ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ Μ/Υ
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΙΡΑΙΩΣ
ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΤΙΛΙΑΣ ΚΑΙ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑΣ
ΤΜΗΜΑΤΟΣ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ & ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ
ΔΙΑΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
«ΤΕΧΝΟ-ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ»

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΒΕΛΤΙΣΤΗ ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΕΠΙΔΟΤΗΣΕΩΝ ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΩΝ ΠΗΓΩΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΑΠΟ ΤΟ ΠΑΚΕΤΟ ΑΝΑΚΑΜΨΗΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΝΤΙΜΕΤΩΠΙΣΗ ΤΩΝ ΣΥΝΕΠΕΙΩΝ ΤΟΥ COVID19

ΦΟΡΟΥΛΗΣ ΑΝΑΣΤΑΣΙΟΣ ΕΥΑΓΓΕΛΟΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ:
Χ. ΔΟΥΚΑΣ, ΑΝΑΠΛΗΡΩΤΗΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ ΕΜΠ

ΦΕΒΡΟΥΑΡΙΟΣ 2021

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ Μ/Υ
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΙΡΑΙΩΣ
ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΤΙΛΙΑΣ ΚΑΙ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑΣ
ΤΜΗΜΑΤΟΣ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ & ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ
ΔΙΑΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
«ΤΕΧΝΟ-ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ»

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΒΕΛΤΙΣΤΗ ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΕΠΙΔΟΤΗΣΕΩΝ ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΩΝ ΠΗΓΩΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΑΠΟ ΤΟ ΠΑΚΕΤΟ ΑΝΑΚΑΜΨΗΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΝΤΙΜΕΤΩΠΙΣΗ ΤΩΝ ΣΥΝΕΠΕΙΩΝ ΤΟΥ COVID19

ΦΟΡΟΥΛΗΣ ΑΝΑΣΤΑΣΙΟΣ ΕΥΑΓΓΕΛΟΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: Χ. ΔΟΥΚΑΣ, ΑΝΑΠΛΗΡΩΤΗΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ ΕΜΠ

ΦΕΒΡΟΥΑΡΙΟΣ 2021

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την

.....	.....	.....
Χ. Δούκας	Ι. Ψαρράς	Δ. Ασκούνης
Αναπλ. Καθηγητής ΕΜΠ	Καθηγητής ΕΜΠ	Καθηγητής ΕΜΠ

.....

ΑΝΑΣΤΑΣΙΟΣ ΕΥΑΓΓΕΛΟΣ ΦΟΡΟΥΛΗΣ

Copyright © Αναστάσιος Ευάγγελος Φορούλης, 2021

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

Ο αντίκτυπος της πανδημίας του covid19 στην ευρωπαϊκή οικονομία είναι εξαιρετικά σημαντικός, με περίπου 1.8 εκατομμύρια ευρωπαίους πολίτες να χάνουν τη εργασία τους μεταξύ Σεπτεμβρίου 2019 και Σεπτεμβρίου 2020. Με σκοπό την ανόρθωση της οικονομίας, η Ευρωπαϊκή Ένωση δημιούργησε ειδικό Πακέτο Ανάκαμψης, διαθέτοντας €672.5 δισεκατομμύρια οικονομικής βοήθειας στα κράτη-μέλη για τα επόμενα πέντε χρόνια. Ακολουθώντας την Ευρωπαϊκή «Πράσινη» Συμφωνία και τις προσπάθειες εναντίον της κλιματικής αλλαγής, τα κράτη - μέλη καλούνται να επενδύσουν το 37% των κεφαλαίων του Πακέτου Ανάκαμψης από τον covid19 στην «πράσινη» μετάβαση, διαμορφώνοντας κατάλληλα τα εθνικά τους σχέδια.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία, αναζητείται η βέλτιστη κατανομή των κεφαλαίων του Πακέτου Ανάκαμψης από τον covid19 για την επιδότηση χαρτοφυλακίων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Έχοντας ως στόχο τη μείωση των εκπομπών ρύπων και τη δημιουργία νέων θέσεων εργασίας «πράσινης» μετάβασης, χρησιμοποιείται μια μεθοδολογία που συνδυάζει ολοκληρωμένα μοντέλα αποτίμησης με ανάλυση χαρτοφυλακίου. Τα αποτελέσματα της βελτιστοποίησης χαρτοφυλακίου αξιολογούνται ως προς την ευρωστία τους. Συγκεκριμένα, αρχικά χρησιμοποιείται το ολοκληρωμένο μοντέλο αποτίμησης GCAM, το οποίο παράγει τις επιδόσεις των τεχνολογιών ανανεώσιμης ενέργειας ως προς τους στόχους – κριτήρια της βελτιστοποίησης, δηλαδή ως προς τη μείωση των εκπομπών ρύπων και τη δημιουργία νέων θέσεων εργασίας. Στη συνέχεια πραγματοποιείται η βελτιστοποίηση χαρτοφυλακίου χρησιμοποιώντας τη μέθοδο πολυκριτηριακού προγραμματισμού AUGMECON – R. Η ανάλυση ευρωστίας υλοποιείται εισάγοντας στοχαστική αβεβαιότητα και επιλύοντας επαναληπτικά το πρόβλημα βελτιστοποίησης με τη μέθοδο Monte Carlo.

Από την ανάλυση προκύπτει πως για επενδύσεις της τάξης των €100-200 δισεκατομμυρίων μεταξύ του διαστήματος 2021-2025, περίπου 230-432 χιλ. θέσεις εργασίας δύναται να δημιουργηθούν στον ενεργειακό τομέα. Παράλληλα, τα αποτελέσματα δείχνουν πως η βέλτιστη αξιοποίηση των κονδυλίων του εξεταζόμενου Πακέτου Ανάκαμψης συμβάλει στο να φτάσει η Ευρωπαϊκή Ένωση κατά 2-10% πλησιέστερα στους στόχους μείωσης εκπομπών του 2030, συγκριτικά με το σενάριο των ισχυόντων σημερινών πολιτικών. Στο σύνολο των οκτώ τεχνολογιών που εξετάστηκαν – δηλαδή τω τεχνολογιών των βιοκαυσίμων, της βιομάζας, της συμπυκνωμένης ηλιακής ενέργειας, της γεωθερμίας, των φωτοβολταϊκών συστημάτων, των ηλεκτρικών οχημάτων, της αιολικής ενέργειας και του βιοαερίου - τα βιοκαύσιμα, η αιολική ενέργεια και το βιοαέριο προκύπτουν ως οι βέλτιστες τεχνολογίες που πρέπει να επιχορηγηθούν κατά προτεραιότητα, με μικρή συμμετοχή της γεωθερμίας στα χαρτοφυλάκια επενδύσεων. Από την ανάλυση αβεβαιότητας προκύπτει πως τα χαρτοφυλάκια με κυρίαρχη συμμετοχή της αιολικής ενέργειας εμφανίζονται ως πιο ευσταθή.

Λέξεις – κλειδιά: Πακέτο Ανάκαμψης, Covid19, Ολοκληρωμένα Μοντέλα Αποτίμησης, Ανάλυση Χαρτοφυλακίου, Αβεβαιότητα, Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας, Πολυκριτηριακή Βελτιστοποίηση, AUGMECON R

Abstract

The Covid19 pandemic has had a significant impact on the European economy, with approximately 1.8 million EU citizens losing their jobs between September 2019 and September 2020. Towards facilitating a recovery, the EU launched the Recovery and Resilience Facility (RRF) to provide €672.5 billion of financial support to Member States in the coming years. In line with the European Green Deal and climate efforts, 37% of investments in national plans requesting RRF financing must focus on a "green" transition.

In the present diploma thesis, the optimal allocation of renewable energy subsidies from the Covid19 recovery package in the EU is investigated. Towards further mitigating emissions and creating new jobs in the green transition, on top of a current policies scenario, we use budgets aligned with announced plans, and couple integrated assessment modelling with a technological portfolio analysis. The outcomes of the portfolio analysis are also evaluated under uncertainty. In particular, the GCAM model is used to identify the performance of the renewable energy technologies in terms of the optimization criteria, namely mitigating emissions and creating new jobs. Then, the multi objective optimization method AUGMECON – R is applied to conduct the portfolio analysis. The robustness analysis is implemented by assuming stochastic uncertainty and iteratively running the portfolio optimization with the Monte Carlo method.

We find that, for a €100-200 billion investment budget in 2021-2025, about 230-432k new jobs can be created by 2025 in the energy sector. The support package alone could also bring the EU closer to the new 2030 climate target, corresponding to a 2-10% drop further down from the current policies scenario. Among the set of the eight technologies examined - namely biofuels, geothermal, wind, electrical vehicles, CSP, biogas, photovoltaics and solid biomass - biofuels, wind, and biogas appear to be the most optimal technologies to subsidize against the two criteria, with small geothermal investments complementing portfolios. Wind-based portfolios prioritizing employment gains appear more robust against uncertainties.

Keywords: Recovery Package, Covid19, Integrated Assessment Modeling, Portfolio Analysis, Uncertainty, Renewable Energy Sources, Multiobjective Optimization, AUGMECON R

Πρόλογος

Η εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας έγινε κατά το ακαδημαϊκό έτος 2020 – 2021 στον τομέα Ηλεκτρικών Βιομηχανικών Διατάξεων και Συστημάτων Αποφάσεων της Σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, στα πλαίσια των ερευνητικών δραστηριοτήτων του Εργαστηρίου Συστημάτων Αποφάσεων και Διοίκησης.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον Αναπληρωτή Καθηγητή κ. Χάρη Δούκα για την ανάθεση της διπλωματικής εργασίας και την ευκαιρία που μου έδωσε να ασχοληθώ με το συγκεκριμένο αντικείμενο.

Τέλος, ένα μεγάλο ευχαριστώ οφείλω στην οικογένειά μου.

Αθήνα, Φεβρουάριος 2021

Αναστάσιος Ευάγγελος Φορούλης

Περιεχόμενα

Περίληψη 4
Abstract 5
Πρόλογος 6
Πίνακας Εικόνων 9
1. Εισαγωγή 11
2. Μεθοδολογικό υπόβαθρο 13
2.1 Πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση 13
2.1.1 Μέθοδος E-constraint 15
2.1.2 Μέθοδος Augmecon 17
2.1.3 Η μέθοδος Augmecon 2 18
2.1.4 Η μέθοδος Augmecon R 21
2.2 Μοντελοποίηση Ολοκληρωμένης Αποτίμησης 24
2.2.1 Το μοντέλο GCAM 24
3. Εφαρμογή 26
3.1 Περιγραφή του προβλήματος 26
3.2 Μέθοδοι 30
3.3 Αποτελέσματα 34
3.3.1 Χαρτοφυλάκια προϋπολογισμού €100 δισεκατομμυρίων 34
3.3.2 Χαρτοφυλάκια προϋπολογισμού €150 δισεκατομμυρίων 40
3.3.3 Χαρτοφυλάκια προϋπολογισμού €200 δισεκατομμυρίων. 47
4. Συμπεράσματα 54
Αναφορές 56

ΒΕΛΤΙΣΤΗ ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΕΠΙΔΟΤΗΣΕΩΝ ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΩΝ ΠΗΓΩΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΑΠΟ ΤΟ ΠΑΚΕΤΟ ΑΝΑΚΑΜΨΗΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΝΤΙΜΕΤΩΠΙΣΗ ΤΩΝ ΣΥΝΕΠΕΙΩΝ ΤΟΥ COVID19

Πίνακας Εικόνων

ΕΙΚΟΝΑ 1: ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΡΟΗΣ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ AUGMECON - R (Nikas, Fountoulakis, Forouli, & Doukas, 2020)..... 23

ΕΙΚΟΝΑ 2 ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΕΠΕΝΔΥΣΕΩΝ ΕΕ (EuropeanCouncil, 2020). 29

ΕΙΚΟΝΑ 3 ΜΕΤΩΠΟ ΒΕΛΤΙΣΤΩΝ ΧΑΡΤΟΦΥΛΑΚΙΩΝ (€100 ΔΙΣ) 35

ΕΙΚΟΝΑ 4 ΣΥΝΘΕΣΗ ΤΟΥ ΒΕΛΤΙΣΤΟΥ ΧΑΡΤΟΦΥΛΑΚΙΟΥ P1 (€100 ΔΙΣ)..... 35

ΕΙΚΟΝΑ 5 ΣΥΝΘΕΣΗ ΤΟΥ ΒΕΛΤΙΣΤΟΥ ΧΑΡΤΟΦΥΛΑΚΙΟΥ P2 (€100 ΔΙΣ)..... 36

ΕΙΚΟΝΑ 6 ΣΥΜΜΕΤΟΧΗ ΒΙΟΚΑΥΣΙΜΩΝ ΣΤΑ ΒΕΛΤΙΣΤΑ ΧΑΡΤΟΦΥΛΑΚΙΑ ΚΑΤΑ ΤΙΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΙΣ MONTE CARLO (€100 ΔΙΣ) 37

ΕΙΚΟΝΑ 7 ΣΥΜΜΕΤΟΧΗ ΑΙΟΛΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΤΑ ΒΕΛΤΙΣΤΑ ΧΑΡΤΟΦΥΛΑΚΙΑ ΚΑΤΑ ΤΙΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΙΣ MONTE CARLO (€100 ΔΙΣ) 37

ΕΙΚΟΝΑ 8 ΣΥΜΜΕΤΟΧΗ ΒΙΟΑΕΡΙΟΥ ΣΤΑ ΒΕΛΤΙΣΤΑ ΧΑΡΤΟΦΥΛΑΚΙΑ ΚΑΤΑ ΤΙΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΙΣ MONTE CARLO (€100 ΔΙΣ) 38

ΕΙΚΟΝΑ 9 ΣΥΜΜΕΤΟΧΗ ΓΕΩΘΕΡΜΙΑΣ ΣΤΑ ΒΕΛΤΙΣΤΑ ΧΑΡΤΟΦΥΛΑΚΙΑ ΚΑΤΑ ΤΙΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΙΣ MONTE CARLO (€100 ΔΙΣ) 38

ΕΙΚΟΝΑ 10 ΣΥΜΜΕΤΟΧΗ CSP ΣΤΑ ΒΕΛΤΙΣΤΑ ΧΑΡΤΟΦΥΛΑΚΙΑ ΚΑΤΑ ΤΙΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΙΣ MONTE CARLO (€100 ΔΙΣ) 39

ΕΙΚΟΝΑ 11 ΣΥΜΜΕΤΟΧΗ ΒΙΟΜΑΖΑΣ ΣΤΑ ΒΕΛΤΙΣΤΑ ΧΑΡΤΟΦΥΛΑΚΙΑ ΚΑΤΑ ΤΙΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΙΣ MONTE CARLO (€100 ΔΙΣ) 39

ΕΙΚΟΝΑ 12 ΜΕΤΩΠΟ ΒΕΛΤΙΣΤΩΝ ΧΑΡΤΟΦΥΛΑΚΙΩΝ ΜΕ ΠΛΗΡΟΦΟΙΑ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ (€100 BILLION)..... 40

ΕΙΚΟΝΑ 13 ΜΕΤΩΠΟ ΒΕΛΤΙΣΤΩΝ ΧΑΡΤΟΦΥΛΑΚΙΩΝ (€150 ΔΙΣ.) 41

ΕΙΚΟΝΑ 14 ΣΥΝΘΕΣΗ ΤΟΥ ΒΕΛΤΙΣΤΟΥ ΧΑΡΤΟΦΥΛΑΚΙΟΥ P1 (€150 ΔΙΣ.)..... 41

ΕΙΚΟΝΑ 15 ΣΥΝΘΕΣΗ ΤΟΥ ΒΕΛΤΙΣΤΟΥ ΧΑΡΤΟΦΥΛΑΚΙΟΥ P2 (€150 ΔΙΣ)..... 42

ΕΙΚΟΝΑ 16 ΣΥΜΜΕΤΟΧΗ ΒΙΟΚΑΥΣΙΜΩΝ ΣΤΙΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΙΣ MONTE CARLO (€150 ΔΙΣ) 43

ΕΙΚΟΝΑ 17 ΣΥΜΜΕΤΟΧΗ ΑΙΟΛΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΤΑ ΒΕΛΤΙΣΤΑ ΧΑΡΤΟΦΥΛΑΚΙΑ ΚΑΤΑ ΤΙΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΙΣ MONTE CARLO (€150 ΔΙΣ) 43

ΕΙΚΟΝΑ 18 ΣΥΜΜΕΤΟΧΗ ΒΙΟΑΕΡΙΟΥ ΣΤΑ ΒΕΛΤΙΣΤΑ ΧΑΡΤΟΦΥΛΑΚΙΑ ΚΑΤΑ ΤΙΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΙΣ MONTE CARLO (€150 ΔΙΣ) 44

ΕΙΚΟΝΑ 19 ΣΥΜΜΕΤΟΧΗ ΓΕΩΘΕΡΜΙΑΣ ΣΤΑ ΒΕΛΤΙΣΤΑ ΧΑΡΤΟΦΥΛΑΚΙΑ ΚΑΤΑ ΤΙΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΙΣ MONTE CARLO (€150 ΔΙΣ) 44

ΕΙΚΟΝΑ 20 ΣΥΜΜΕΤΟΧΗ CSP ΣΤΑ ΒΕΛΤΙΣΤΑ ΧΑΡΤΟΦΥΛΑΚΙΑ ΚΑΤΑ ΤΙΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΙΣ MONTE CARLO (€150 ΔΙΣ) 45

ΕΙΚΟΝΑ 21 ΣΥΜΜΕΤΟΧΗ ΒΙΟΜΑΖΑΣ ΣΤΑ ΒΕΛΤΙΣΤΑ ΧΑΡΤΟΦΥΛΑΚΙΑ ΚΑΤΑ ΤΙΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΙΣ MONTE CARLO (€150 ΔΙΣ) 45

ΕΙΚΟΝΑ 22 ΜΕΤΩΠΟ ΒΕΛΤΙΣΤΩΝ ΧΑΡΤΟΦΥΛΑΚΙΩΝ ΜΕ ΠΛΗΡΟΦΟΙΑ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ (€150 ΔΙΣ) 46

ΕΙΚΟΝΑ 23 ΜΕΤΩΠΟ ΒΕΛΤΙΣΤΩΝ ΧΑΡΤΟΦΥΛΑΚΙΩΝ (€200 ΔΙΣ.) 47

ΕΙΚΟΝΑ 24 ΣΥΝΘΕΣΗ ΤΟΥ ΒΕΛΤΙΣΤΟΥ ΧΑΡΤΟΦΥΛΑΚΙΟΥ P1 (€200 ΔΙΣ.) 48

ΕΙΚΟΝΑ 25 ΣΥΝΘΕΣΗ ΤΟΥ ΒΕΛΤΙΣΤΟΥ ΧΑΡΤΟΦΥΛΑΚΙΟΥ P2 (€200 ΔΙΣ.) 48

ΕΙΚΟΝΑ 26 ΣΥΜΜΕΤΟΧΗ ΒΙΟΚΑΥΣΙΜΩΝ ΣΤΑ ΒΕΛΤΙΣΤΑ ΧΑΡΤΟΦΥΛΑΚΙΑ ΚΑΤΑ ΤΙΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΙΣ MONTE CARLO (€200 ΔΙΣ) 49

ΕΙΚΟΝΑ 27 ΣΥΜΜΕΤΟΧΗ ΑΙΟΛΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΤΑ ΒΕΛΤΙΣΤΑ ΧΑΡΤΟΦΥΛΑΚΙΑ ΚΑΤΑ ΤΙΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΙΣ MONTE CARLO (€200 ΔΙΣ) 50

ΕΙΚΟΝΑ 28 ΣΥΜΜΕΤΟΧΗ ΒΙΟΑΕΡΙΟΥ ΣΤΑ ΒΕΛΤΙΣΤΑ ΧΑΡΤΟΦΥΛΑΚΙΑ ΚΑΤΑ ΤΙΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΙΣ MONTE CARLO (€200 ΔΙΣ) 50

ΕΙΚΟΝΑ 29 ΣΥΜΜΕΤΟΧΗ ΓΕΩΘΕΡΜΙΑΣ ΣΤΑ ΒΕΛΤΙΣΤΑ ΧΑΡΤΟΦΥΛΑΚΙΑ ΚΑΤΑ ΤΙΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΙΣ MONTE CARLO (€200 ΔΙΣ) 51

ΕΙΚΟΝΑ 30 ΣΥΜΜΕΤΟΧΗ CSP ΣΤΑ ΒΕΛΤΙΣΤΑ ΧΑΡΤΟΦΥΛΑΚΙΑ ΚΑΤΑ ΤΙΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΙΣ MONTE CARLO (€200 ΔΙΣ) 51

ΕΙΚΟΝΑ 31 ΣΥΜΜΕΤΟΧΗ ΒΙΟΜΑΖΑΣ ΣΤΑ ΒΕΛΤΙΣΤΑ ΧΑΡΤΟΦΥΛΑΚΙΑ ΚΑΤΑ ΤΙΣ ΠΡΟΣΩΠΕΙΩΣΕΙΣ MONTE CARLO (€200 ΔΙΣ) 52

ΕΙΚΟΝΑ 32 ΜΕΤΩΠΟ ΒΕΛΤΙΣΤΩΝ ΧΑΡΤΟΦΥΛΑΚΙΩΝ ΜΕ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ (€200 ΔΙΣ) 52

1. Εισαγωγή

Η πανδημία του Covid19 έφερε την ευρωπαϊκή και παγκόσμια κοινότητα αντιμέτωπη με μια πρωτοφανή υγειονομική, κοινωνική και οικονομική κρίση. Η δραματική μείωση της οικονομικής δραστηριότητας οδήγησε σε εκατοντάδες χιλιάδες χαμένες θέσεις εργασίας. Η Ευρωπαϊκή Ένωση ανταποκρίθηκε στο ξέσπασμα του κορονοϊού με τη λήψη άμεσων μέτρων έκτακτης ανάγκης και την κατάρτιση πακέτου μέτρων για την μακροπρόθεσμη ανάκαμψη. Ως αποτέλεσμα, η Ευρωπαϊκή Ένωση (ΕΕ) αποφάσισε τη δημιουργία ενός πακέτου ανάκαμψης με σκοπό να μετριαστούν οι επιπτώσεις της κρίσης, στηρίζοντας την οικονομία και προστατεύοντας θέσεις εργασίας. Η «πράσινη» συμφωνία βρίσκεται στον πυρήνα του πακέτου ανάκαμψης της ΕΕ από την πανδημία του Covid19. Το σχέδιο ανάκαμψης αποτελεί ευκαιρία επένδυσης σε μια πιο «πράσινη», ψηφιακή και ανθεκτική Ευρώπη.

