



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

ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΧΑΡΤΟΦΥΛΑΚΙΟΥ ΓΙΑ ΤΟΝ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟ ΒΕΛΤΙΣΤΩΝ
ΧΑΡΤΟΦΥΛΑΚΙΩΝ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΩΝ ΥΠΟ ΤΟ ΠΡΙΣΜΑ ΣΤΟΧΑΣΤΙΚΗΣ ΚΑΙ ΝΤΕΤΕΡΜΙΝΙΣΤΙΚΗΣ
ΑΒΕΒΑΙΟΤΗΤΑΣ

ΒΑΣΙΛΕΙΟΣ ΠΑΠΑΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΥ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: Χ. ΔΟΥΚΑΣ

ΙΔΙΟΤΗΤΑ: ΑΝΑΠΛΗΡΩΤΗΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ ΕΜΠ

ΦΕΒΡΟΥΑΡΙΟΣ 2020



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

ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΧΑΡΤΟΦΥΛΑΚΙΟΥ ΓΙΑ ΤΟΝ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟ ΒΕΛΤΙΣΤΩΝ
ΧΑΡΤΟΦΥΛΑΚΙΩΝ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΩΝ ΥΠΟ ΤΟ ΠΡΙΣΜΑ ΣΤΟΧΑΣΤΙΚΗΣ ΚΑΙ ΝΤΕΤΕΡΜΙΝΙΣΤΙΚΗΣ
ΑΒΕΒΑΙΟΤΗΤΑΣ

ΒΑΣΙΛΕΙΟΣ ΠΑΠΑΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΥ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: Χ. ΔΟΥΚΑΣ

ΙΔΙΟΤΗΤΑ: ΑΝΑΠΛΗΡΩΤΗΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ ΕΜΠ

ΦΕΒΡΟΥΑΡΙΟΣ 2020

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 17/02/2020

.....

Χ. Δούκας

Αναπλ. Καθηγητής ΕΜΠ

.....

Ι. Ψαρράς

Καθηγητής ΕΜΠ

.....

Δ. Ασκούνης

Καθηγητής ΕΜΠ

.....

ΒΑΣΙΛΕΙΟΣ ΠΑΠΑΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΥ

Copyright © Βασίλειος Παπακωνσταντίνου, 2020

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 Ανάλυση Χαρτοφυλακίου, βρίσκει ευρεία εφαρμογή στην υποστήριξη αποφάσεων σε πλήθος επιστημονικών πεδίων. Η Ανάλυση Χαρτοφυλακίου αποτελεί ένα εργαλείο υποστήριξης της διαδικασίας σχεδιασμού και αξιολόγησης χαρτοφυλακίων, δηλαδή του καθορισμού ενός βέλτιστου συνόλου επιλογών που αποδίδει καλύτερα από άλλα, σε ένα εύρος πιθανών μελλοντικών εξελίξεων. Αυτή η προσέγγιση διαφέρει από την καθιερωμένη μοντελοποίηση για τον προσδιορισμό μιας βέλτιστης εναλλακτικής σε ένα δεδομένο σενάριο μελλοντικής εξέλιξης.

Το παρόν θέμα διπλωματικής επικεντρώνεται στη μελέτη της ευρωστίας βέλτιστων χαρτοφυλακίων ενεργειακών τεχνολογιών στην ανατολική Αφρική υπό το πρίσμα διαφορετικών ντετερμινιστικών σεναρίων, όσο και στοχαστικής αβεβαιότητας. Συγκεκριμένα, αρχικό ζητούμενο της διπλωματικής είναι η χρησιμοποίηση ενός μοντέλου γραμμικού προγραμματισμού στο περιβάλλον GAMS προκειμένου να υπολογιστούν τα βέλτιστα χαρτοφυλάκια ενεργειακών τεχνολογιών. Επιπρόσθετα, γίνεται χρήση της προσομοίωσης Monte Carlo, με σκοπό την αντιμετώπιση της στοχαστικής αβεβαιότητας του προβλήματος βελτιστοποίησης των τεχνολογιών. Συμπληρωματικά, η ευστάθεια του προβλήματος θα εξεταστεί συγκρίνοντας εύρωστα βέλτιστα χαρτοφυλάκια μεταξύ διαφορετικών σεναρίων, τα οποία αναπαριστούν διαφορετικά κοινωνικοοικονομικά μονοπάτια.

Στην αρχή αναλύεται το μεθοδολογικό υπόβαθρο, όπως η ανάλυση χαρτοφυλακίου και οι εφαρμογές της, ο πολυκριτηριακός προγραμματισμός, η ανάλυση ευστάθειας και η μοντελοποίηση ολοκληρωμένης αποτίμησης. Στο επόμενο κεφάλαιο γίνεται μια εκτενής αναφορά στα κοινωνικοοικονομικά σενάρια και τα χαρακτηριστικά τους. Έπειτα γίνεται η εισαγωγή στο πρόβλημά μας και τα δεδομένα του, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα και γίνεται σχολιασμός των γραφικών παραστάσεων που προκύπτουν. Τέλος, παρουσιάζονται τα σημαντικότερα συμπεράσματα της παρούσας διπλωματικής.

Λέξεις – κλειδιά: Ανάλυση Χαρτοφυλακίου, Αβεβαιότητα, Ανάλυση Ευστάθειας, Πολυστοχικός Προγραμματισμός, Κοινωνικοοικονομικά Μονοπάτια

Abstract

Portfolio Analysis finds broad application to support decisions in a variety of scientific fields. Portfolio Analysis is a tool to support portfolio planning and evaluation process, i.e. setting an optimal set of options that performs better than others, in a range of possible future developments. This approach differs from established modeling to identify an optimal alternative to a given scenario of future evolution.

