες τις χώρες, τεχνολογίες και ΜΟΑ



Σχήμα 0-3: Επιρροή στην απασχόληση κάθε πρόσθετης μονάδας εγκατεστημένης δυναμικότητας παραγωγής (GW) έως το 2030, για όλες τις χώρες, τεχνολογίες και MOA