Το θέμα της παρούσας διπλωματικής εργασίας επικεντρώνεται στη μελέτη της βέλτιστης κατανομής των πόρων του πακέτου ανάκαμψης, με σκοπό την χρηματοδότηση της οικονομικής ανάπτυξης και του αναπτυξιακού αναπροσανατολισμού της Ευρώπης προς την «πράσινη» μετάβαση. Προκειμένου να εντοπιστεί η βέλτιστη στρατηγική κατανομή των κονδυλίων του πακέτου ανάκαμψης προς την κατεύθυνση της «πράσινης» μετάβασης, διαμορφώνεται το πρόβλημα εντοπισμού της βέλτιστης κατανομής χρηματοδότησης σε χαρτοφυλάκια τεχνολογιών παραγωγής ανανεώσιμης ενέργειας. Το πρόβλημα επιλέγεται να εκφραστεί ως ένα πρόβλημα ανάλυσης χαρτοφυλακίου, μέθοδος η οποία, όπως αποδεικνύει η πρόσφατη βιβλιογραφία, είναι μια ευρέως καθιερωμένη προσέγγιση αντιμετώπισης των προκλήσεων που σχετίζονται με τον καθορισμό των ενεργειακών σχεδίων, τον ενεργειακό σχεδιασμό και την χάραξη κλιματικής πολιτικής.

Ταυτόχρονα, κατανοώντας πως η μεταμόρφωση των κοινωνιών σε χαμηλών εκπομπών και κλιματικά ανθεκτικά συστήματα αποτελεί έναν σύνθετο και πολυδιάστατο χώρο προβλήματος, δεδομένου ότι επηρεάζει άμεσα τους ανθρώπους και τους οργανισμούς εντός των συστημάτων αυτών, η παρούσα διπλωματική επιχειρεί να αποτυπώσει την ανάγκη μελέτης των δυναμικών διαδράσεων μεταξύ οικονομίας, ενέργειας και κλιματικών διαστάσεων μέσω των μοντέλων ολοκληρωμένης αποτίμησης. Η αντικατάσταση συμβατικών τεχνολογιών και συμπεριφορών με φιλικές προς το κλίμα λύσεις δύνανται να επιφέρουν στις κοινωνίες κοινωνικοοικονομικά και περιβαλλοντικά οφέλη, αλλά μπορούν παράλληλα να έχουν και αρνητικές επιπτώσεις, όπως π.χ. απώλειες θέσεων εργασίας, απαιτήσεις επενδύσεων ή απαιτούμενες εισαγωγές πόρων, οι οποίες είναι πιθανό να αποτελέσουν τροχοπέδη ως προς την επιθυμητή αλλαγή. Στο συγκεκριμένο πρόβλημα εξετάζεται η επίδραση επιδότησης κάθε μίας εκ των οχτώ τεχνολογιών παραγωγής ανανεώσιμης ενέργειας στη μείωση των εκπομπών ρύπων και στη δημιουργία νέων «πράσινων» θέσεων εργασίας. Όπως αναφέρθηκε, προκειμένου να ποσοτικοποιηθούν οι επιπτώσεις αυτές χρησιμοποιήθηκε

ως εργαλείο τα μοντέλα ολοκληρωμένης αποτίμησης, στα οποία ηεπιστημονική κοινότητα έχει για καιρό βασιστεί προκειμένου να υποστηρίξει την κλιματική δράση, αναγνωρίζοντας ότι έχουν σε μεγάλο βαθμό συνεισφέρει στην κατανόηση των περίπλοκων αλληλεπιδράσεων μεταξύ ενέργειας, κλίματος, οικονομίας και όλων των διαστάσεων της ανθρώπινης δραστηριότητας καθώς και όλων των επιπτώσεων των πιθανών στρατηγικών πολιτικής σε κάθε μία από αυτές τις υπομονάδες.

Παράλληλα αναγνωρίζεται ότι τόσο η κλιματική αλλαγή όσο και η πολιτική μετριασμού ή/και προσαρμογής σε αυτήν χαρακτηρίζονται από σημαντικά επίπεδα διαφορετικών τύπων αβεβαιότητας και κινδύνων. Αυτοί αφορούν πληθώρα ζητημάτων, από τα μελλοντικά επίπεδα συγκέντρωσης άνθρακα έως τις κοινωνικοοικονομικές εξελίξεις που εν τέλει θα προάγουν ή θα παρεμποδίσουν την υιοθέτηση και εφαρμογή μέτρων πολιτικής σε αυτήν την κατεύθυνση, όπως η δυνατότητα χρηματοδότησης της τεχνολογικής καινοτομίας ή τα επίπεδα κοινωνικής αποδοχής των πολιτικών. Επομένως, δεδομένης της ανάγκης χειρισμού της αβεβαιότητας εξετάζεται συμπληρωματικά η ευστάθεια του προβλήματος συγκρίνοντας εύρωστα βέλτιστα χαρτοφυλάκια υπό την επίδραση στοχαστικής αβεβαιότητας.

2. Μεθοδολογικό υπόβαθρο

2.1 Πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση

Στην περίπτωση που ένα πρόβλημα μαθηματικού προγραμματισμού, αποτυπώνεται με ένα μόνο κριτήριο - αντικειμενική συνάρτηση, τότε το πρόβλημα χαρακτηρίζεται ως μονοκριτηριακό. Σε κάθε διαφορετική περίπτωση, που η προβληματική εκφράζεται με περισσότερες από μια αντικειμενικές συναρτήσεις - κριτήρια, τότε χαρακτηρίζεται ως πρόβλημα Πολυκριτήριου Μαθηματικού Προγραμματισμού (Multiple Objective Mathematical Programming- MOMP). Συνήθως η χρήση του πολυκριτήριου μαθηματικού προγραμματισμού, είναι περισσότερο ρεαλιστική, διότι η πληθώρα των σύγχρονων προβλημάτων στη φύση, καθώς και η αναζήτηση της βέλτιστης απόφασης, προϋποθέτει την διερεύνηση περισσότερων τους ενός κριτηρίων (για παράδειγμα: ύπαρξη οικονομικών, περιβαλλοντικών, ποιοτικών, κοινωνικών κριτηρίων κλπ). Αυτός εξάλλου είναι και ο λόγος ανάπτυξης της συγκεκριμένης κατηγορίας μαθηματικής βελτιστοποίησης και της εφαρμογής της στη σύγχρονη διαδικασία λήψης αποφάσεων.

Η γενική μορφή του πολυκριτηριακού προβλήματος διατυπώνεται ως εξής:

$$\begin{gathered} max(min)\ f_m(\boldsymbol{x}) \qquad m = 1,2,\dots M \\ s.t. \\ \boldsymbol{x} \in S = \{\boldsymbol{x} \in R^n \mid g_i(\boldsymbol{x}) \otimes b_i, i = 1,2,\dots,k\} \end{gathered} \tag{2.9}$$

Όπου:

f_m: η m - οστή αντικειμενική συνάρτηση

$\boldsymbol{x}$: 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

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.

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.

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, 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.

Η μέθοδος που χρησιμοποιείται στην παρούσα εργασία ανήκει στις μεθόδους με έκφραση προτίμησης μετά το τέλος της διαδικασίας και ονομάζεται AUGMECON – R. Η συγκεκριμένη μέθοδος αποτελεί μια βελτιωμένη έκδοση παλαιότερων μεθόδων πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης, συγκεκριμένα των AUGMECON και AUGMECON 2, οι οποίες βασίζονται στην λογική της μεθόδου των περιορισμών (μέθοδος ε-constraint). Τα βασικά χαρακτηριστικά των συγκεκριμένων μεθόδων, δηλαδή των ε-constraint, AUGMECON, AUGMECON 2 και AUGMECON – R δίνονται στη συνέχεια.

2.1.1 Μέθοδος E-constraint

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 e_j. Από τη συγκεκριμένη λογική προκύπτει και η ονομασία της μεθόδου ως μέθοδος των περιορισμών

Για να επεξηγηθεί η μέθοδος θεωρείται το ακόλουθο πρόβλημα Πολυκριτήριου Μαθηματικού Προγραμματισμού (Multiple Objective Mathematical Programming-MOMP):

$$\text{Max } \{f_1(x), f_2(x),\ldots, fp(x)\}$$

$$\text{Subject to } x \epsilon S$$

Όπου x το διάνυσμα των μεταβλητών απόφασης, f_1,..,fp οι p το πλήθος αντικειμενικές συναρτήσεις, στο χωρίο των εφικτών λύσεων S. Όπως αναφέρθηκε, η βασική ιδέα της

μεθόδου ε-constraint είναι ότι βελτιστοποιείται η μια αντικειμενική συνάρτηση θεωρώντας τις υπόλοιπες ως περιορισμούς. Το πρόβλημα μετατρέπεται ως εξής:

$$\text{Max}\{f_1(x)\}$$

Subject to

$$f_2(x)>=e_2$$

$$f_3(x)>=e_3$$

$$\dots$$

$$f_p(x)>=e_p$$

$$x\epsilon S$$

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. Μεταβάλλοντας το δεξί σκέλος (RHS) των περιορισμένων αντικειμενικών (e_i) αποκτώνται οι αποτελεσματικές λύσεις (Efficient Solutions, ES). Δηλαδή, το πρόβλημα επιλύεται πάνω σε ένα πλέγμα (grid) μεγέθους N2*N3*…*NP, όπου Ni είναι το εύρος της αντικειμενικής συνάρτησης fi, δηλαδή η διαφορά μεταξύ μέγιστης και ελάχιστης τιμής. Έτσι, η όλη διαδικασία πραγματοποιείται ως εξής:

Αφού επιλυθεί το παραπάνω, αρχικό, πρόβλημα, αυξάνεται το e_2 κατά μια ποσότητα βήματος $step_2$ και το πρόβλημα επιλύεται ξανά λαμβάνοντας μια δεύτερη λύση. Ακολούθως, αυξάνεται το e_2' κατά την ίδια ποσότητα $step_2$. Επιλύεται το πρόβλημα λαμβάνοντας μια τρίτη λύση κ.ο.κ μέχρι να εξεταστεί το άνω όριο της f_2 οπότε τότε το RHS γίνεται πάλι ίσο με το αρχικό και τώρα αυξάνεται κατά $step_3$ το e_3 και ακολουθεί την περιγραφείσα πορεία μέχρι να φτάσει στο άνω όριο. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται για όλα τα RHS μέχρι να καλυφθεί όλο το πλέγμα. Με αυτόν τον τρόπο, λαμβάνονται οι λύσεις του προβλήματος βελτιστοποίησης οι οποίες είναι p-αδες.

Ένα πλεονέκτημα της ε-constraint είναι ότι ελέγχεται το πλήθος των παραγόμενων αποτελεσματικών λύσεων (ES) προσαρμόζοντας κατάλληλα το πλήθος των σημείων πλέγματος (gridpoints), δηλαδή των σημείων του πλέγματος πάνω στα οποία θα γίνεται η εκάστοτε βελτιστοποίηση, στα εύρη των αντικειμενικών συναρτήσεων.

Τρία είναι τα βασικά μειονεκτήματα της ε-constraint (Mavrotas, 2009)

1) Ο υπολογισμός του εύρους της κάθε αντικειμενικής συνάρτησης (Objective function, OF) πάνω στο σύνολο το οποίο περιέχει τις μεταβλητές απόφασης για τις οποίες λαμβάνουμε αποτελεσματικές κατά Pareto λύσεις (efficient set).

2) Η αδυναμία εξασφάλισης ότι οι λύσεις που λαμβάνουμε ανήκουν στο EPF και όχι στο WPF.

3) Ο τεράστιος χρόνος επίλυσης για προβλήματα με παραπάνω από δύο OF.

Στη συνέχεια, γίνεται αναφορά στις μεθόδους AUGMECON και AUGMECON 2.

2.1.2 Μέθοδος Augmecon

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 & 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 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 της μεθόδου των περιορισμών μετασχηματίζεται σύμφωνα με τη μέθοδο AUGMECON στην ακόλουθη μορφή:

$$max\{f_1(\boldsymbol{x}) + eps * (s_2/r_2 + s_3/r_3 + \cdots + s_p/r_p)\}$$

$$s.t.$$

$$f_2(\boldsymbol{x}) - s_2 = e_2$$

$$f_3(\boldsymbol{x}) - s_3 = e_3$$

$$\ldots$$

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

$$\boldsymbol{x} \epsilon S$$

$$s_i \epsilon R^+, i = 2, \ldots, p$$

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. Την ίδια στιγμή οι μεταβλητές απόκλισης χρησιμοποιούνται ως δεύτερος όρος με μειωμένη προτεραιότητα βελτιστοποίησης (με λεξικογραφικό τρόπο) στην ελεύθερη αντικειμενική που βελτιστοποιείται.

Η AUGMECON έχει υλοποιηθεί στο λογισμικό GAMS. Το λογισμικό GAMS είναι μια ευρέως χρησιμοποιούμενη γλώσσα μοντελοποίησης προβλημάτων μαθηματικού προγραμματισμού και είναι το λογισμικό το οποίο θα χρησιμοποιηθεί για την επίλυση του προβλήματος της παρούσας εργασίας. 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 και λοιπά). 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 (nonlinear programming, NLP).

2.1.3 Η μέθοδος Augmecon 2

Η μέθοδος AUGMECON 2 αποτελεί έναν ισχυρό αλγόριθμο για την επίλυση πολυκριτηριακών προβλημάτων ακέραιου προγραμματισμού (Multi-Objective Integer Programming – MOIP) και αποτελεί μια ιδιαίτερα βελτιωμένη έκδοση της απλής μεθόδου AUGMECON.

Η μαθηματική διατύπωση της μεθόδου AUGMECON 2 έχει ως εξής:

$$Max\{f_1(\boldsymbol{x}) + eps * (s_2/r_2 + 10^{-1} * s_3/r_3 + \cdots + 10^{-(p-2)} * s_p/r_p)\}$$

$$s.t.$$

$$f_2(\boldsymbol{x}) - s_2 = e_2$$
$$f_3(\boldsymbol{x}) - s_3 = e_3$$
$$\dots$$
$$f_p(\boldsymbol{x}) - s_p = e_p$$
$$\boldsymbol{x} \epsilon S$$
$$s_i \epsilon R^+, i = 2, \dots, p$$

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). Στην ουσία ο συντελεστής παράκαμψης υποδεικνύει πόσες διαδοχικές επαναλήψεις είναι δυνατό να αποφευχθούν, ακριβώς επειδή οδηγούν στην ίδια ικανή λύση. Λόγω της χρήσης της πληροφορίας που δίνουν οι μεταβλητές απόκλισης των περιορισμένων αντικειμενικών και του συντελεστή παράκαμψης αποφεύγονται περιττές-αχρείαστες επαναλήψεις και ο χρόνος εκτέλεσης της AUGMECON 2 επιταχύνεται συγκριτικά με τον χρόνο επίλυσης που απαιτεί η μέθοδος AUGMECON και εκεί ακριβώς βρίσκεται η βασική συνεισφορά της στην βελτίωση της μεθόδου AUGMECON.

Ωστόσο, παρά τα σημαντικά πλεονεκτήματα που προσφέρει η μέθοδος AUGMECON 2 συγκριτικά με την AUGMECON, παρουσιάζει τέσσερα βασικά σημεία τα οποία απαιτούν περαιτέρω βελτίωση και τα οποία αντιμετωπίζονται από την μέθοδο AUGMECON - R, η οποία χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα διπλωματική και θα παρουσιαστεί στα επόμενα. Τα τέσσερα σημεία της AUGMECON 2 που χρήζουν βελτίωσης είναι:

1. Πρώτη, και βασική, αδυναμία της AUGMECON 2 αποτελεί το γεγονός ότι ο χρόνος επίλυσης προβλημάτων με πάνω από δύο αντικειμενικές συναρτήσεις παραμένει υψηλός. Ο αλγόριθμος της AUGMECON 2 μεταχειρίζεται τις αντικειμενικές που τίθενται ως περιορισμοί σαν εμφωλευμένους βρόγχους

επανάληψης με τον έναν να εντοπίζεται εσωτερικά του άλλου. Έτσι, ο χρόνος επίλυσης παραμένει υψηλός διότι η AUGMECON 2 εκμεταλλεύεται μόνο τις μεταβλητές απόκλισης που αντιστοιχούν στην αντικειμενική του πιο εσωτερικού βρόγχου επανάληψης, με αποτέλεσμα ακόμα και αν ο υπολογιστικός χρόνος μειώνεται σε σχέση με την απλή AUGMECON, να παραμένει αρκετά μεγάλος λόγω του μεγάλου αριθμού των εμφωλευμένων βρόχων.

2. Δεύτερον, η AUGMECON 2 απαιτεί οι συντελεστές της αντικειμενικής συνάρτησης να είναι ακέραιοι. Εάν αυτό δεν συμβαίνει, οι μη ακέραιοι συντελεστές πολλαπλασιάζονται με την κατάλληλη δύναμη του 10, αυξάνοντας έτσι την πολυπλοκότητα ανάλογα: ένα πρόβλημα των αντικειμενικών συναρτήσεων του μέσου εύρους n και ενός μέσου αριθμού δεκαδικών k θα είχε μια πολυπλοκότητα $O\left(n^{m-1} \times 10^{k\times(m-1)}\right)$.
3. Τρίτον, η εφαρμογή της AUGMECON 2 απαιτεί την εκ των προτέρων γνώση των ελαχίστων τιμών των αντικειμενικών συναρτήσεων. Οι αλγόριθμοι υπολογισμού των ελαχίστων τιμών είναι συνήθως περίπλοκοι, δύσκολοι στον προγραμματισμό και θα μπορούσαν να απαιτούν κομμάτια κώδικα μεγαλύτερα από αυτά της ίδιας της AUGMECON 2. Ταυτόχρονα είναι γενικά ικανοί να επιλύσουν προβλήματα έως και τριών αντικειμενικών συναρτήσεων. Επίσης ο χρόνος εκτέλεσης τέτοιων αλγορίθμων είναι συγκρίσιμος με αυτόν που απαιτείται από την AUGMECON 2. Αυτός είναι ο λόγος για τον οποίο η AUGMECON 2 επιλέγει μια υποεκτίμηση των ελαχίστων τιμών των αντικειμενικών συναρτήσεων, δηλαδή τη χρήση χαμηλότερων ορίων των αντικειμενικών συναρτήσεων, αυξάνοντας έτσι ελαφρώς τον χρόνο υπολογισμού. Αυτή η διαδικασία προσέγγισης των ελαχίστων τιμών στην AUGMECON 2, λαμβάνει χώρα στον πίνακα αποπληρωμής του προβλήματος όπου οι χαμηλότερες τιμές, οι οποίες θεωρητικά είναι ίσες ή μεγαλύτερες από τις ελάχιστες τιμές, πολλαπλασιάζονται με έναν αυθαίρετο συντελεστή (π.χ. 90%), ελπίζοντας σε μια υποτίμηση των πραγματικών ελαχίστων τιμών. Από ακαδημαϊκή σκοπιά, μια ευρετική προσέγγιση γύρω από αυτό θα ήταν ο υπολογισμός όλων των πινάκων αποδόσεων, λαμβάνοντας υπόψη όλες τις πιθανές τιμές των περιορισμένων αντικειμενικών συναρτήσεων. Αυτό αναμένεται να δώσει μια πλησιέστερη προσέγγιση στα πραγματικά ελάχιστες τιμές, επιτρέποντας έναν στενότερο αυθαίρετο συντελεστή, π.χ. στο 95%, ελπίζοντας ότι η νέα ελάχιστη τιμή θα συμπεριληφθεί στο νέο, μικρότερο πλέγμα. Ωστόσο, αυτή η προσέγγιση θα βελτιώσει απλώς τον χρόνο υπολογισμού, χωρίς να αποφεύγεται ούτε η αυθαίρετη φύση της συγκεκριμένης διαδικασίας προσέγγισης.
4. Τέταρτον, η συσχέτιση μεταξύ της σειράς των περιορισμένων αντικειμενικών συναρτήσεων μεταξύ των βρόχων και του χρόνου υπολογισμού είναι μια αδυναμία από μόνη της: η AUGMECON 2 διαθέτει συντελεστή παράκαμψης μόνο για τον εσωτερικότατο βρόχο της διαδικασίας, με αποτέλεσμα να απαλλαγούμε μόνο από τους περιττούς ελέγχους σημείου πλέγματος που μπορούν να αποφεύγεται εντός του εσωτερικού βρόχου. Προκειμένου να

μεγιστοποιηθεί ο αριθμός των περιττών επαναλήψεων που αποφεύγονται όσο το δυνατόν περισσότερο, μετά τον υπολογισμό του πίνακα πληρωμών, ο αλγόριθμος θα πρέπει να είναι σε θέση να αλλάζει τη σειρά των περιορισμένων αντικειμενικών συναρτήσεων, έτσι ώστε η αντικειμενική λειτουργία του μεγαλύτερου εύρους να μπορεί να τοποθετηθεί ο εσωτερικός βρόχος.

2.1.4 Η μέθοδος Augmecon R

Οι παραπάνω τέσσερις αδυναμίες που σχετίζονται με τη μέθοδο AUGMECON 2 αποτέλεσαν το κίνητρο για την ανάπτυξη ενός νέου αλγορίθμου που μπορεί να βελτιώσει σημαντικά τον χρόνο υπολογισμού και την αποτελεσματικότητά της, καθώς και να επιτρέπει την εύκολη επίλυση προβλημάτων που μέχρι στιγμής ήταν δύσκολο ή πρακτικά αδύνατο να επιλυθούν. Βασικός στόχος της μεθόδου AUGMECON – R είναι η επίλυση ακριβώς τόσων μοντέλων βελτιστοποίησης, όσα και το πλήθος των προκύπτοντων βέλτιστων λύσεων. Επιδιώκεται δηλαδή η πλήρης εξάλειψη περιττών βελτιστοποιήσεων, που οδηγούν σε αδύνατες ή ίδιες βέλτιστες λύσεις.

Σε αυτήν την κατεύθυνση, η AUGMECON-R εισάγει μια καινοτομία που βασίζεται σε μεγάλο βαθμό στην υπάρχουσα έννοια του συντελεστή παράκαμψης, ενσωματώνοντας στο μοντέλο τόσους συντελεστές παράκαμψης όσους οι αντικειμενικές συναρτήσεις, και οι οποίοι έχουν τη μορφή:

$$b_2 = int(s_2/step_2)$$
$$b_3 = int(s_3/step_3)$$
$$\dots$$
$$b_p = int\left(\frac{s_p}{step_p}\right)$$

όπου: $int()$ είναι η συνάρτηση που επιστρέφει το ακέραιο μέρος ενός πραγματικού αριθμού και τα s_i είναι οι μεταβλητές απόκλισης της αντικειμενικής συνάρτησης i και το $step_i$ είναι το βήμα αύξησης της τιμής του δεξιού μέλους των περιορισμών κάθε επανάληψης για αυτήν τη συγκεκριμένη αντικειμενική συνάρτηση, το οποίο υπολογίζεται ως:

$$step_i = r_i/q_i$$

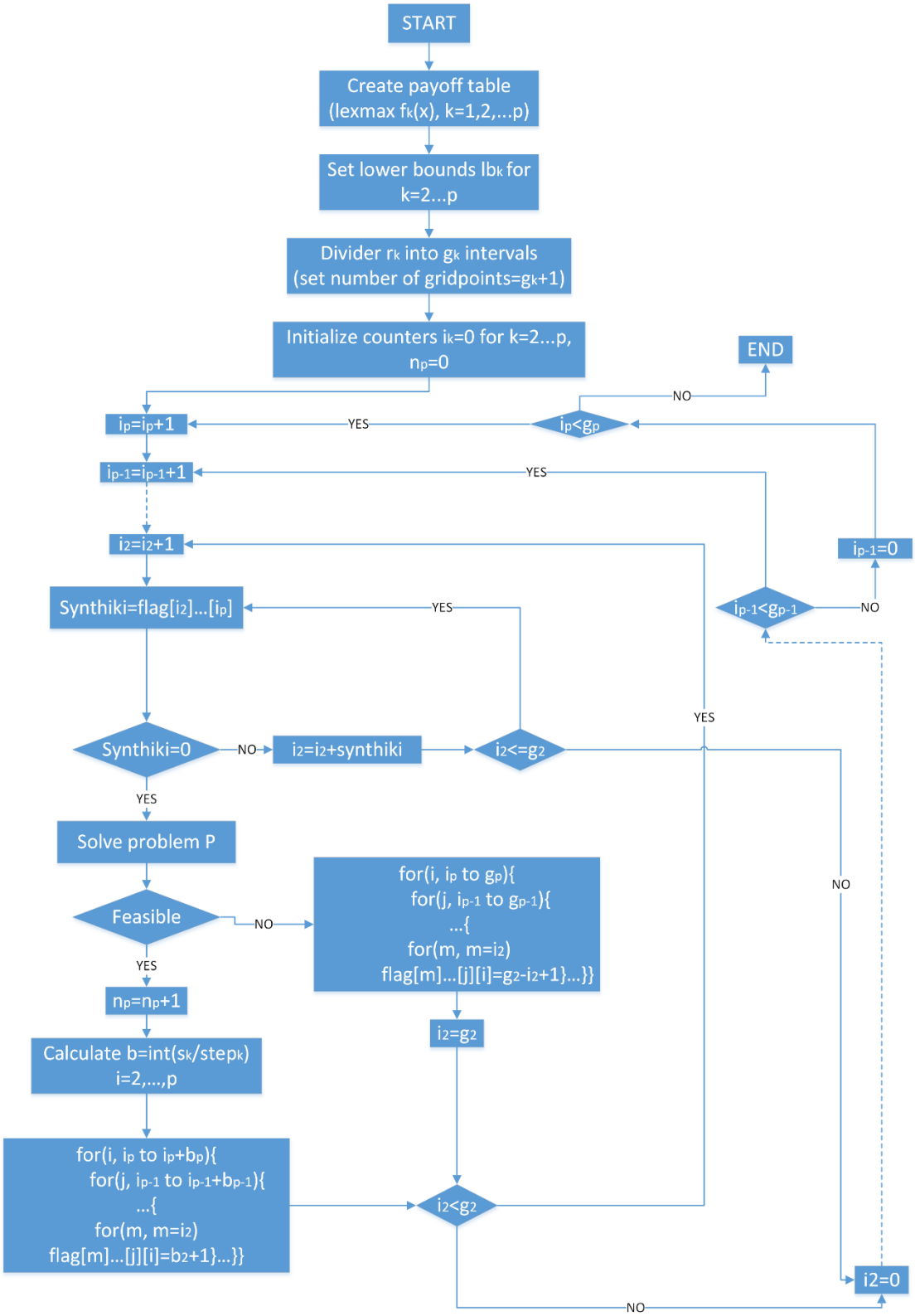
όπου: r_iείναι το εύρος της αντικειμενικής συνάρτησης i, και q_iο αριθμός των ίσων διαστημάτων με τα οποία διαιρείται το εύρος της αντικειμενικής προκειμένου να διαμορφωθεί το πλέγμα, έτσι ώστε το τελευταίο να περιλαμβάνει αριθμό σημείων ίσο με $q_i + 1$.

Με αυτόν τον τρόπο, αντί να έχει έναν συντελεστή παράκαμψης που λειτουργεί στον εσωτερικότατο βρόχο όπως η AUGMECON 2, η μέθοδος AUGMECON-R διαθέτει έναν ενεργό συντελεστή παράκαμψης ο οποίος εφαρμόζεται σε κάθε έναν από τους εξωτερικούς βρόχους. Σε κάθε επανάληψη, υπολογίζονται οι συντελεστές παράκαμψης

$b_i = int(s_i/step_i)$. Όταν $s_i > step_i$, στην επόμενη επανάληψη για b_i'που αντιστοιχεί στο $e_i' = e_i + step_i$η βελτιστοποίηση θα οδηγήσει ξανά στην ίδια λύση, με το $s_i' = s_i - step_i$, να κάνει την επανάληψη περιττή, αφού οδηγεί στην ίδια λύση. Ο συντελεστής παράκαμψης b_iδείχνει πόσες επαναλήψεις πρέπει να παρακαμφθούν, υπό την προϋπόθεση ότι αυτές οι επαναλήψεις αφορούν την i - οστή αντικειμενική συνάρτηση και οι δεξιές πλευρές όλων των άλλων περιορισμένων αντικειμενικών συναρτήσεων παραμένουν σταθερές.

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. Αντίστοιχα, 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. 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 αλγοριθμική υλοποίηση της AUGMECON-R δίνεται μέσω του παρακάτω διαγράμματος ροής.



ΕΙΚΟΝΑ 1: ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΡΟΗΣ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ AUGMECON - R (NIKAS, FOUNTOULAKIS, FOROULI, & DOUKAS, 2020)

2.2 Μοντελοποίηση Ολοκληρωμένης Αποτίμησης

Η μοντελοποίηση ολοκληρωμένης αποτίμησης είναι εξαιρετικά χρήσιμη για την αναπαράσταση και αξιολόγηση της συμπεριφοράς και των διαδράσεων του ενεργειακού συστήματος. Η χρήση της είναι διαδεδομένη στη διερεύνηση πιθανών στρατηγικών ενεργειακού σχεδιασμού και κλιματικής δράσης (Nikas, Doukas, & Papandreou , 2019). Τα Μοντέλα Ολοκληρωμένης Αποτίμησης (ΜΟΑ) δίνουν πληροφορίες σημαντικές για αντισταθμίσεις μεταξύ διαφορετικών στόχων πολιτικής, προσδιορίζουν διαδράσεις μεταξύ διαφορετικών τομέων και ως ένα βαθμό μπορούν να λάβουν υπόψη τους την αβεβαιότητα σε παράγοντες όπως η τεχνολογική ανάπτυξη, η κλιματική αλλαγή, η ανθρώπινη συμπεριφορά και η οικονομική ανάπτυξη (Schwanitz, 2013).

Συνεπώς, πολλές μελέτες οι οποίες απευθύνονται σε φορείς που χαράζουν πολιτικές, αλλά και στο ευρύτερο κοινό, εξαρτώνται σε σημαντικό βαθμό από σενάρια παραγόμενα από τα ΜΟΑ. Επιπρόσθετα, τα ΜΟΑ τυπικά διαχειρίζονται μέσω σεναρίων την αβεβαιότητα, δηλαδή με τρόπο ντετερμινιστικό. Υπάρχει, δηλαδή, η ανάγκη να βρεθούν βελτιωμένες τεχνικές ανάλυσης της ευαισθησίας και της αβεβαιότητας των αποτελεσμάτων που προκύπτουν από τα μοντέλα, σαν μια κεντρική πρόκληση στην χρήση των ΜΟΑ.

Ωστόσο, η μοντελοποίηση του κλίματος και της οικονομίας που βασίζεται σε ΜΟΑ σε πολλές περιπτώσεις εξαιρεί τους φορείς που χαράζουν πολιτικές, όπως και ομάδες εμπειρογνωμόνων, ή περιορίζει την συμμετοχή τους στην μερική διαμόρφωση των υποθέσεων με τις οποίες πραγματοποιούνται οι προσομοιώσεις. Επίσης, παρά το ότι οι ερευνητές έχουν αξιοποιήσει τις προσεγγίσεις βασισμένες σε ΜΟΑ για να διευρυνθούν μελλοντικά επιλογές ενέργειας, χρήσης γης και εκπομπών άνθρακα σε διαφορετικές γεωγραφικές περιοχές, σημαντικό είναι το γεγονός ότι αυτά τα τυποποιημένα μοντέλα αποτίμησης παρουσιάζουν δυσκολίες στην εξήγηση των βραχυπρόθεσμων προτύπων που ο ενεργειακός τομέας ακολουθεί.

2.2.1 Το μοντέλο GCAM

Το GCAM είναι ένα δυναμικό-αναδρομικό, μερικά ισορροπημένο μοντέλο που χρησιμοποιείται για την σύνδεση των κοινωνικοοικονομικών με την ενέργεια, τη χρήση γης, και τα κλιματικά συστήματα. Αναπτύχθηκε από το Joint Global Change Research Institute, μια συνεργασία μεταξύ του Pacific Northwest National Laboratory (PNNL) και του Πανεπιστημίου του Μέριλαντ. Για περισσότερα απο 30 χρόνια το GCAM και οι προκάτοχοί του (π.χ. MiniCAM) χρησιμοποιήθηκαν σε εφαρμογές που ερευνούν μελλοντικά σενάρια εκπομπών και ενεργειακές τεχνολογίες (Edmonds, Wise, & MacCracken, 1994) (Rao, 2017). Το GCAM είναι ένα από τα τέσσερα μοντέλα που επιλέγονται για την ανάπτυξη των Representative Concentration Pathways της 5ης έκθεση αξιολόγησης της IPCC (Pachauri, 2015) και έχει συμπεριληφθεί σε όλες σχεδόν τις μεγάλες κλιματικές/ενεργειακές αξιολογήσεις κατά τη διάρκεια των τελευταίων

δεκαετιών. Θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για τη διερεύνηση των συνεπειών των πολιτικών μετριασμού της κλιματικής αλλαγής, συμπεριλαμβανομένων των φόρων άνθρακα, της εμπορίας άνθρακα, των κανονισμών και της επιταχυνόμενης ανάπτυξης της ενεργειακής τεχνολογίας (JGCRI, 2017).

Το ενεργειακό σύστημα στο GCAM περιλαμβάνει την παραγωγή πρωτογενούς ενέργειας, τον ενεργειακό μετασχηματισμό και τη χρήση τελικών ενεργειακών μορφών για την παροχή ενεργειακών υπηρεσιών. Το μοντέλο διακρίνει μεταξύ των απεμπλουτισμένων και ανανεώσιμων ενεργειακών πόρων. Οι απεμπλουτισμένοι πόροι περιλαμβάνουν τα ορυκτά καύσιμα όπως το πετρέλαιο, το φυσικό αέριο, τον άνθρακα και το ουράνιο (για την πυρηνική ενέργεια). Οι ανανεώσιμοι πόροι περιλαμβάνουν διαφορετικούς τύπους βιομάζας (αστικά απορρίμματα και υπολείμματα), αιολική ενέργεια (on και off-shore), γεωθερμία, υδροηλεκτρική ενέργεια, φωτοβολταικά συστήματα (PV) και συγκεντρωμένη ηλιακή ενέργεια (CSP). Όσον αφορά την ενότητα χρήσης γης, το μοντέλο χωρίζεται σε 283 αγρο-οικολογικές ζώνες (AEZs; Monfreda, Ramankutty, Hertel, 2009), τα οποία χωρίζονται σε χρήσεις γης, όπως οι εμπορικές χρήσεις (καλλιέργειες, δασοκομία) και μη εμπορικές (φυσικό δάσος).

Η επιλογή στο GCAM βασίζεται σε μια μεμονωμένη αριθμητική τιμή που διατάσσει τις εναλλακτικές επιλογές κατά προτίμηση, που ορίζεται ως δείκτης επιλογής. Στην πράξη ο δείκτης επιλογής είναι είτε κόστος είτε ποσοστό κέρδους, αν και άλλοι δείκτες είναι δυνατοί καταρχήν. Σε περιπτώσεις όπου πολλοί παράγοντες επηρεάζουν μια επιλογή, όπως η μεταφορά επιβατών (όπου οι ταχύτεροι τρόποι είναι πιο επιθυμητοί), οι πρόσθετοι παράγοντες μετατρέπονται σε ποινή κόστους και προστίθενται στο βασικό κόστος για την παραγωγή ενός ενιαίου δείκτη που ενσωματώνει όλους τους σχετικούς παράγοντες. Το GCAM παρέχει ένα ευέλικτο σύστημα για τον καθορισμό των λειτουργιών επιλογής κατά το χρόνο εκτέλεσης σε μια βάση ανά τομέα. Η ικανότητα μιας εναλλακτικής επιλογής είναι ένα άθροισμα δύο συστατικών, ένα που καθορίζεται εξ ολοκλήρου από τον δείκτη επιλογής (π.χ. κόστος), και ένα άλλο που καθορίζεται από τους παράγοντες που δεν συλλαμβάνονται στο πρότυπο, που ορίζεται ως «shareweight». Η παρακάτω εξίσωση δείχνει πώς το μερίδιο αγοράς των εναλλακτικών επιλογών (i, j) στο GCAM εξαρτάται τόσο από την τιμή ή το κόστος (p) όσο και από την προκαθορισμένη shareweight (α) κάθε εναλλακτικής. Οι τιμές του συνόλου των shareweights, σε κάθε αγορά, εκτιμώνται συγκρίνοντας το κόστος και το μερίδιο αγοράς κάθε εναλλακτικής λύσης κατά το έτος βάσης.

$$\frac{s_i}{s_j} = \frac{a_i}{a_j}\left(\frac{p_i}{p_j}\right)^{\gamma}$$

3. Εφαρμογή

3.1 Περιγραφή του προβλήματος

Το ξέσπασμα της πανδημίας Covid19 στα τέλη του 2019 και καθ'όλη τη διάρκεια του 2020 έχει δημιουργήσει σημαντικές προκλήσεις για τη δημόσια υγεία, καθώς και για τις ιατρικές και ερευνητικές κοινότητες στις προσπάθειές τους να καταπολεμήσουν τις επιπτώσεις της παγκόσμιας κρίσης στην υγεία (Fauci, Lane, & Redfield, 2020). Με πολλά κράτη να αντιμετωπίζουν υποχρεωτικούς περιορισμούς και lockdown για τον περιορισμό της μετάδοσης του ιού, οι οικονομικές δραστηριότητες σταμάτησαν απότομα, προκαλώντας μια επικείμενη οικονομική ύφεση με πολλαπλές κοινωνικοοικονομικές επιπτώσεις (Nicola, 2020). Η πανδημία εμφανίστηκε εν μέσω της μεγάλης διαρκούς απειλής της κλιματικής αλλαγής, ολοκληρώνοντας το τριπλό μέτωπο των προκλήσεων που πρέπει να αντιμετωπίσει η ανθρωπότητα τα επόμενα χρόνια: κρίσεις υγείας, κρίση οικονομική και περιβαλλοντική. Παρόλο που δεν υπάρχει άμεση αιτιότητα μεταξύ της εμφάνισης του Covid19 και της κλιματικής αλλαγής, η ανθρώπινη ανάπτυξη και οι περιβαλλοντικές κακές πρακτικές, όπως η αποψίλωση των δασών, έχει βρεθεί να είναι η ρίζα των πανδημιών, λόγω της προκαλούμενης απώλειας βιοποικιλότητας και της καταστροφής των φυσικών βιοτόπων. Επίσης, είναι πολύ απίθανο οι βραχυπρόθεσμες θετικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις που παρατηρήθηκαν λόγω της αλλαγής του παγκόσμιου τρόπου ζωής, όπως η μειωμένη κατανάλωση άνθρακα και η μείωση των εκπομπών CO2, να διατηρηθούν στο μέλλον (Saadat, Hussain, & Rawtani, 2020). Με τις εκπομπές που αναμένεται να ανακάμψουν πλήρως μετά την κρίση (Nikas A. e., 2020) και την αναμενόμενη αύξηση της συχνότητας εμφάνισης πανδημιών, εκτός αν αντιστραφεί η απώλεια βιοποικιλότητας, οι δύο απειλές αντιμετωπίζουν σημαντικές κοινές προκλήσεις που πρέπει και να αντιμετωπιστούν από κοινού (Nikas A. , Perspective of comprehensive and comprehensible multi-model energy and climate science in Europe. ., 2021).

Στο μετα-πανδημικό μέλλον, οι περισσότερες επιχειρήσεις θα πρέπει να αλλάξουν τα μοντέλα τους σύμφωνα με την εταιρική κοινωνική ευθύνη, συμπεριλαμβανομένης της εισαγωγής πιο βιώσιμων πρακτικών, εάν θέλουν να επιβιώσουν (He & Harris, 2020). Η υποστήριξη από τα κράτη είναι ζωτικής σημασίας για τη διαδικασία. Στο Ηνωμένο Βασίλειο, σχεδόν 9 εκατομμύρια άτομα, που αποτελούν το ένα τέταρτο του εργατικού δυναμικού, εξαρτώνται οικονομικά από την κυβερνητική βοήθεια (Miles, Stedman, & Heald, 2020). Ταυτόχρονα, η Eurostat ανέφερε ότι το ποσοστό ανεργίας στην ΕΕ το Σεπτέμβριο του 2020 ήταν 7,5% ενώ το αντίστοιχο ποσοστό για τη ζώνη του ευρώ ήταν 8,3% (Eurostat, 2020). Αυτό μεταφράζεται σε 1.811 και 1.376 εκατομμύρια θέσεις εργασίας που χάθηκαν στην ΕΕ και τη ζώνη του ευρώ, αντίστοιχα, σε σύγκριση με τον Σεπτέμβριο του 2019, με την ανεργία να αναμένεται να αυξηθεί καθώς το δεύτερο κύμα οδηγεί σε περισσότερες απώλειες. Ωστόσο, βασική ανησυχία παραμένει το κατά πόσον

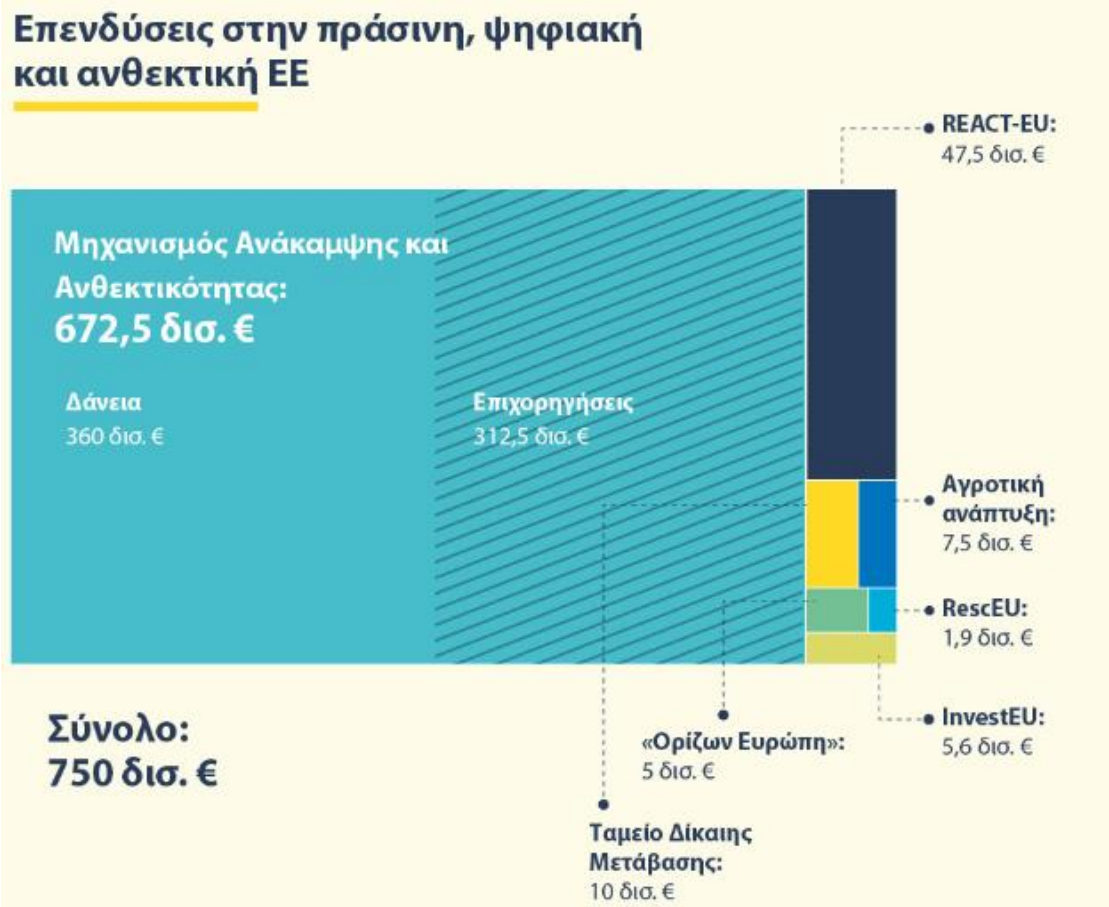
τα οικονομικά πακέτα θα επιταχύνουν την επίτευξη των κλιματικών στόχων ή θα μας εγκλωβίσουν στις επιλογές των ορυκτών καυσίμων.

Μέχρι στιγμής, η πανδημία Covid19 έχει καθυστερήσει τις βιώσιμες μεταβάσεις (IRENA, 2020). Η IRENA (International Renewable Energy Agency) αναφέρει ότι η πανδημική κρίση είχε ως αποτέλεσμα τόσο μόνιμες απώλειες θέσεων εργασίας λόγω ακυρώσεων έργων όσο και καθυστερήσεις στις αλυσίδες εφοδιασμού με βραχυπρόθεσμο αποτέλεσμα: το κλείσιμο ενός εργοστασίου στην Κίνα, που κυριαρχεί στην αλυσίδα τροφοδοσίας αιολικής ενέργειας, και το lockdown στον Ισημερινό, υπεύθυνου για σχεδόν 90 % της παγκόσμιας παραγωγής balsa που χρησιμοποιείται σε ανεμογεννήτριες, επηρέασε τη λειτουργία αλυσίδων εφοδιασμού, ιδίως την κατασκευή εξοπλισμού. Με απώλειες περισσότερων θέσεων εργασίας στον ενεργειακό τομέα, πέρα από τις 160.000 θέσεις εργασίας άνθρακα που ήδη διατρέχουν υψηλό κίνδυνο (Alves Dias et al., 2018), είναι επιτακτική η ανάγκη για μια βιώσιμη και δίκαιη μετάβαση που θα δημιουργήσει θέσεις εργασίας που θα στηρίζουν την οικογένεια. Στις ΗΠΑ, παρόλο που η Πράσινη Νέα Συμφωνία περιβάλλεται από σημαντικές πολιτικές αντιπαραθέσεις, η συζήτηση ξεκινά για τη δημιουργία βιώσιμων θέσεων εργασίας, με εκτιμήσεις ότι αναμένεται να δημιουργηθούν 18,3 εκατομμύρια επιπλέον θέσεις εργασίας, εκ των οποίων περισσότερες από 2 εκατομμύρια είναι «πράσινες» θέσεις εργασίας (Bezdek, 2020). Μια τέτοια μετάβαση θα απαιτήσει ένα προσεκτικά σχεδιασμένο σχέδιο για τη διαχείριση της μετακίνησης του εργατικού δυναμικού και των κεφαλαίων μεταξύ των διαφόρων τομέων (Claeys et al., 2019), καθώς αναμένεται ότι το 1,3% των θέσεων εργασίας στην ΕΕ θα ανακατανεμηθεί έως το 2050 (Fragkos, 2018). Ο τομέας των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας μπορεί να διαδραματίσει καθοριστικό ρόλο στη μετάβαση, τόσο άμεσα μέσω έργων ανανεώσιμων εγκαταστάσεων όσο και έμμεσα για την υποστήριξη άλλων τεχνολογιών, όπως το «πράσινο» υδρογόνο. Μια πρόσφατη μελέτη μοντελοποίησης έδειξε ότι, σύμφωνα με ένα τρέχον σενάριο πολιτικής, οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας μπορούν να δημιουργήσουν περισσότερες από 658.000 θέσεις εργασίας, ιδίως στους τομείς λειτουργίας, συντήρησης και εγκατάστασης. Ωστόσο, υπό το πρίσμα του Covid19, αυτές οι προσδοκίες θα πρέπει να επανεκτιμηθούν, δεδομένου ότι αυτοί οι υποτομείς επηρεάζονται περισσότερο από την πανδημία. Ένα άλλο ζήτημα που πρέπει επίσης να εξεταστεί είναι η ικανότητα όλων των κρατών μελών να δημιουργούν θέσεις εργασίας ΑΠΕ, καθώς τα αποτελέσματα της μελέτης δείχνουν συγκέντρωση αυτών των θέσεων εργασίας σε λίγες συγκεκριμένες χώρες (Ortega, del Río, Ruiz, Nijs, & Politis, 2020).

Για να αντιμετωπίσει αυτές τις προκλήσεις και να υποστηρίξει την οικονομική ανάκαμψη των κρατών-μελών από τις επιπτώσεις του Covid19, η ΕΕ κινητοποίησε χρηματοοικονομικούς πόρους στο πλαίσιο του μακροπρόθεσμου προϋπολογισμού 2021-2027. Όπως προέκυψε από τη διάσκεψη του Ευρωπαϊκού Συμβουλίου της 23ης Απριλίου 2020 και τα αντίστοιχα συμπεράσματα της συνόδου του Συμβουλίου της 21ης Ιουλίου 2020, τα διαθέσιμα κονδύλια για την οικονομική ανάκαμψη ανέρχονται

σε 2.364,3 δισεκατομμύρια ευρώ, όπου 1.074,3 δισεκατομμύρια ευρώ προέρχονται από το πολυετές δημοσιονομικό πλαίσιο (MMF) 2021-2027, 750 δισεκατομμύρια ευρώ αποτελούν το πρόγραμμα NextGenerationEU, που είναι προσαρμοσμένο στην καταπολέμηση του αντίκτυπου της πανδημίας, και 540 δισεκατομμύρια ευρώ είναι ήδη διαθέσιμα κεφάλαια από δίχτυα ασφαλείας για την υποστήριξη εργαζομένων, επιχειρήσεων και κρατών-μελών (EuropeanCouncil, COVID-19: the EU's response to the economic fallout., 2020) Με βάση τις πρόσφατες δεσμεύσεις, το 30% των προϋπολογισμών MMF και NextGenerationEU, οι οποίοι από κοινού ανέρχονται σε 1,8 τρισεκατομμύρια ευρώ, θα χρησιμοποιηθούν για την επίτευξη των στόχων για το κλίμα το 2030. Αυτό σημαίνει ότι έως το 2027 αναμένεται πως περισσότερα από μισό τρισεκατομμύριο ευρώ θα εισρεύσουν προς μια «πράσινη» μετάβαση.

Πιο αναλυτικά, το NextGenerationEU είναι ένα χρηματοοικονομικό μέσο που στοχεύει στη συγκέντρωση 750 δισεκατομμυρίων ευρώ από την κεφαλαιαγορά για τη δημιουργία της διευκόλυνσης ανάκαμψης και ανθεκτικότητας (RRF) (672,5 δισεκατομμύρια ευρώ) και τη μεταφορά πρόσθετων κεφαλαίων σε άλλα προγράμματα της ΕΕ, όπως το ReactEU (47,5 δισεκατομμύρια ευρώ), Horizon Europe (5 δισεκατομμύρια ευρώ), InvestEU (5,6 δισεκατομμύρια ευρώ), αγροτική ανάπτυξη (7,5 δισεκατομμύρια ευρώ), το Just Transition Fund (JTF) (10 δισεκατομμύρια ευρώ) και RescEU (1,9 δισεκατομμύρια ευρώ). Το RRF είναι ο κεντρικός μηχανισμός του NextGenerationEU, που στοχεύει να παρέχει στα κράτη-μέλη επιχορηγήσεις και δάνεια για τη στήριξη επενδύσεων και μεταρρυθμίσεων για την ανάκαμψη από την πανδημία. Συγκεκριμένα, 360 δισεκατομμύρια ευρώ θα είναι διαθέσιμα για δάνεια και 312,5 ευρώ θα προσφέρονται σε επιχορηγήσεις, τα οποία σε συνδυασμό με τα προηγούμενα ποσά αυξάνουν τα συνολικά διαθέσιμα κεφάλαια σε 390 δισεκατομμύρια ευρώ (EuropeanCouncil, 2020) (Εικόνα 2). Για να αποκτήσουν πρόσβαση σε αυτά τα κεφάλαια, τα κράτη-μέλη πρέπει να υποβάλουν εθνικά σχέδια ανάκαμψης και ανθεκτικότητας έως τον Απρίλιο του 2021, τα οποία θα αξιολογηθούν με βάση την ολοκλήρωση των επενδύσεων προς τον «πράσινο» και τον ψηφιακό μετασχηματισμό. Η Επιτροπή αναμένει από αυτά τα σχέδια να διαθέσουν τουλάχιστον 37% και 20% των κεφαλαίων για «πράσινες» και ψηφιακές επενδύσεις - μεταρρυθμίσεις, αντίστοιχα.



ΕΙΚΟΝΑ 2 ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΕΠΕΝΔΥΣΕΩΝ ΕΕ (EUROPEANCOUNCIL, 2020).

Ειδικά για την πράσινη μετάβαση, αυτές οι πρωτοβουλίες θα πρέπει να ευθυγραμμιστούν με τον επικαιροποιημένο στόχο της Ευρωπαϊκής Πράσινης Συμφωνίας για μείωση των εκπομπών κατά 55% έως το 2030, η οποία μεταφράζεται στην ενσωμάτωση του 40% των 500GW ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Απαιτείται έως το 2030, η εγκατάσταση ισχύος 6 GW συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας, η παραγωγή και μεταφορά 1 εκατομμυρίου τόνων ανανεώσιμου υδρογόνου σε ολόκληρη την ΕΕ, διπλασιάζοντας το ρυθμό ανανέωσης, καθώς και την κατασκευή του πρώτου από τα τρία εκατομμύρια σημεία φόρτισης έως το 2030 και τους μισούς από τους 1.000 σταθμούς υδρογόνου που χρειάζονται (EuropeanCommission, 2020). Λαμβάνοντας υπόψη αυτές τις πιστώσεις, αναμένεται ότι 250 δισεκατομμύρια ευρώ θα χρησιμοποιηθούν για τη στήριξη επενδύσεων σε καθαρή ενέργεια και ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, ενεργειακή απόδοση κτιρίων και βιώσιμες μεταφορές. Ωστόσο, η λεπτομερής κατανομή αυτού του προϋπολογισμού στους τρεις στόχους εξαρτάται από την ιεράρχηση του σχεδίου κάθε κράτους μέλους, το οποίο αναμένεται το αργότερο έως τον Απρίλιο του 2021.

Στο πλαίσιο των κοινωνικών προκλήσεων που ανακύπτουν από τον Covid19, η ΕΕ δεσμεύεται για οικονομική και βιώσιμη ανάκαμψη. Η παρούσα διπλωματική εργασία στοχεύει στη βελτιστοποίηση του αντίκτυπου του προτεινόμενου δημοσιονομικού

προγράμματος και του προϋπολογισμού που διατίθεται για την «πράσινη» μετάβαση όσον αφορά τις θέσεις εργασίας που δημιουργούνται στον ενεργειακό τομέα και τη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου. Για το σκοπό αυτό, εκτελείται μια εκτεταμένη βιβλιογραφική ανασκόπηση για τον προσδιορισμό του αντίκτυπου των βιώσιμων τεχνολογιών όσον αφορά την απασχόληση και στη συνέχεια το μοντέλο GCAM χρησιμοποιείται για την αξιολόγηση διαφορετικών επιπέδων επιδότησης σε αυτές τις τεχνολογίες. Τα αποτελέσματα τροφοδοτούνται σε ανάλυση χαρτοφυλακίου με βάση τη μέθοδο AUGMECON-R και μια προσομοίωση Monte Carlo για τον χειρισμό της αβεβαιότητας, προκειμένου να εντοπιστούν οι βέλτιστες στρατηγικές για τον προβλεπόμενο προϋπολογισμό, που μεγιστοποιούν τη δημιουργία νέων θέσεων εργασίας και τη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου. Αξίζει να τονιστεί ότι με βάση έναν προσωρινό προϋπολογισμό 100-200 δισεκατομμυρίων ευρώ, περίπου 230-432 χιλιάδες νέες θέσεις εργασίας μπορούν να δημιουργηθούν έως το 2025 και 50-233Mt CO2e μπορούν να μειωθούν έως το 2030 με ένα τρέχον σενάριο πολιτικών, το οποίο θα φέρει τους στόχους της ΕΕ ελαφρώς πιο κοντά με σημαντικά οφέλη. Αυτά τα αποτελέσματα βασίζονται κυρίως σε επενδύσεις σε βιοκαύσιμα, αιολική ενέργεια και βιοαέριο και σε μικρότερες ποσότητες γεωθερμικής ενέργειας, όπως θα δείξουμε και στη συνέχεια.

3.2 Μέθοδοι

Χρησιμοποιώντας τις βασικές αρχές των μεθόδων που προτείνονται στα προηγούμενα κεφάλαια, εδώ παρουσιάζεται μια ολοκληρωμένη μελέτη μοντελοποίησης και αξιολόγησης χαρτοφυλακίου δύο επιπέδων, για να διερευνηθεί πώς μπορεί να κατανεμηθεί καλύτερα μέρος των ανακοινωθέντων σχεδίων ανάκαμψης σε τεχνολογίες ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Τα χαρτοφυλάκια ανανεώσιμων πηγών ενέργειας βελτιστοποιούνται με στόχο τη μεγιστοποίηση των μειώσεων των εκπομπών, ενώ ταυτόχρονα μεγιστοποιούν τα οφέλη απασχόλησης στον ενεργειακό τομέα.

Πρώτον, το μοντέλο GCAM εκτελείται συμπληρωματικά ενός σεναρίου τρεχόντων πολιτικών όπως παρουσιάζεται στο ερευνητικό έργο PARIS REINFORCE, που σημαίνει ότι τα αποτελέσματα πρέπει να ερμηνευτούν επιπλέον των καθορισμένων μέτρων και στόχων. Σε αυτό το στάδιο, λαμβάνουμε αποτελέσματα από το GCAM για διαφορετικά επίπεδα επιδοτήσεων σε οκτώ βασικές τεχνολογίες, συμπεριλαμβανομένων των βιοκαυσίμων, της βιομάζας, της συμπυκνωμένης ηλιακής ενέργειας - CSP, της γεωθερμίας, των ηλιακών φωτοβολταϊκών, των ηλεκτρικών οχημάτων, της αιολικής ενέργειας και του βιοαερίου, σχετικά με ένα σύνολο τομέων όπως η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, οι μεταφορές, τα κτίρια κ.λπ. Δεδομένου ότι τα κεφάλαια ανάκτησης και ανθεκτικότητας πρέπει να δαπανηθούν έως το 2024, θεωρείται ότι οι διάφορες επιδοτήσεις εφαρμόζονται μεταξύ 2021 και 2025 και επηρεάζουν το συνολικό κόστος κεφαλαίου των ενεργειακών τεχνολογιών. Για τα τις εκπομπές ρύπων, υπολογίζουμε τις σωρευτικές επιπτώσεις εκπομπών από το 2021 έως το 2030, ανακτώντας τα αποτελέσματα του GCAM το 2030. Θεωρούμε ότι οι πράσινες

επενδύσεις συμβάλλουν στη μείωση των εκπομπών μακροπρόθεσμα, οδηγώντας έτσι σε πρόσθετες μειώσεις των αθροιστικών εκπομπών έως το 2030, ενώ οι επιδοτήσεις που παρέχονται το 2021-2025 έχουν επιπτώσεις στην απασχόληση που είναι εμφανείς βραχυπρόθεσμα (2025).

Για να υπολογίσουμε τις θέσεις εργασίας που δημιουργούνται ανά επιδότηση τεχνολογίας, πραγματοποιούμε βιβλιογραφική ανασκόπηση για να προσδιορίσουμε τον αριθμό των θέσεων εργασίας ανά ενέργεια της παραγόμενης μονάδας (ανάλογα με την τεχνολογία). Με βάση την προσομοίωση GCAM, μπορούμε στη συνέχεια να υπολογίσουμε τον καθαρό αντίκτυπο των θέσεων εργασίας σε σύγκριση με το σενάριο αναφοράς (CP), ανάλογα με την αύξηση ή τη μείωση της ζήτησης για κάθε τεχνολογία. Οι παραδοχές που χρησιμοποιούνται στην ανάλυση παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.

Οι θέσεις εργασίας και η ενέργεια που παράγεται (είτε TWh είτε TOE / kTOE) για αιολική ενέργεια, φωτοβολταικά - PV, βιοαέριο και βιοκαύσιμα προέρχονται απευθείας από το (EurObserveR, 2019), το οποίο μας επέτρεψε να υπολογίσουμε τις θέσεις εργασίας ανά μονάδα ενεργειακής μέτρησης που χρησιμοποιείται στο GCAM. Για την τεχνολογία της συμπυκνωμένης ηλιακής ενέργειας - CSP, εστιάσαμε σε δεδομένα από την Ισπανία για την ηλιακή θερμική ενέργεια, καθώς τα περισσότερα σχετικά ευρωπαϊκά έργα βρίσκονται στην Ισπανία. Σε αυτήν την περίπτωση, οι θέσεις εργασίας προέρχονται από τον EurObserver (2020) και τα ενεργειακά δεδομένα από τον IEA (2020), ενώ τα δύο μεγέθη αντιστοιχούν στην Ισπανία. Μια παρόμοια προσέγγιση ακολουθήθηκε για τη γεωθερμική ενέργεια, για την οποία χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα για την Ιταλία, δεδομένου ότι το μεγαλύτερο μέρος της γεωθερμικής παραγωγής της ΕΕ βρίσκεται στην Ιταλία.

Για τη βιομάζα, το φυσικό αέριο και τον άνθρακα, εξετάσαμε τη βιβλιογραφία για να προσδιορίσουμε τη μέθοδο μετατροπής, τον παράγοντα χωρητικότητας και τη διάρκεια ζωής των μονάδων από τους (Wei, 2010) και παράγοντες απασχόλησης για τον κατασκευαστικό τομέα και την βιομηχανία από τους Fragkos and Paroussos (2018) και (Rutovitz, 2015) και, στη συνέχεια, υπολογίσαμε το απαιτούμενο μέγεθος "εργασίες ανά παραγόμενη μονάδα ενέργειας". Θεωρήσαμε ότι ο άνθρακας, το φυσικό αέριο και το πετρέλαιο έχουν παρόμοια διάρκεια ζωής (40 χρόνια) (Papapostolou, 2017), υποθέτοντας ότι το πετρέλαιο και το φυσικό αέριο μοιράζονται ένα παρόμοιο επίπεδο θέσεων εργασίας που απαιτείται για την παραγωγή μιας μονάδας ενέργειας, όπως υποδηλώνεται από τους Fragkos και Paroussos (2018).

Μια τεχνολογία που λείπει από τον πίνακα που εξετάστηκε σε αυτήν τη μελέτη είναι τα ηλεκτρικά οχήματα (EV): εργασίες που σχετίζονται με την υποδομή φόρτισης δεν ήταν διαθέσιμες τη στιγμή της ανάλυσης. Το αποτέλεσμα των επιδοτήσεων ηλεκτρικών οχημάτων στις θέσεις εργασίας είναι, επομένως, μόνο η καθαρή διαφορά που προκαλείται σε ολόκληρο το σύστημα λόγω της διείσδυσης περισσότερων EV.

	Θέσεις εργασίας	**Παραγωγή Ηλεκτρικής ενέργειας (TWh)**	**Θέσεις εργασίας /TWh παραγόμενης ενέργειας**	**Πηγή**
Αιολική Ενέργεια	179,062	377.4	**861.9**	(EurObserveR, 2019)
PV	114,679.7	122.9	**956.3**	(EurObserveR, 2019)
CSP	8,200	4.9	**1,683.8**	(EurObserveR, 2019) (IEA, 2020)
Γεωθερμία	2,200	6.1	**360.4**	(EurObserveR, 2019) (IEA, 2020)
Βιομάζα	-	-	**218.2**	(Wei et al., 2010; Fragkos and Paroussos, 2018; Rutovitz et al., 2015)
Πυρηνική ενέργεια	1,133,400	822.3	**1,378**	(IEA, 2020) ((WNN), 2019)
Άνθρακας	-	-	**132.9**	(Wei et al., 2010; Fragkos and Paroussos, 2018; Rutovitz et al., 2015)
Πετρέλαιο	-	-	**59.3**	(Wei et al., 2010; Fragkos and Paroussos, 2018; Rutovitz et al., 2015; Papapostolou et al., 2017),
Φυσικό Αέριο	-	-	**59.3**	(Wei et al., 2010; Fragkos and Paroussos, 2018; Rutovitz et al., 2015)
Βιοαέριο	68,800	16,838.7 (kTOE)	**4.08 (θέσεις εργασίας/kTOE)**	(EurObserveR, 2019)
Βιοκαύσιμα	248,200	16,658.2 (TOE κατανάλωσης για μεταφορές)	**14.9 (θέσεις εργασίας/TOE κατανάλωσης για μεταφορές)**	(EurObserveR, 2019)

ΠΙΝΑΚΑΣ 1 ΘΕΣΕΙΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ ΑΝΑ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ

Σε μια απλοποιημένη εφαρμογή της μεθοδολογίας που παρουσιάζεται στους (Forouli A. e., 2020), τα αποτελέσματα της ανάλυσης GCAM εντάσσονται σε ένα μοντέλο βελτιστοποίησης χαρτοφυλακίου. Το πρόβλημα βελτιστοποίησης διαμορφώνεται στο GAMS και επιλύεται με τη χρήση ενός μοντέλου ανάλυσης χαρτοφυλακίου το οποίο μοντελοποιείται μέσω της μεθόδου AUGMECON-R. Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, τα

χαρτοφυλάκια αποτελούνται από οποιεσδήποτε οκτώ ανανεώσιμες τεχνολογίες (βιοκαύσιμα, βιομάζα, CSP, γεωθερμικά, ηλιακά φωτοβολταϊκά, ηλεκτρικά οχήματα, αιολικά και βιοαέριο) και αξιολογούνται με βάση την απόδοσή τους σε σχέση με τη συμβολή τους στη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου και τις θετικές συνέπειες που μπορεί να έχουν στη δημιουργία θέσεων εργασίας σε διαφορετικά επίπεδα επιδοτήσεων, σχηματίζοντας δύο αντικειμενικές συναρτήσεις:

$$\text{maximise } Z_1 = \sum_{i=1} \sum_{j=1} \left(\text{GHGred}_{i,j} \cdot b_{i,j} \right) \qquad \forall i, j$$

$$\text{maximise } Z_2 = \sum_{i=1} \sum_{j=1} \left(\text{JobsCreat}_{i,j} \cdot b_{i,j} \right) \qquad \forall i, j$$

όπου:

$\text{GHGred}_{i,j}$: μείωση εκπομπών που επιτεύχθηκε με την τεχνολογία i βάσει της επιλογής προϋπολογισμού j

$\text{JobsCreat}_{i,j}$: επίπτωση στην απασχόληση που επιτυγχάνεται με την τεχνολογία i βάσει της επιλογής προϋπολογισμού j

$i = 1, 2, \dots, 8$: για τις οκτώ τεχνολογίες ανανεώσιμων που εξετάζονται

$j = 1, 2, \dots, 10$: για τα δέκα επίπεδα επιδοτήσεων που εξετάστηκαν, εφαρμοζόμενα ως μείωση του αρχικού επενδυτικού κόστους κάθε τεχνολογίας

$b_{i,j}$: δυαδική μεταβλητή απόφασης της οποίας η αξία είναι ίση με 1, εάν η τεχνολογία i βάσει της επιλογής προϋπολογισμού j πληροί τα κριτήρια που τίθενται και 0 διαφορετικά.

Σημειώνεται εδώ ότι οι συντελεστές των αντικειμενικών συναρτήσεων, δηλαδή οι $\text{GHGred}_{i,j}$ και $\text{JobsCreat}_{i,j}$ υπολογίζονται με βάση τα αποτελέσματα του μοντέλου GCAM.

Για να περιορίσουμε την επιδότηση των τεχνολογιών σε ένα ποσό που να είναι σύμφωνο με την τρέχουσα πολιτική της ΕΕ, ακολουθήσαμε την προτεινόμενη ανάλυση για το σχέδιο ανάκαμψης από την Covid19, εξετάζοντας ποιο μέρος του RRF θα μπορούσε (θεωρητικά σε αυτό το σημείο και πριν από τα πραγματικά εθνικά αιτήματα που αναμένονται μέχρι τον Απρίλιο του 2021) να χρησιμοποιηθεί για επιδοτήσεις ενεργειακής τεχνολογίας και καταλήξαμε σε προϋπολογισμούς μεταξύ εκατό και διακοσίων δισεκατομμυρίων ευρώ για τα επόμενα πέντε χρόνια. Ο συλλογισμός πίσω από αυτούς τους υπολογισμούς παρατίθεται στο κεφάλαιο 4.1. Βάσει αυτής της ανάλυσης, επιλέξαμε τρία ενδεικτικά επίπεδα προϋπολογισμού που κυμαίνονται μεταξύ των εκατό και διακοσίων δισεκατομμυρίων (100, 150 και 200 δισεκατομμύρια ευρώ) ως περιορισμούς για τη βελτιστοποίηση του χαρτοφυλακίου και λύσαμε τρία προβλήματα βελτιστοποίησης, ένα για κάθε περιορισμό του προϋπολογισμού.

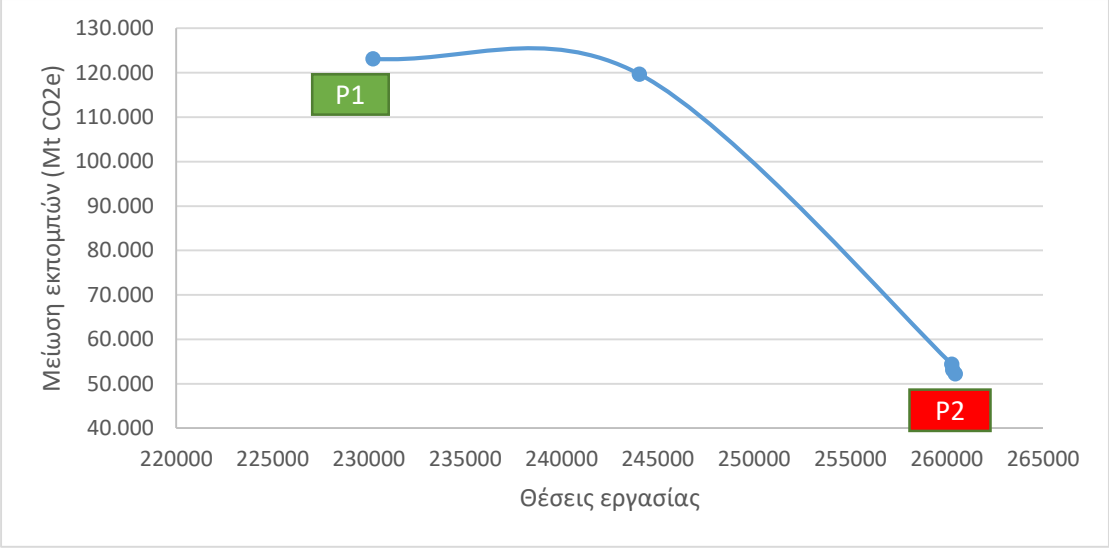
Ως τελευταίο βήμα, και για να αντιμετωπιστεί η εγγενής αβεβαιότητα που χαρακτηρίζει τις βασικές παραμέτρους του μοντέλου, δηλαδή τη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου και τον αντίκτυπο στις θέσεις εργασίας, πραγματοποιείται προσομοίωση Monte Carlo σε εύρος συν πλην 5% και για τις δύο παραμέτρους, ανά πακέτο επιδοτήσεων. Η προσομοίωση Monte Carlo εκτελείται επαναληπτικά 1.000 φορές για καθεμία από τις τρεις μοντελοποιήσεις ανάλυσης χαρτοφυλακίου. Με αυτόν τον τρόπο, μπορεί να αξιολογηθεί η ευστάθεια των ληφθέντων βέλτιστων χαρτοφυλακίων ενεργειακών τεχνολογιών, λαμβάνοντας υπόψη ότι η αβεβαιότητα στις παραμέτρους του μοντέλου είναι στοχαστικής φύσης. Περισσότερα για την προσέγγιση αξιολόγησης αντοχής που χρησιμοποιείται σε αυτή τη μελέτη μπορείτε να βρείτε στους (Forouli, Doukas, Nikas, Sampedro, & Van de Ven, 2019).

3.3 Αποτελέσματα

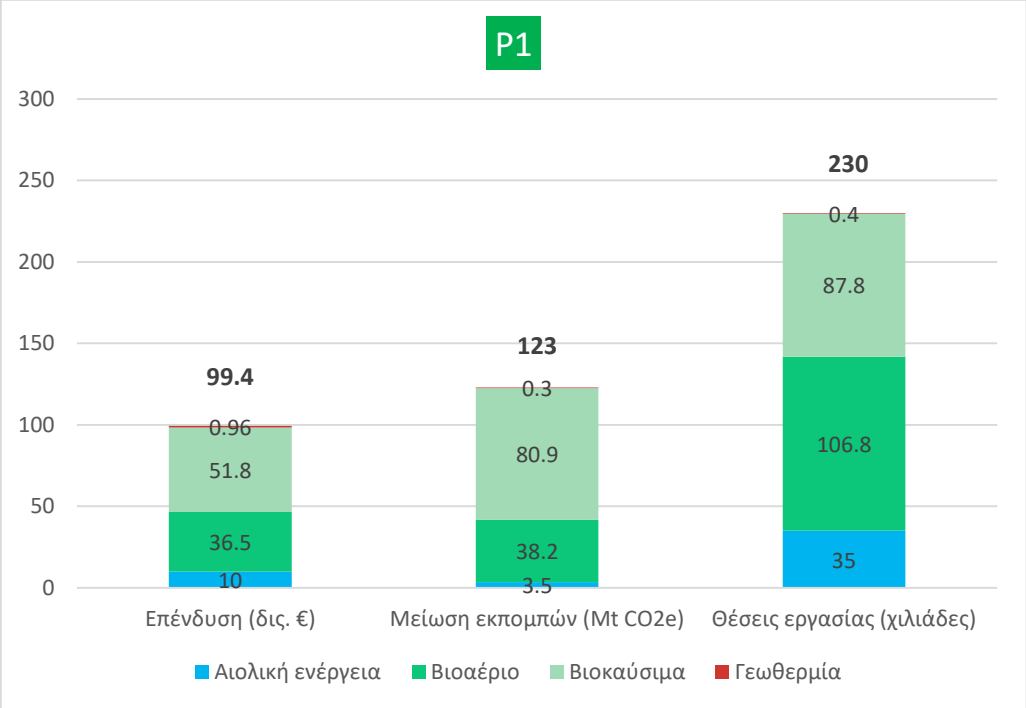
Στη συνέχεια, παρουσιάζονται τα βέλτιστα χαρτοφυλάκια για τα τρία εξεταζόμενα ύψη προϋπολογισμού, που περιλαμβάνουν και πληροφορίες ευστάθειας των λύσεων. Η ανάλυση δείχνει ότι, ανάλογα με τον προϋπολογισμό, τα αποτελέσματα αλλάζουν σημαντικά όσο αφορά τη ποσοστιαία συμμετοχής των τεχνολογιών εντός των χαρτοφυλακίων, αλλά όχι ουσιαστικά όσον αφορά την ποιοτική σύνθεση αυτών.

3.3.1 Χαρτοφυλάκια προϋπολογισμού €100 δισεκατομμυρίων

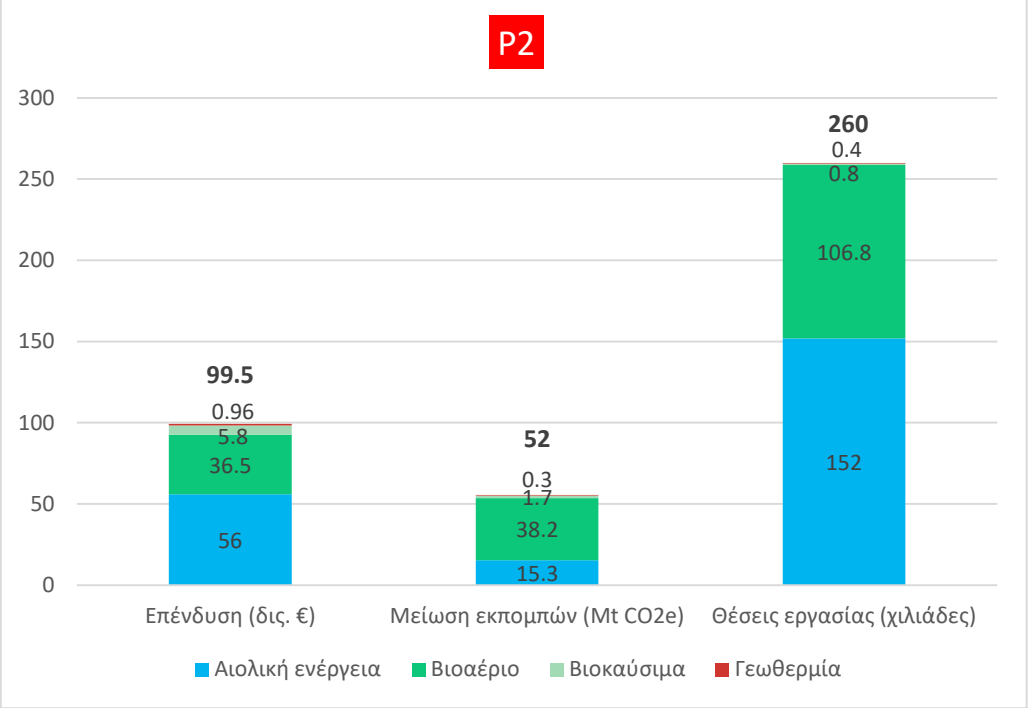
Το τελικό σύνολο βέλτιστων χαρτοφυλακίων για την περίπτωση που θεωρείται περιορισμός στα διαθέσιμα κεφάλαια ύψους €100 δισεκατομμυρίων φαίνεται στις Εικόνες 3-5. Το μέγιστο αποτέλεσμα στην απασχόληση για προϋπολογισμό 100 δισεκατομμυρίων ευρώ είναι 260 χιλιάδες θέσεις εργασίας, ενώ η βέλτιστη απόδοση στη μείωση εκπομπών είναι μείωση ίση με 123 MtCO2e. Είναι σημαντικό να σημειωθεί εδώ το πώς οι τεχνολογίες που συνθέτουν τα βέλτιστα χαρτοφυλάκια συμβάλλουν σε αυτούς τους στόχους. Για το λόγο αυτό, επιλέγουμε δύο ενδεικτικά χαρτοφυλάκια, ένα που συμβάλλει κυρίως στη μείωση των εκπομπών (P1) και ένα άλλο με υψηλότερο αντίκτυπο για την ενίσχυση της απασχόλησης (P2). Η ανάλυση δείχνει ότι τα βιοκαύσιμα, τα αιολικά, το βιοαέριο και οι γεωθερμικές επιδοτήσεις κυριαρχούν στα χαρτοφυλάκια. Η αποσύνθεση των χαρτοφυλακίων P1 και P2 αποκαλύπτει επίσης τη δυναμική της ανάλυσης και τις πιο δραστικές αντισταθμίσεις, οι οποίες στη συνέχεια επιβεβαιώνονται και για τους άλλους υπό εξέταση προϋπολογισμούς: χαρτοφυλάκια με ισχυρή παρουσία των βιοκαυσίμων μπορούν να μειώσουν τις εκπομπές περαιτέρω σε σύγκριση με άλλες τεχνολογίες, ενώ τα χαρτοφυλάκια που βασίζονται στα αιολικά μπορούν να έχουν τον μεγαλύτερο θετικό αντίκτυπο στην απασχόληση.



ΕΙΚΟΝΑ 3 ΜΕΤΩΠΟ ΒΕΛΤΙΣΤΩΝ ΧΑΡΤΟΦΥΛΑΚΙΩΝ (€100 ΔΙΣ)

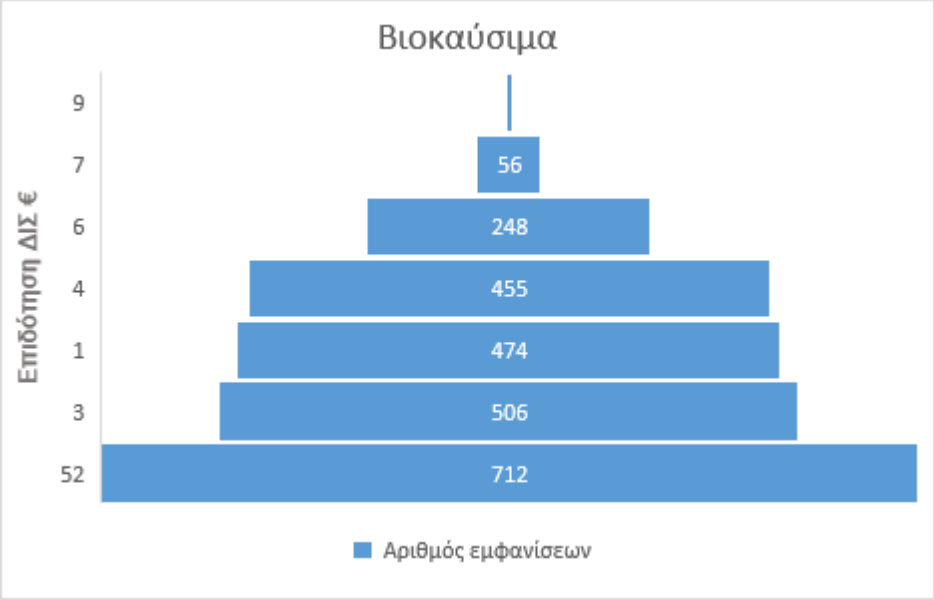


ΕΙΚΟΝΑ 4 ΣΥΝΘΕΣΗ ΤΟΥ ΒΕΛΤΙΣΤΟΥ ΧΑΡΤΟΦΥΛΑΚΙΟΥ P1 (€100 ΔΙΣ)



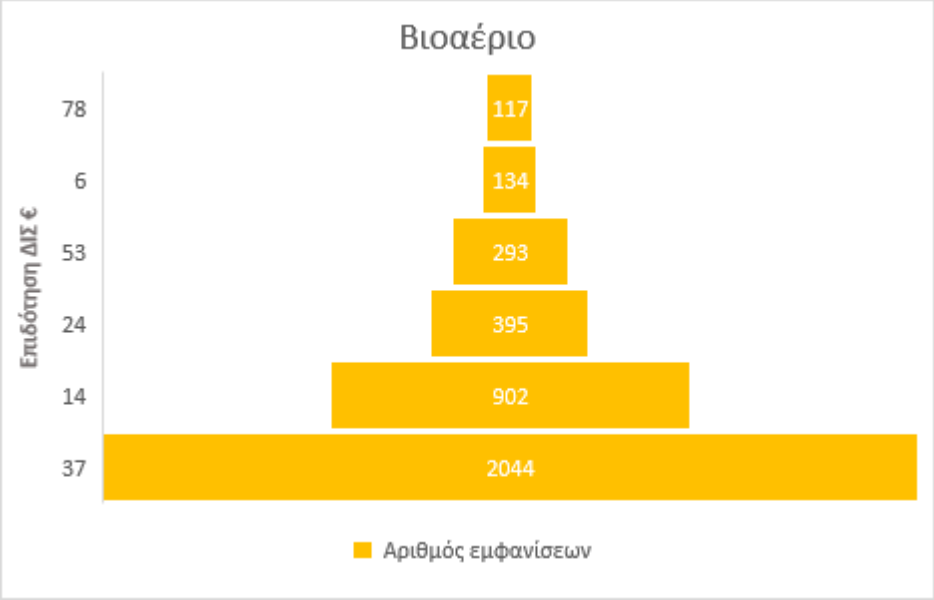
ΕΙΚΟΝΑ 5 ΣΥΝΘΕΣΗ ΤΟΥ ΒΕΛΤΙΣΤΟΥ ΧΑΡΤΟΦΥΛΑΚΙΟΥ P2 (€100 ΔΙΣ)

Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων Μόντε Κάρλο παρέχουν περαιτέρω πληροφορίες για τη συχνότητα συμμετοχής των τεχνολογιών στα βέλτιστα χαρτοφυλάκια. Στις Εικόνες 6 έως 11, βλέπουμε τα επίπεδα επιδοτήσεων που επιτυγχάνει κάθε τεχνολογία μεταξύ πολλαπλών επαναλήψεων Μόντε Κάρλο. Επιβεβαιώνεται ότι οι πιο συχνές τεχνολογίες είναι αιολικά, βιοαέριο, βιοκαύσιμα και γεωθερμία, αν και στις περισσότερες περιπτώσεις η επιδότηση στη γεωθερμική ενέργεια είναι περιορισμένη. Σημειώνεται, επίσης, ότι σε ορισμένες περιπτώσεις στο πλαίσιο του φάσματος της αβεβαιότητας που εξετάζεται, επενδύεται και ένας μειωμένος προϋπολογισμός στη συμπυκνωμένη ηλιακή ενέργεια - CSP. Τα ηλιακά φωτοβολταϊκά, τα ηλεκτρικά οχήματα και η βιομάζα απουσιάζουν από (σχεδόν) όλα τα χαρτοφυλάκια. Τα κυρίαρχα επίπεδα επιδότησης για τις τεχνολογίες που εμφανίζουν υψηλότερο δυναμικό, δηλαδή για την αιολική ενέργεια, τα βιοκαύσιμα και το βιοαέριο, είναι 56, 52 και 37 δισεκατομμύρια ευρώ, αντίστοιχα.

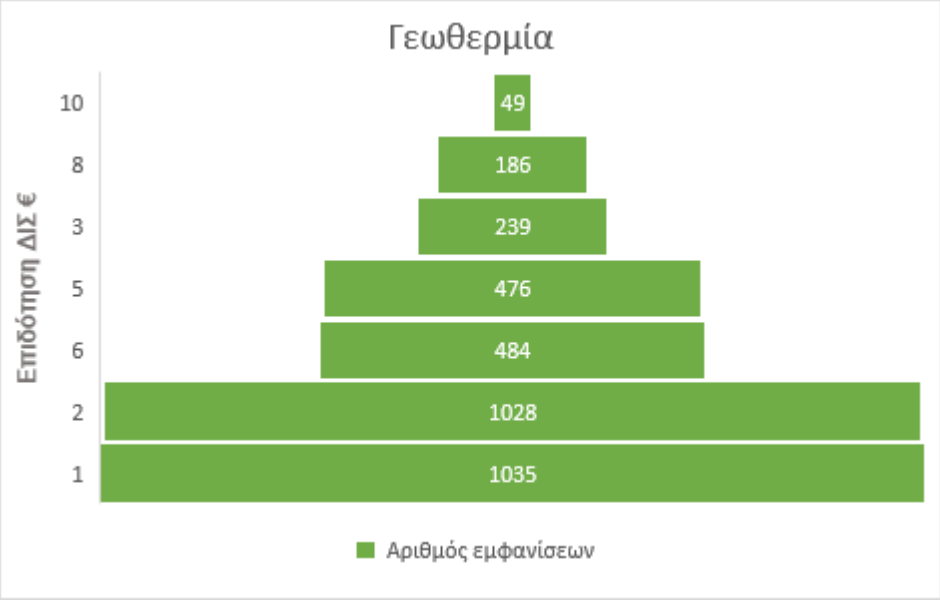


ΕΙΚΟΝΑ 6 ΣΥΜΜΕΤΟΧΗ ΒΙΟΚΑΥΣΙΜΩΝ ΣΤΑ ΒΕΛΤΙΣΤΑ ΧΑΡΤΟΦΥΛΑΚΙΑ ΚΑΤΑ ΤΙΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΙΣ MONTE CARLO (€100 ΔΙΣ)

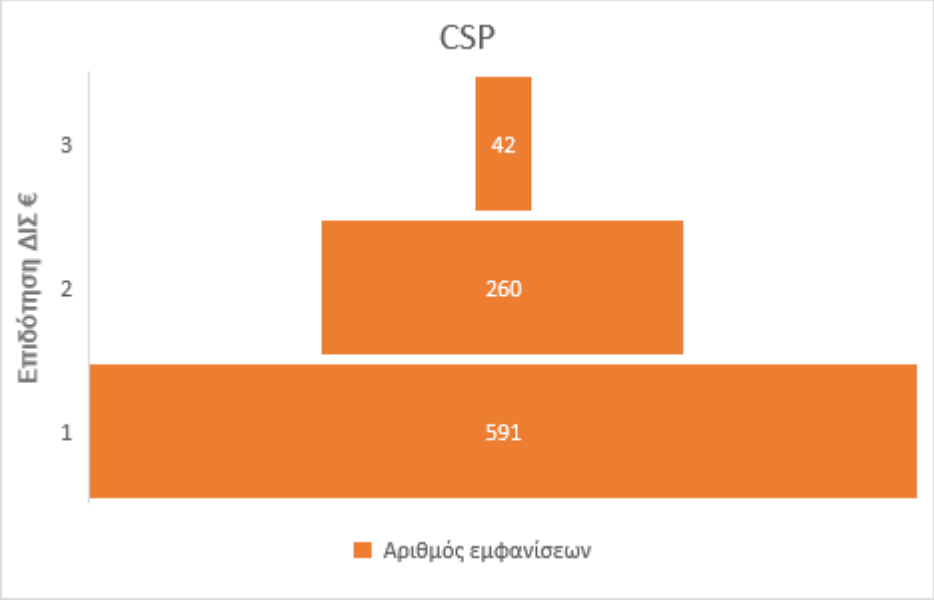
ΕΙΚΟΝΑ 7 ΣΥΜΜΕΤΟΧΗ ΑΙΟΛΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΤΑ ΒΕΛΤΙΣΤΑ ΧΑΡΤΟΦΥΛΑΚΙΑ ΚΑΤΑ ΤΙΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΙΣ MONTE CARLO (€100 ΔΙΣ)



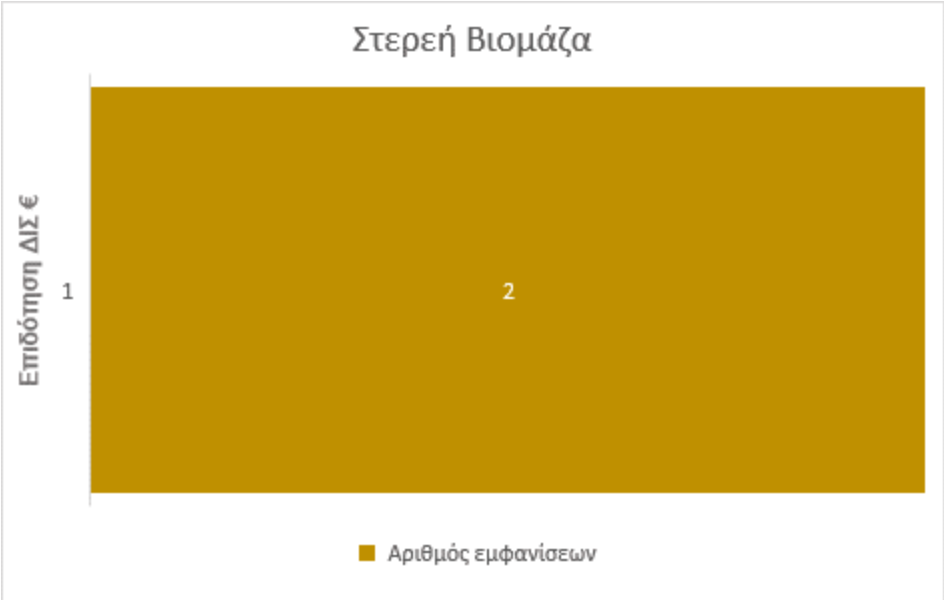
ΕΙΚΟΝΑ 8 ΣΥΜΜΕΤΟΧΗ ΒΙΟΑΕΡΙΟΥ ΣΤΑ ΒΕΛΤΙΣΤΑ ΧΑΡΤΟΦΥΛΑΚΙΑ ΚΑΤΑ ΤΙΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΙΣ MONTE CARLO (€100 ΔΙΣ)



ΕΙΚΟΝΑ 9 ΣΥΜΜΕΤΟΧΗ ΓΕΩΘΕΡΜΙΑΣ ΣΤΑ ΒΕΛΤΙΣΤΑ ΧΑΡΤΟΦΥΛΑΚΙΑ ΚΑΤΑ ΤΙΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΙΣ MONTE CARLO (€100 ΔΙΣ)



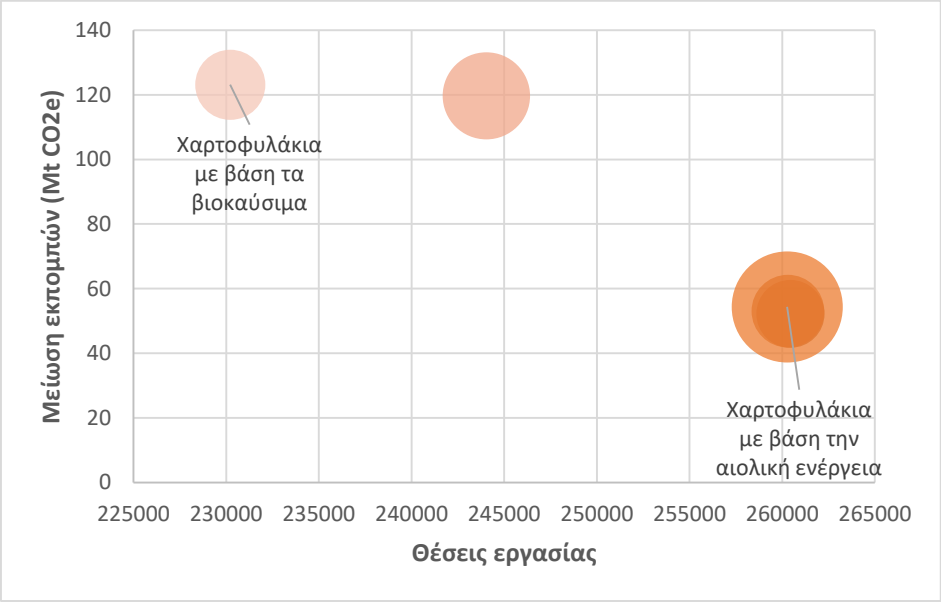
ΕΙΚΟΝΑ 10 ΣΥΜΜΕΤΟΧΗ CSP ΣΤΑ ΒΕΛΤΙΣΤΑ ΧΑΡΤΟΦΥΛΑΚΙΑ ΚΑΤΑ ΤΙΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΙΣ MONTE CARLO (€100 ΔΙΣ)



ΕΙΚΟΝΑ 11 ΣΥΜΜΕΤΟΧΗ ΒΙΟΜΑΖΑΣ ΣΤΑ ΒΕΛΤΙΣΤΑ ΧΑΡΤΟΦΥΛΑΚΙΑ ΚΑΤΑ ΤΙΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΙΣ MONTE CARLO (€100 ΔΙΣ)

Η ανάλυση ευστάθειας που πραγματοποιήθηκε μέσω των προσομοιώσεων MonteCarlo οδηγεί επίσης στο τελικό, ενημερωμένο με την πληροφορία της ευστάθεις των λύσεων,

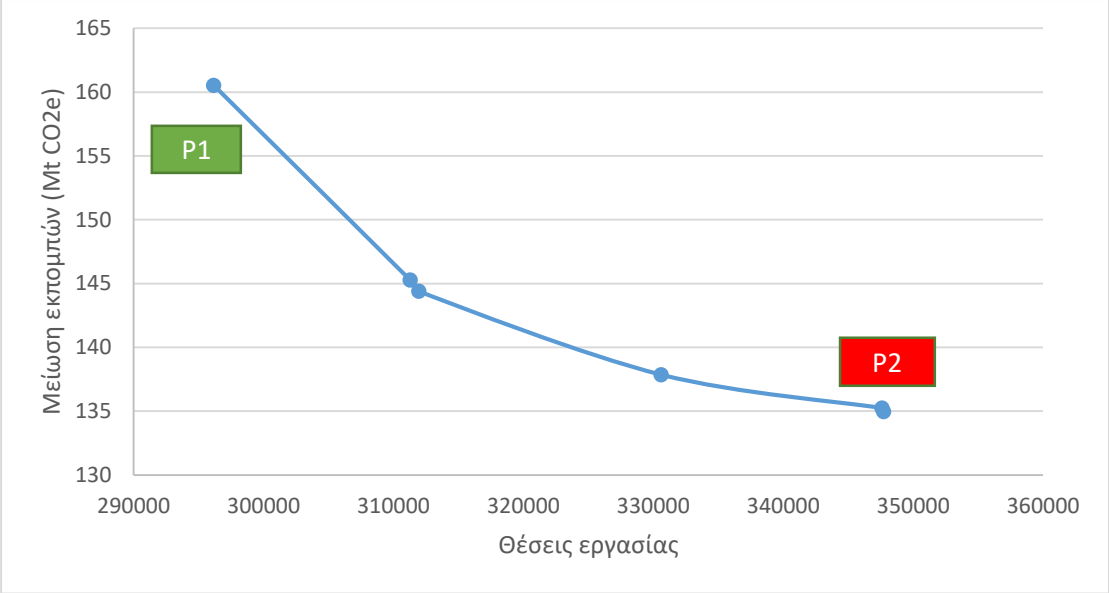
σύνολο βέλτιστων χαρτοφυλακίων, με τα πιο ευσταθή χαρτοφυλάκια να απεικονίζονται στο σχεδιάγραμμα με κουκίδες μεγαλύτερου μεγέθους (Εικόνα 12).



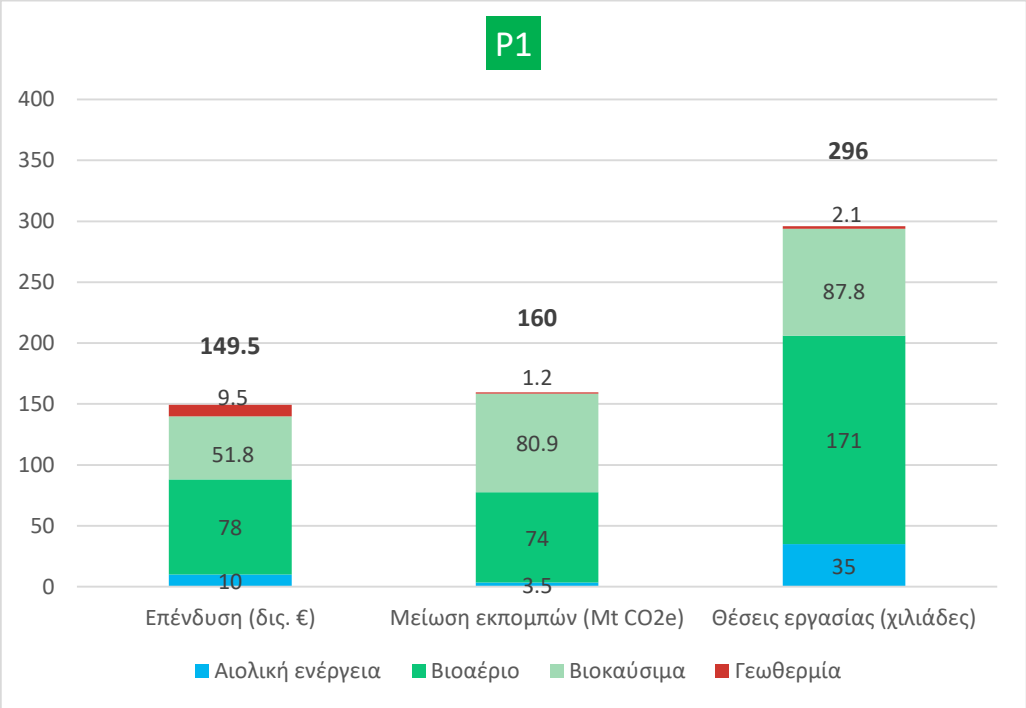
ΕΙΚΟΝΑ 12 ΜΕΤΩΠΟ ΒΕΛΤΙΣΤΩΝ ΧΑΡΤΟΦΥΛΑΚΙΩΝ ΜΕ ΠΛΗΡΟΦΟΙΑ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ (€100 BILLION)

3.3.2 Χαρτοφυλάκια προϋπολογισμού €150 δισεκατομμυρίων

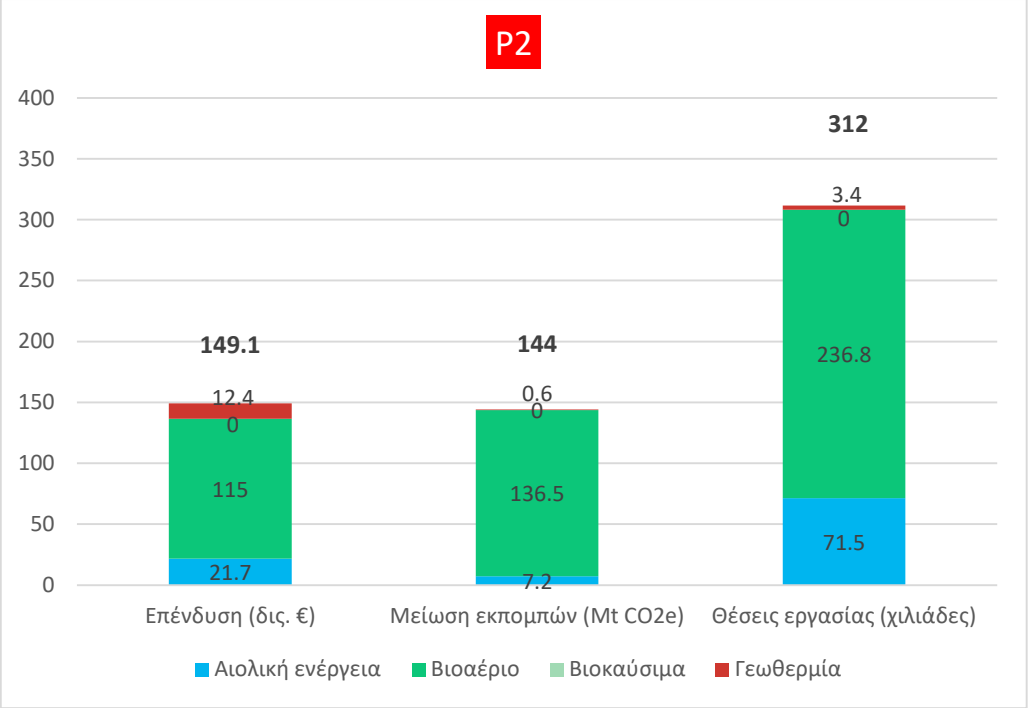
Το τελικό σύνολο βέλτιστων χαρτοφυλακίων φαίνεται στις Εικόνες 13 - 15. Η μέγιστη συνεισφορά στην απασχόληση για προϋπολογισμό 150 δισεκατομμυρίων ευρώ είναι 348 χιλιάδες θέσεις εργασίας (αύξηση 34% σε σύγκριση με τα χαρτοφυλάκια των 100 δισεκατομμυρίων ευρώ), ενώ επιτεύχθηκε μείωση 160 MtCO2 (αύξηση 30% σε σύγκριση με τα χαρτοφυλάκια των 100 δισεκατομμυρίων ευρώ).



ΕΙΚΟΝΑ 13 ΜΕΤΩΠΟ ΒΕΛΤΙΣΤΩΝ ΧΑΡΤΟΦΥΛΑΚΙΩΝ (€150 ΔΙΣ.)

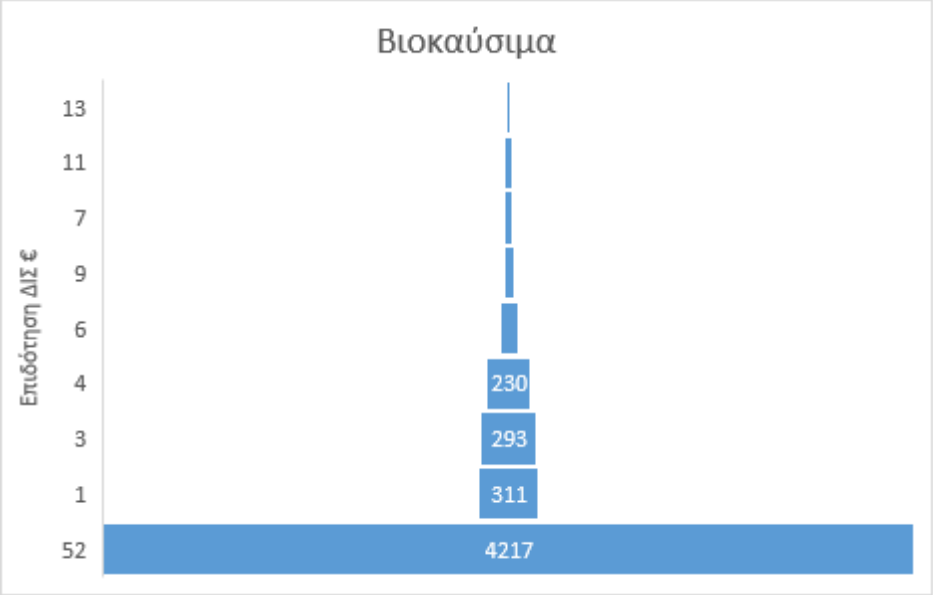


ΕΙΚΟΝΑ 14 ΣΥΝΘΕΣΗ ΤΟΥ ΒΕΛΤΙΣΤΟΥ ΧΑΡΤΟΦΥΛΑΚΙΟΥ P1 (€150 ΔΙΣ.)



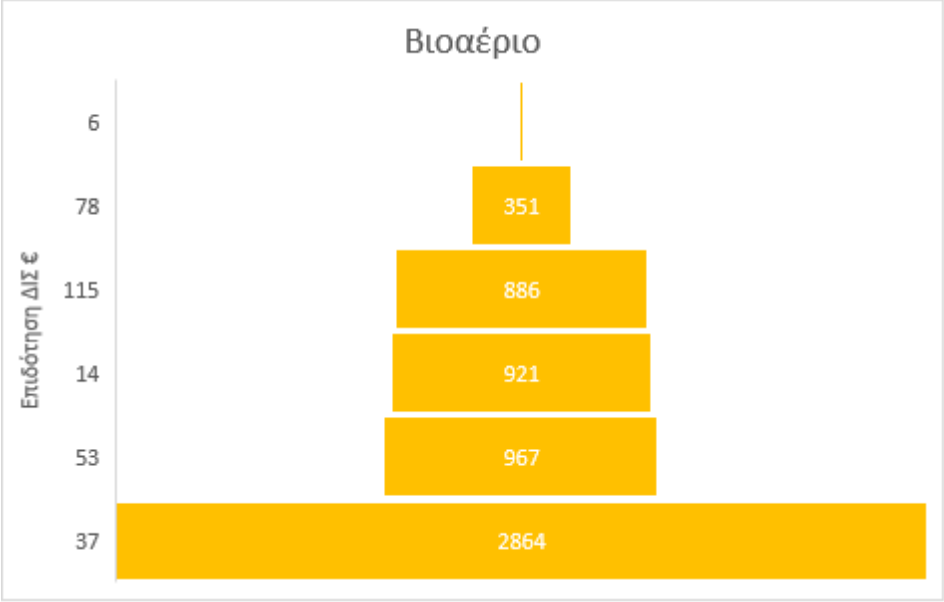
ΕΙΚΟΝΑ 15 ΣΥΝΘΕΣΗ ΤΟΥ ΒΕΛΤΙΣΤΟΥ ΧΑΡΤΟΦΥΛΑΚΙΟΥ P2 (€150 ΔΙΣ)

Εξετάζοντας τη συμβολή κάθε τεχνολογίας στα βέλτιστα χαρτοφυλάκια, παρατηρείται ότι, όπως και στα χαρτοφυλάκια των 100 δισεκατομμυρίων ευρώ, τα βιοκαύσιμα, τα αιολικά, το βιοαέριο και η γεωθερμία είναι και πάλι οι κυρίαρχες τεχνολογίες. Τονίζουμε ότι, ενώ κινούμαστε προς μια μεγαλύτερη επενδυτική ικανότητα, το βιοαέριο εισχωρεί στο μείγμα, εξισορροπώντας ουσιαστικά τα χαρτοφυλάκια και τα βιοκαύσιμα συνεχίζουν να μεγιστοποιούν τη συνεισφορά στη μείωση των εκπομπών. Στο άλλο άκρο της βελτιστοποίησης (χαρτοφυλάκιο P2), παρατηρούμε ότι η αιολική ενέργεια όχι μόνο βελτιώνει δραστικά τα οφέλη για την απασχόληση μιας επιδότησης 150 δισεκατομμυρίων ευρώ, αλλά όπως δείχνει η ανάλυση Μόντε Κάρλο, παρέχει και τα πιο ευσταθή χαρτοφυλάκια σε συνθήκες αβεβαιότητας.

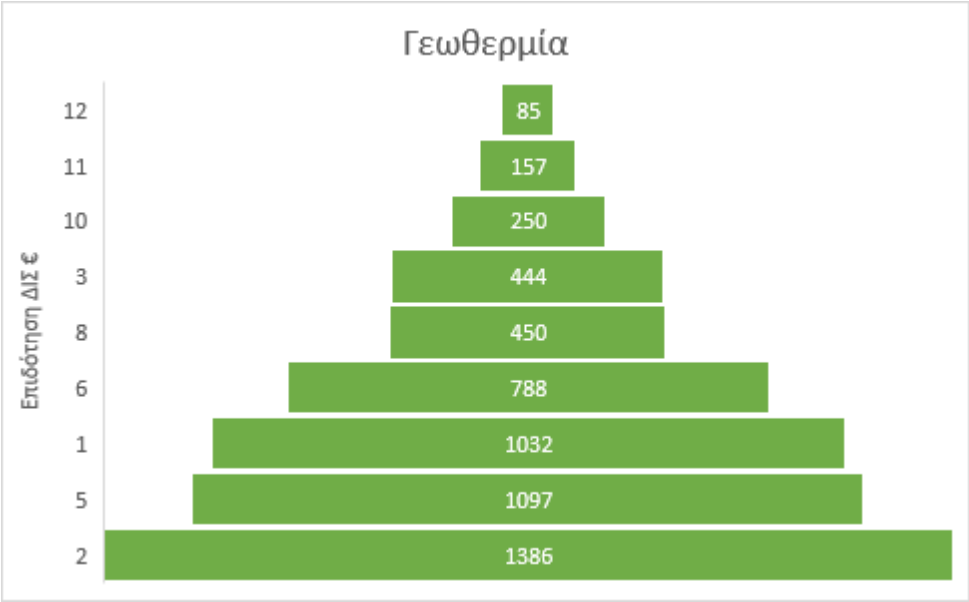


ΕΙΚΟΝΑ 16 ΣΥΜΜΕΤΟΧΗ ΒΙΟΚΑΥΣΙΜΩΝ ΣΤΙΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΙΣ MONTE CARLO (€150 ΔΙΣ)

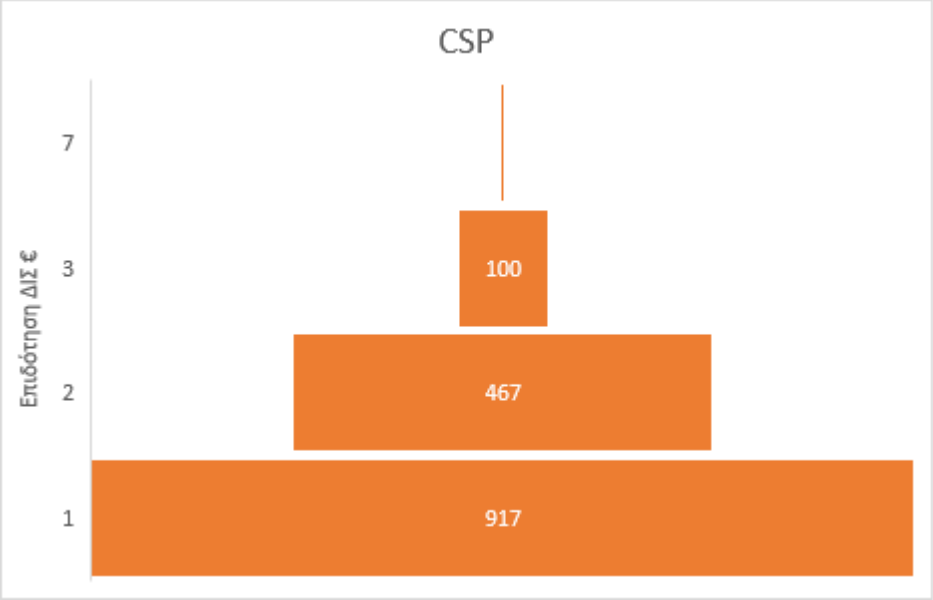
ΕΙΚΟΝΑ 17 ΣΥΜΜΕΤΟΧΗ ΑΙΟΛΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΤΑ ΒΕΛΤΙΣΤΑ ΧΑΡΤΟΦΥΛΑΚΙΑ ΚΑΤΑ ΤΙΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΙΣ MONTE CARLO (€150 ΔΙΣ)



ΕΙΚΟΝΑ 18 ΣΥΜΜΕΤΟΧΗ ΒΙΟΑΕΡΙΟΥ ΣΤΑ ΒΕΛΤΙΣΤΑ ΧΑΡΤΟΦΥΛΑΚΙΑ ΚΑΤΑ ΤΙΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΙΣ MONTE CARLO (€150 ΔΙΣ)



ΕΙΚΟΝΑ 19 ΣΥΜΜΕΤΟΧΗ ΓΕΩΘΕΡΜΙΑΣ ΣΤΑ ΒΕΛΤΙΣΤΑ ΧΑΡΤΟΦΥΛΑΚΙΑ ΚΑΤΑ ΤΙΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΙΣ MONTE CARLO (€150 ΔΙΣ)



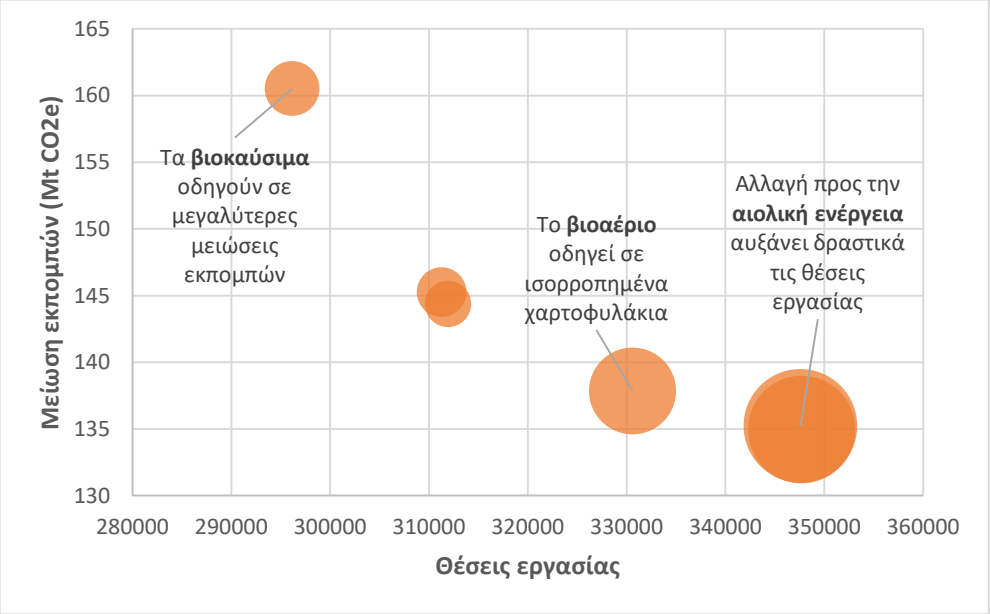
ΕΙΚΟΝΑ 20 ΣΥΜΜΕΤΟΧΗ CSP ΣΤΑ ΒΕΛΤΙΣΤΑ ΧΑΡΤΟΦΥΛΑΚΙΑ ΚΑΤΑ ΤΙΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΙΣ MONTE CARLO (€150 ΔΙΣ)

ΕΙΚΟΝΑ 21 ΣΥΜΜΕΤΟΧΗ ΒΙΟΜΑΖΑΣ ΣΤΑ ΒΕΛΤΙΣΤΑ ΧΑΡΤΟΦΥΛΑΚΙΑ ΚΑΤΑ ΤΙΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΙΣ MONTE CARLO (€150 ΔΙΣ)

Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων Μόντε Κάρλο επιβεβαιώνουν και πάλι ότι οι πιο ευσταθείς τεχνολογίες για επιδότηση είναι τα αιολικά, το βιοαέριο, τα βιοκαύσιμα και η γεωθερμία. Στις περισσότερες περιπτώσεις, τα αιολικά και το βιοαέριο επιδοτούνται ιδιαίτερα με επενδύσεις από 56 έως 107 δισεκατομμύρια ευρώ και από 37 έως 115 δισεκατομμύρια ευρώ, αντίστοιχα. Τα διαφορετικά επίπεδα επιδότησης

μεταξύ αυτών των δύο τεχνολογιών οδηγούν σε αντιστάθμιση μεταξύ των μειώσεων εκπομπών (με έμφαση στην περίπτωση του βιοαερίου) και του αριθμού των νέων θέσεων εργασίας (υψηλότερος στην περίπτωση των αιολικών). Το χαμηλότερο όριο για επενδύσεις σε βιοκαύσιμα είναι συνήθως περίπου 50 δισεκατομμύρια. Ελλείψει επενδύσεων σε βιοκαύσιμα, ο προϋπολογισμός κατανέμεται στα αιολικά και το βιοαέριο για την εξισορρόπηση των δύο κριτηρίων. Η επιδότηση στη γεωθερμία είναι συνήθως χαμηλή, από 1 έως 10 δισ. Ευρώ, ανάλογα με το επενδυτικό μείγμα των κύριων τεχνολογιών, αλλά αυτό μπορεί να αποτελέσει μία λογική επένδυση που μπορεί να αποφέρει έως και 1.500 νέες θέσεις εργασίας. Αξίζει να σημειωθεί πως αυτά τα μικρά πακέτα προϋπολογισμού που εξετάστηκαν για τη γεωθερμική ενέργεια αντικατοπτρίζουν εν μέρει το συνολικό δυναμικό της πηγής στην ΕΕ. Οι επιδοτήσεις CSP εμφανίζονται μερικές φορές ως συμπληρωματικές επενδύσεις, λόγω των συνθηκών αβεβαιότητας. Τέλος παρατηρείται ότι δεν συνιστώνται ούτε σε αυτό το ύψος προϋπολογισμού επιπρόσθετες επιδοτήσεις στα φωτοβολταϊκά και τα ηλεκτροκίνητα οχήματα.

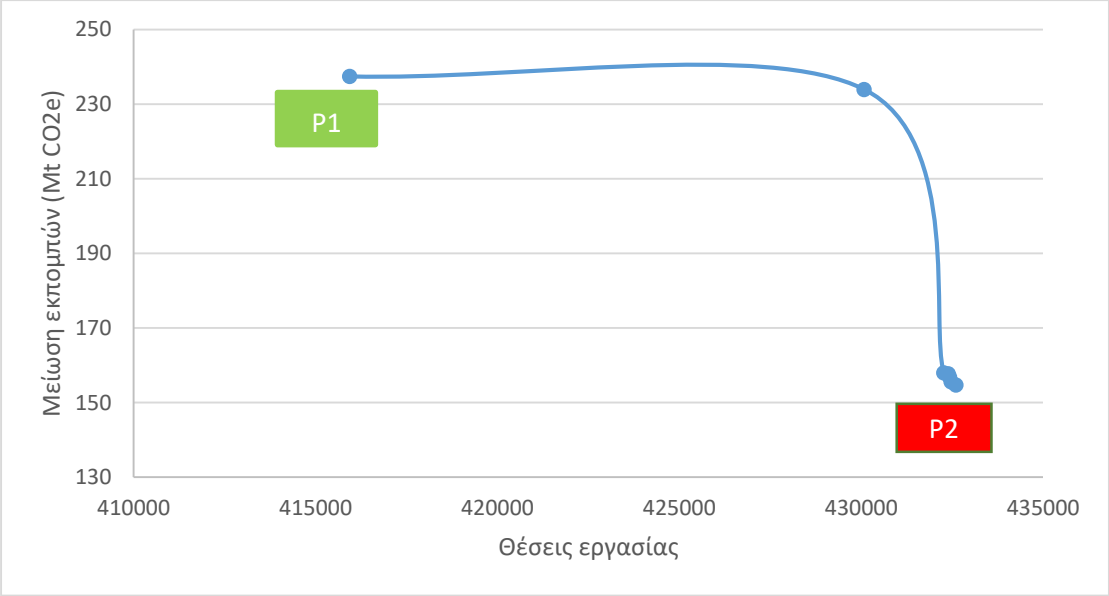
Το ενημερωμένο, τελικό, σύνολο βέλτιστων χαρτοφυλακίων μετά την ενσωμάτωση πληροφοριών ευρωστίας φαίνεται στην παρακάτω εικόνα (Εικόνα 22).



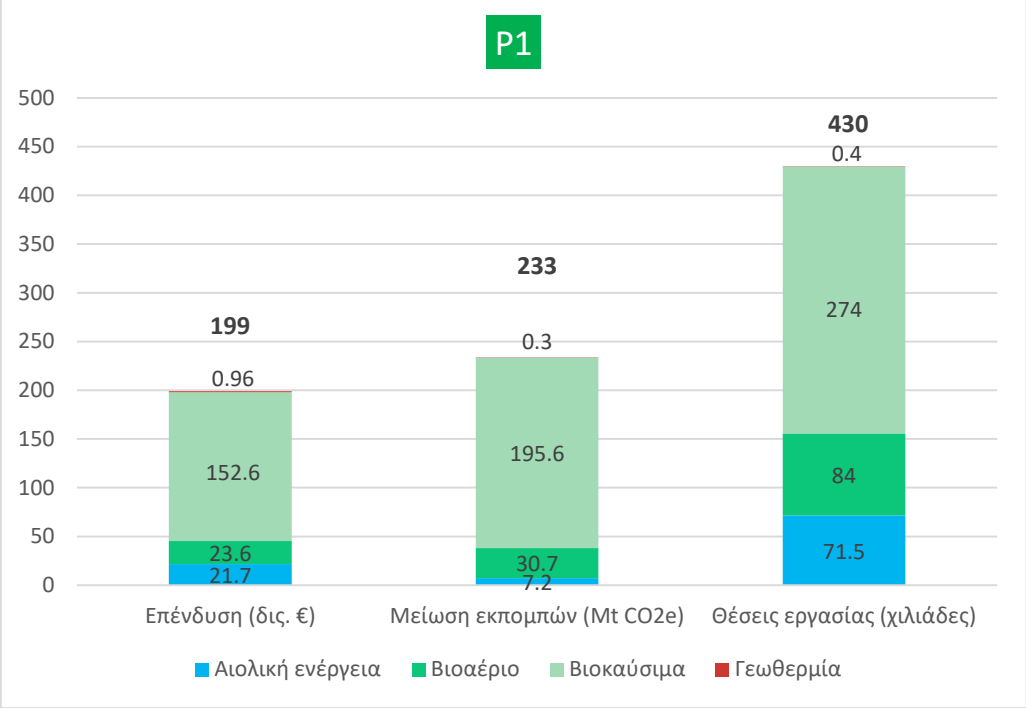
ΕΙΚΟΝΑ 22 ΜΕΤΩΠΟ ΒΕΛΤΙΣΤΩΝ ΧΑΡΤΟΦΥΛΑΚΙΩΝ ΜΕ ΠΛΗΡΟΦΟΙΑ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ (€150 ΔΙΣ)

3.3.3 Χαρτοφυλάκια προϋπολογισμού €200 δισεκατομμυρίων.

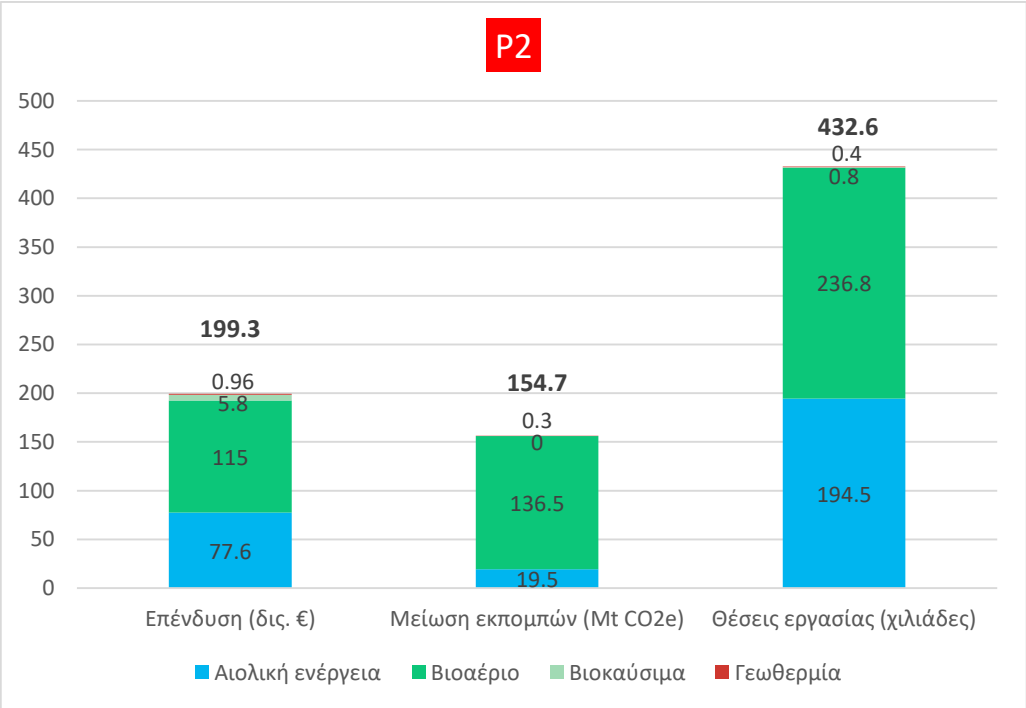
Το τελικό σύνολο βέλτιστων χαρτοφυλακίων φαίνεται στις Εικόνες 23-26. Η μέγιστη συνεισφορά στην απασχόληση για προϋπολογισμό 150 δισεκατομμυρίων ευρώ είναι 348 χιλιάδες θέσεις εργασίας (αύξηση 34% σε σύγκριση με τα χαρτοφυλάκια των 100 δισεκατομμυρίων ευρώ), ενώ επιτεύχθηκε μείωση 160 MtCO2 (αύξηση 30% σε σύγκριση με τα χαρτοφυλάκια των 100 δισεκατομμυρίων ευρώ).



ΕΙΚΟΝΑ 23 ΜΕΤΩΠΟ ΒΕΛΤΙΣΤΩΝ ΧΑΡΤΟΦΥΛΑΚΙΩΝ (€200 ΔΙΣ.)

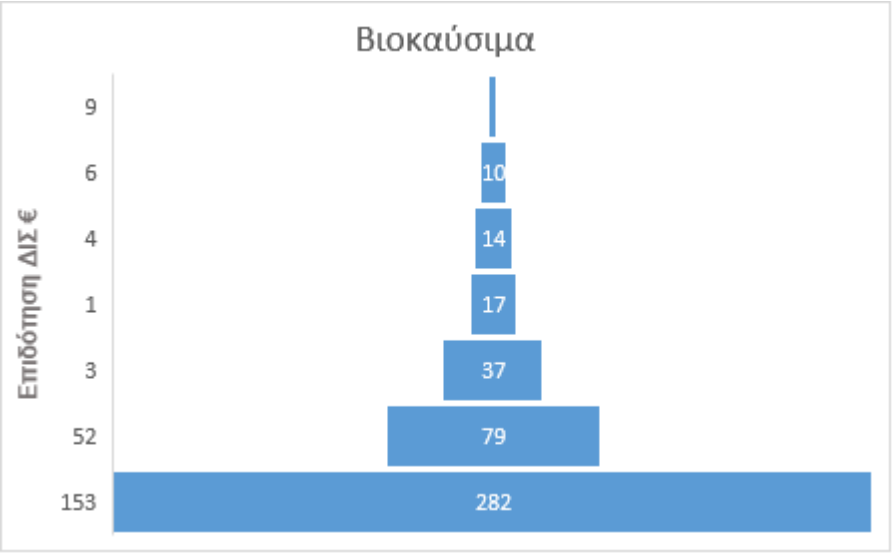


ΕΙΚΟΝΑ 24 ΣΥΝΘΕΣΗ ΤΟΥ ΒΕΛΤΙΣΤΟΥ ΧΑΡΤΟΦΥΛΑΚΙΟΥ P1 (€200 ΔΙΣ.)



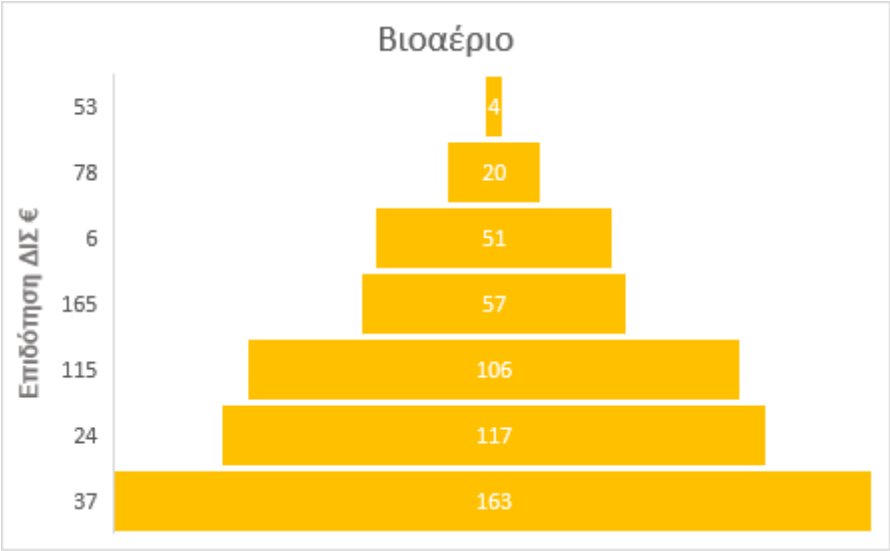
ΕΙΚΟΝΑ 25 ΣΥΝΘΕΣΗ ΤΟΥ ΒΕΛΤΙΣΤΟΥ ΧΑΡΤΟΦΥΛΑΚΙΟΥ P2 (€200 ΔΙΣ.)

Παρατηρείται ότι η κύρια διαφορά της λύσης των 200 δισεκατομμυρίων ευρώ από τις προηγούμενες αναλύσεις είναι η μεγαλύτερη επένδυση στα βιοκαύσιμα. Αυτό οδηγεί σε λύσεις που επιτυγχάνουν υψηλές περικοπές εκπομπών και ταυτόχρονα δημιουργούν πολλές νέες θέσεις εργασίας σε ολόκληρο τον ενεργειακό τομέα, όπως συμβαίνει στο χαρτοφυλάκιο P1. Τα βιοκαύσιμα επιδοτούνται συνήθως με έως και 153 δισεκατομμύρια ευρώ, ενώ οι πιο κοινές επενδύσεις στο βιοαέριο είναι 37 δισεκατομμύρια ευρώ και στα αιολικά 22 δισεκατομμύρια ευρώ, κάτι που αποτελεί σημαντική μείωση σε σύγκριση με τα υψηλά επίπεδα επιδότησης που επιτεύχθηκαν από αυτές τις τεχνολογίες στα 100 και 150 λύσεις δισεκατομμυρίων ευρώ. Ο υπόλοιπος προϋπολογισμός διατίθεται για γεωθερμική ενέργεια και CSP και μόνο σε τρία χαρτοφυλάκια σε στερεά βιομάζα.

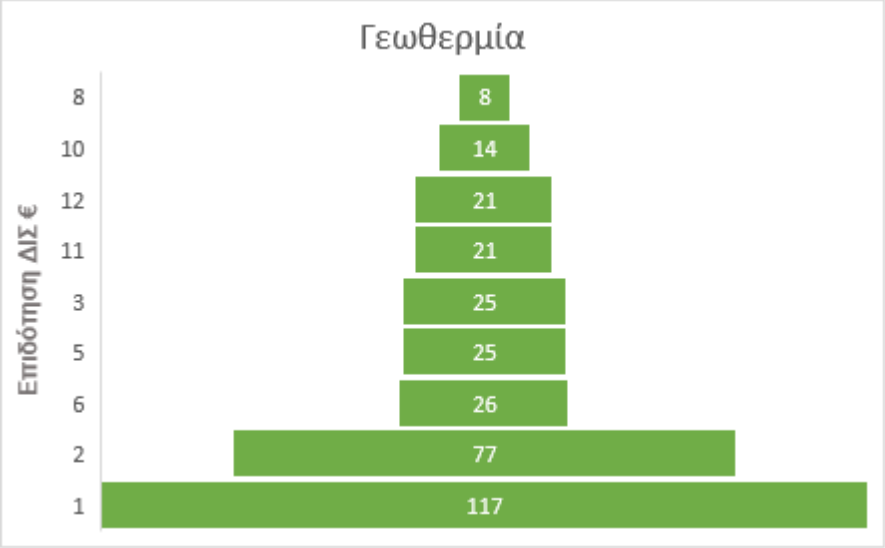


ΕΙΚΟΝΑ 26 ΣΥΜΜΕΤΟΧΗ ΒΙΟΚΑΥΣΙΜΩΝ ΣΤΑ ΒΕΛΤΙΣΤΑ ΧΑΡΤΟΦΥΛΑΚΙΑ ΚΑΤΑ ΤΙΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΙΣ MONTE CARLO (€200 ΔΙΣ)

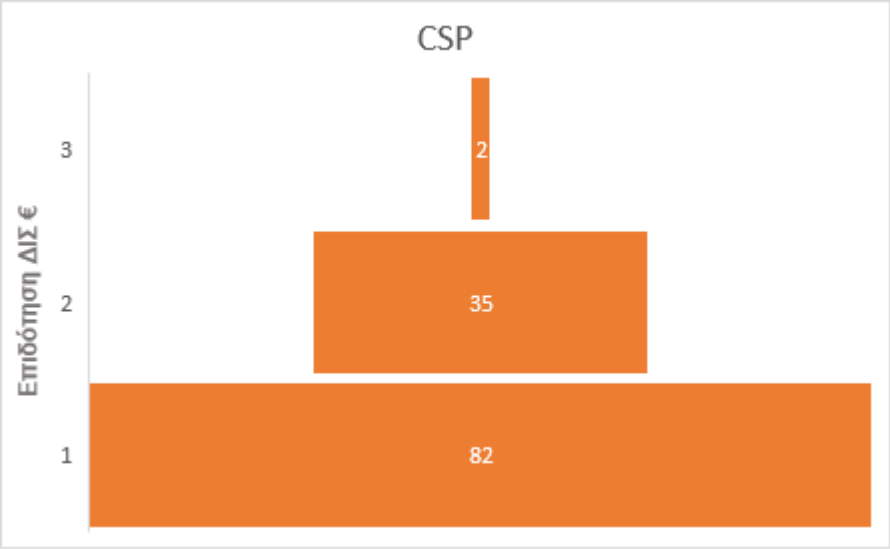
ΕΙΚΟΝΑ 27 ΣΥΜΜΕΤΟΧΗ ΑΙΟΛΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΤΑ ΒΕΛΤΙΣΤΑ ΧΑΡΤΟΦΥΛΑΚΙΑ ΚΑΤΑ ΤΙΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΙΣ MONTE CARLO (€200 ΔΙΣ)



ΕΙΚΟΝΑ 28 ΣΥΜΜΕΤΟΧΗ ΒΙΟΑΕΡΙΟΥ ΣΤΑ ΒΕΛΤΙΣΤΑ ΧΑΡΤΟΦΥΛΑΚΙΑ ΚΑΤΑ ΤΙΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΙΣ MONTE CARLO (€200 ΔΙΣ)



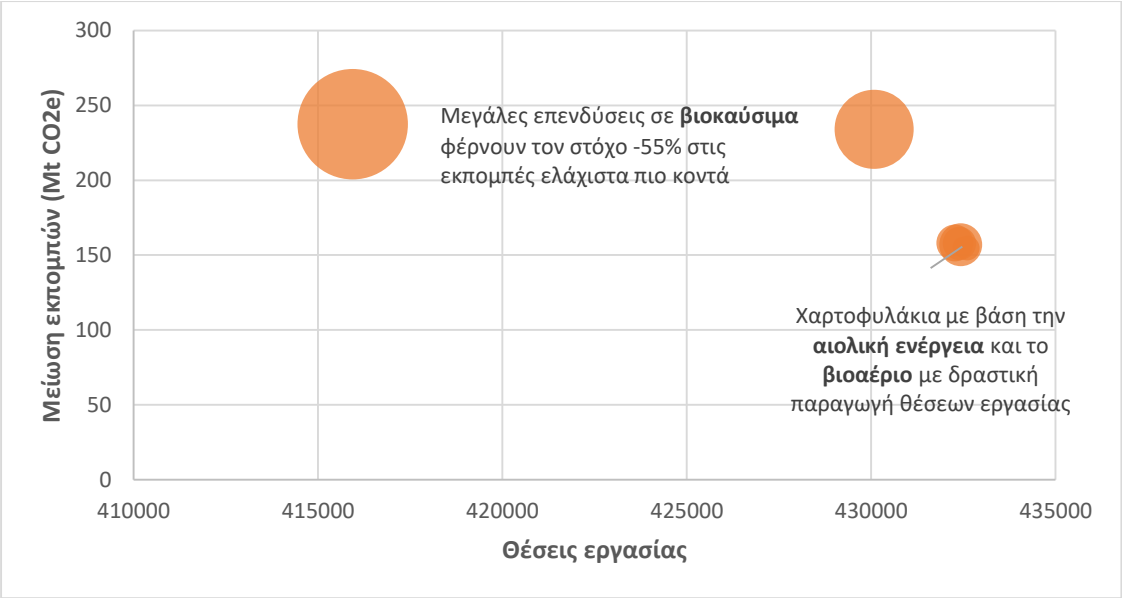
ΕΙΚΟΝΑ 29 ΣΥΜΜΕΤΟΧΗ ΓΕΩΘΕΡΜΙΑΣ ΣΤΑ ΒΕΛΤΙΣΤΑ ΧΑΡΤΟΦΥΛΑΚΙΑ ΚΑΤΑ ΤΙΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΙΣ MONTE CARLO (€200 ΔΙΣ)



ΕΙΚΟΝΑ 30 ΣΥΜΜΕΤΟΧΗ CSP ΣΤΑ ΒΕΛΤΙΣΤΑ ΧΑΡΤΟΦΥΛΑΚΙΑ ΚΑΤΑ ΤΙΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΙΣ MONTE CARLO (€200 ΔΙΣ)

ΕΙΚΟΝΑ 31 ΣΥΜΜΕΤΟΧΗ ΒΙΟΜΑΖΑΣ ΣΤΑ ΒΕΛΤΙΣΤΑ ΧΑΡΤΟΦΥΛΑΚΙΑ ΚΑΤΑ ΤΙΣ ΠΡΟΣΩΠΕΙΩΣΕΙΣ MONTE CARLO (€200 ΔΙΣ)

Το ενημερωμένο, ευσταθές σύνολο βέλτιστων χαρτοφυλακίων δίνεται στο επόμενο σχήμα.



ΕΙΚΟΝΑ 32 ΜΕΤΩΠΟ ΒΕΛΤΙΣΤΩΝ ΧΑΡΤΟΦΥΛΑΚΙΩΝ ΜΕ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ (€200 ΔΙΣ)

Σε αντίθεση με τα αποτελέσματα ανάλυσης ευστάθειας χαρτοφυλακίων ύψους 100 και 150 δισεκατομμυρίων ευρώ, όπου τα χαρτοφυλάκια αιολικής ενέργειας παρουσίασαν το υψηλότερο επίπεδο ευστάθειας, η ανάλυση χαρτοφυλακίου για διαθέσιμο κεφάλαιο

ύψους 200 δισεκατομμυρίων ευρώ δείχνει ότι οι μεγαλύτερες επενδύσεις σε βιοκαύσιμα είναι ο περισσότερος ευσταθής τρόπος επίτευξης των δύο στόχων. Αυτό θα μπορούσε να αποδοθεί, εν μέρει, στη μη γραμμικότητα των υπό εξέταση προϋπολογισμών.

4. Συμπεράσματα

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας αποτελεί η εξέταση του οφέλους που προκύπτει σχετικά με τη δημιουργία νέων θέσεων εργασίας και τη μείωση των εκπομπών CO_2, εάν ο προϋπολογισμός της ΕΕ που δεσμεύθηκε για την οικονομική ανάκαμψη από τις συνέπειες του Covid19 χρησιμοποιηθεί για τη χρηματοδότηση επενδύσεων για περαιτέρω ανάπτυξη των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Τα αποτελέσματα ερμηνεύονται ως επιπρόσθετα των υφιστάμενων μέτρων και στόχων για την επίτευξη χαμηλών εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα.

Βασικό συμπέρασμα της εξεταζόμενης μελέτης περίπτωσης είναι πως επιδοτήσεις στο εύρος των 100-200 δις. ευρώ μπορούν να αποφέρουν περαιτέρω μείωση των εκπομπών CO_2 έως και 1%. Παράλληλα μία τέτοια στρατηγική μπορεί να δημιουργήσει 230-432 χιλιάδες θέσεις εργασίας στον ενεργειακό τομέα, υποστηρίζοντας την ανάκαμψη της αγοράς εργασίας ως παράπλευρο όφελος της ενεργειακής μετάβασης.

Από τεχνολογική άποψη, διαπιστώνεται ότι τα βιοκαύσιμα, η αιολική ενέργεια και το βιοαέριο εμφανίζονται κατ' επανάληψη και με μεγαλύτερη συμμετοχή στις βέλτιστες λύσεις. Σε αυτό το σημείο είναι σημαντικό να επισημανθεί ότι κατά την ερμηνεία των αποτελεσμάτων πρέπει να ληφθεί υπόψη η μη γραμμικότητα στις εξόδους του μοντέλου GCAM η οποία μπορεί να επηρεάσει την ακρίβεια των μεγεθών που έχουν δοθεί ως είσοδοι στην αξιολόγηση χαρτοφυλακίου. Επίσης επισημαίνεται ότι σε ορισμένες περιπτώσεις κατά τους υπολογισμούς των επιπτώσεων στην απασχόληση, πιθανά έμμεσα οφέλη στη δημιουργία νέων θέσεων εργασίας ενδεχομένως να μην έχουν αποτυπωθεί για ορισμένες τεχνολογίες. Τα ηλεκτρικά οχήματα αποτελούν το πιο χαρακτηριστικό παράδειγμα. Συγκεκριμένα σχετικά με τις επιδοτήσεις ηλεκτρικών οχημάτων έχουν ληφθεί υπόψη μόνο οι καθαρές θέσεις εργασίας στον κατεξοχήν ενεργειακό τομέα, χωρίς να λαμβάνονται υπόψη πιθανές επιπρόσθετες θέσεις που προκύπτουν από σχετικές παράπλευρες δραστηριότητες, όπως η δημιουργία υποδομών που απαιτούνται για την φόρτιση των ηλεκτρικών οχημάτων. Ως αποτέλεσμα, τα ηλεκτρικά οχήματα φαίνεται να συμβάλλουν στις περικοπές εκπομπών, με απαίτηση βέβαια υψηλής σχετικής χρηματοδότησης, ενώ ταυτόχρονα ο αντίκτυπός τους στην απασχόληση είναι σχεδόν αμελητέος. Μια άλλη ενδιαφέρουσα περίπτωση αποτελεί η λύση της γεωθερμία. Η συγκεκριμένη τεχνολογία ενώ δεν είναι τόσο ανταγωνιστική σε σύγκριση με τις τρεις κυρίαρχες στις βέλτιστες λύσεις τεχνολογίες, δηλαδή σε σύγκριση με τα βιοκαύσιμα, την αιολική ενέργεια και το βιοαέριο, καταφέρνει να συμμετέχει σε όλες τις σχεδόν βέλτιστες λύσεις λόγω του χαμηλού κόστους της και των θετικών επιπτώσεών της αναφορικά και με τα δύο κριτήρια βελτιστοποίησης. Ενδιαφέρον είναι, ακόμα, ότι η ηλιακή ενέργεια φαίνεται να φτάνει σε ένα σημείο κορεσμού στο τρέχον σενάριο πολιτικών, στο οποίο, λόγω του ότι εμφανίζει ήδη υψηλή διείσδυση στο μείγμα ηλεκτρικής ενέργειας, πρόσθετες επιδοτήσεις φαίνεται να αυξάνουν τις προκύπτουσες εκπομπές (καταδεικνύεται έτσι η ανάγκη επένδυσης σε

μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με καύσιμο φυσικό αέριο προκειμένου να εξυπηρετηθούν οι ανάγκες ζήτησης του ηλεκτρικού δικτύου).

Επόμενα βήματα και προτάσεις περαιτέρω μελέτης σχετικά με την παρούσα ανάλυση περιλαμβάνουν την προσθήκη περισσότερων στόχων στο μοντέλο βελτιστοποίησης (όπως τα οφέλη για την υγεία, η προστιθέμενη αξία σε βιομηχανικό επίπεδο κλπ.), καθώς και την πιο λεπτομερή καταγραφή και ακριβέστερη ποσοτικοποίηση των μεγεθών άμεσης και έμμεσης απασχόλησης (συμπεριλαμβανομένων των ηλεκτρικών οχημάτων). Επιπλέον, θα ήταν χρήσιμη η εκ νέου επίλυση του μοντέλου, λαμβάνοντας υπόψη το τελικό σχέδιο ανάκαμψης, το οποίο αναμένεται εντός του Απριλίου 2021, το οποίο θα επηρεάσει το συνολικό διαθέσιμο κεφάλαιο το οποίο έχει θεωρηθεί ως περιορισμός στην παρούσα μελέτη. Σε επόμενο στάδιο θα ήταν επιπλέον ενδιαφέρουσα η εφαρμογή αντίστοιχης μελέτης και η εξέταση των σχετικών αποτελεσμάτων σε επίπεδο κρατών μελών, συμπληρωματικά της ανάλυσης σε συνολικό ευρωπαϊκό επίπεδο που διενεργήθηκε στην παρούσα εργασία.

Αναφορές

(WNN), W. N. (2019). *Study highlights nuclear's value to EU employment*. Ανάκτηση από https://www.world-nuclear-news.org/Articles/Study-highlights-nuclears-value-to-EU-employment

Bezdek, R. H. (2020). The Jobs Impact of the USA New Green Deal. . *American Journal of Industrial and Business Management*, 1085-1106.

Domínguez-Ríos, M. Á. (2019). Efficient anytime algorithms to solve the bi-objective Next Release Problem. Journal of Systems and Software.

Edmonds, J. A., Wise, M., & MacCracken, C. (1994). Advanced Energy Technologies and Climate Change: An Analysis Using the Global Change Assessment Model (gcam). PNL-9798. Pacific Northwest National Laboratory (PNNL), Richland, WA (United States).

Ehrgott, M., & Ryan, D. (2002). Constructing robust crew schedules with bicriteria optimization. Journal of Multi-Criteria Decision Analysis.

EurObserveR. (2019). The State of Renewable Energies in Europe, 2019 Edition, Paris. Retrieved from: https://www.isi.fraunhofer.de/content/dam/isi/dokumente/ccx/2020/The-state-of-renewable-energies-in-Europe-2019.pdf.

EuropeanCommission. (2020). *Recovery and Resilience Plans*. Ανάκτηση από https://ec.europa.eu/info/sites/info/files/3_en_document_travail_service_part1_v3_en_0.pdf

EuropeanCouncil. (2020). Ανάκτηση από https://www.consilium.europa.eu/el/infographics/ngeu-covid-19-recovery-package/

EuropeanCouncil. (2020). *COVID-19: the EU's response to the economic fallout.* Ανάκτηση από https://www.consilium.europa.eu/en/policies/coronavirus/covid-19-economy/

Eurostat. (2020). Ανάκτηση από Euro area unemployment at 8.3%: https://ec.europa.eu/eurostat/documents/2995521/10663786/3-30102020-CP-EN.pdf/f93787e0-0b9a-e10e-b897-c0a5f7502d4e

Fauci, A. S., Lane, H., & Redfield, R. (2020). Covid-19—navigating the uncharted. The New England Journal of Medicine.

Forouli, A. e. (2020). A multiple-uncertainty analysis framework for integrated assessment modelling of several sustainable development goals. *Environmental Modelling & Software*, 131, 104795.

Forouli, A., Doukas, H., Nikas, A., Sampedro, J., & Van de Ven, D. (2019). Identifying optimal technological portfolios for European power generation towards climate change mitigation: A robust portfolio analysis approach. *Utilities Policy*, 57, 33-42.

Fragkos, P. &. (2018). Employment creation in EU related to renewables expansion. . *Applied Energy*, 230, 935-945.

He, H., & Harris, L. (2020). The impact of Covid-19 pandemic on corporate social responsibility and marketing philosophy. *Journal of Business Research*, 116, 176-182.

IRENA. (2020). *The post-COVID recovery: An agenda for resilience, development and equality.* Ανάκτηση από https://www.irena.org/publications/2020/Jun/Post-COVID-Recovery

Laumanns, M., Thiele, L., & Zitzler, E. (2006). An efficient, adaptive parameter variation scheme for metaheuristics based on the epsilon-constraint method. European Journal of Operational Research.

Mavrotas. (2009). Effective implementation of the ε-constraint method in multi-objective mathematical programming problems. Applied mathematics and computation.

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. Applied Mathematics and Computation,.

Miles, D., Stedman, M., & Heald, A. (2020). Living with COVID-19: balancing costs against benefits in the face of the virus. *National Institute Economic Review*, 253, R60-R76.

Nicola, M. e. (2020). The socio-economic implications of the coronavirus pandemic (COVID-19): A review. International journal of surgery.

Nikas, A. (2021). Perspective of comprehensive and comprehensible multi-model energy and climate science in Europe. .

Nikas, A. e. (2020). The desirability of transitions in demand: Incorporating behavioural and societal transformations into energy modelling. Στο *Energy Research & Social Science.*

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*, 1-54.

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.

Ortega, M., del Río, P., Ruiz, P., Nijs, W., & Politis, S. (2020). Analysing the influence of trade, technology learning and policy on the employment prospects of wind and solar energy deployment: The EU case. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 122.

Pachauri, R. K. (2015). 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. IPCC.

Papapostolou, A. K. (2017). Exploring opportunities and risks for RES-E deployment under Cooperation Mechanisms between EU and Western Balkans: A multi-criteria assessment. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 80.

Rao, S. e. (2017). ‘Future air pollution in the Shared Socio-economic Pathways’, Global Environmental Change,. doi: 10.1016/j.gloenvcha.2016.05.012.

Rutovitz, J. D. (2015). Calculating global energy sector jobs: 2015 methodology.

Saadat, S., Hussain, C., & Rawtani, D. (2020). Environmental perspective of COVID-19. Science of The Total Environment.

Schwanitz, V. J. (2013). Evaluating integrated assessment models of global climate change. *Environmental modelling & software*, 120-131.

Wei, M. P. (2010). Putting renewables and energy efficiency to work: How many jobs can the clean energy industry generate in the US? *Energy policy*, 38(2), 919-931.

Zhang, W., & Reimann, M. (2014). A simple augmented∈-constraint method for multi-objective mathematical integer programming problems. European Journal of Operational Research.

IEA. (2020). *Data and Statistics*. Ανάκτηση από https://www.iea.org/data-and-statistics?country=***&fuel=Electricity%20and%20heat&indicator=ElecGenByFuel