This thesis focuses on the study of the robustness of optimal portfolios of energy technologies in Eastern Africa in the light of deterministic as well as stochastic uncertainty. In particular, a linear programming model is built in the GAMS environment in order to identify the optimal portfolios of energy technologies. In addition, the Monte Carlo simulation is used to address the stochastic uncertainty of the technology optimization problem. Furthermore, the deterministic uncertainty of the problem will be examined by comparing stochastic robust optimal portfolios between different scenarios, representing different socioeconomic pathways.

At first, the methodological background, such as portfolio analysis and its applications, multi-criteria programming, robustness analysis and integrated assessment modeling, is analysed. In the next chapter there is an extensive reference to the shared socioeconomic pathways and their characteristics. Then the formulation of our problem and the input data are presented, followed by a graphical representation and analysis of the results. Finally, the main conclusions arising from this thesis are mentioned.

Keywords: Portfolio Analysis, Uncertainty, Robustness Analysis, Multi-criteria Programming, Shared Socioeconomic Pathways

Πρόλογος

Η εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας έγινε κατά το ακαδημαϊκό έτος 2019 – 2020 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. Επίσης θερμές ευχαριστίες οφείλω και στην υποψήφια Διδάκτορα του Εργαστηρίου Συστημάτων Αποφάσεων και Διοίκησης κα. Κατερίνα Φορούλη για την αμέριστη βοήθειά της και την καθοδήγησή της σε όλη την περίοδο εκπόνησης της εργασίας.

Τέλος, ένα μεγάλο ευχαριστώ οφείλω στην οικογένειά μου αλλά και στους θείους μου για την πολύτιμη βοήθειά τους σε όλη την διάρκεια του μεταπτυχιακού προγράμματος.

Αθήνα, Φεβρουάριος 2020

Βασίλειος Παπακωνσταντίνου

ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΧΑΡΤΟΦΥΛΑΚΙΟΥ ΓΙΑ ΤΟΝ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟ ΒΕΛΤΙΣΤΩΝ
ΧΑΡΤΟΦΥΛΑΚΙΩΝ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΩΝ ΥΠΟ ΤΟ ΠΡΙΣΜΑ ΣΤΟΧΑΣΤΙΚΗΣ ΚΑΙ ΝΤΕΤΕΡΜΙΝΙΣΤΙΚΗΣ
ΑΒΕΒΑΙΟΤΗΤΑΣ

Περιεχόμενα

Περίληψη	5
Abstract	6
Πρόλογος.....	7
2.Εισαγωγή.....	9
3.Μεθοδολογικό υπόβαθρο	10
3.1. Θεωρία χαρτοφυλακίου και εφαρμογές στην ενέργεια.....	10
3.2. Πολυκριτηριακός Μαθηματικός Προγραμματισμός	14
3.3.Μέθοδοι επίλυσης Πολυκριτηριακού Γραμμικού Προγραμματισμού.....	20
3.4.Ανάλυση Ευστάθειας	26
3.5.Μοντελοποίηση Ολοκληρωμένης Αποτίμησης	32
4.Περιγραφή των κοινωνικοοικονομικών σεναρίων	34
5.Εφαρμογή Προβλήματος	45
6.Αποτελέσματα.....	48
7.Συμπεράσματα.....	64
8.Βιβλιογραφία	66

2.Εισαγωγή

Ένα από τα πιο συχνά προβλήματα που προκύπτουν σε όλους τους τομείς της ανθρώπινης δραστηριότητας είναι η βέλτιστη κατανομή πόρων. Αυτά τα προβλήματα όμως στις περισσότερες των περιπτώσεων δεν μπορούν να λυθούν λαμβάνοντας υπόψη μας ένα και μόνο κριτήριο. Αυτό συμβαίνει γιατί πολύ συχνά οι επιλογές μας έχουν πολλές και διαφορετικές επιδράσεις τις οποίες δεν μπορούμε να αγνοήσουμε αν θέλουμε να λάβουμε μια ολοκληρωμένη απόφαση.

Επιπλέον είναι σύνηθες φαινόμενο κατά τη φάση λήψης μιας απόφασης τα δεδομένα του προβλήματος να μην είναι γνωστά με απόλυτη βεβαιότητα. Κάτι που μπορεί να συμβαίνει λόγω έλλειψης πληροφορίας ή γιατί τα δεδομένα εξαρτώνται από παραμέτρους που δεν μπορούν να προβλεφθούν μετά βεβαιότητας, που είναι και η πιο συχνή περίπτωση. Σε αυτές τις περιπτώσεις είναι απαραίτητο να γίνεται ανάλυση της ευστάθειας, ώστε να προσδιορίζεται κατά πόσο μια λύση είναι ευαίσθητη σε μεταβολές των παραμέτρων του προβλήματος.

Στον τομέα του ενεργειακού σχεδιασμού μια συνηθισμένη προσέγγιση για να αντιμετωπιστούν οι παραπάνω προκλήσεις αποτελεί η σύγχρονη Θεωρία Χαρτοφυλακίου.

Το παρόν θέμα της διπλωματικής εργασίας επικεντρώνεται στη μελέτη της ευρωστίας βέλτιστων χαρτοφυλακίων ενεργειακών τεχνολογιών εφαρμόζοντας πολυστοχικό προγραμματισμό υπό το πρίσμα διαφορετικών ντετερμινιστικών σεναρίων.

Συγκεκριμένα μέσω του περιβάλλοντος GAMS χρησιμοποιείται ένα μοντέλο γραμμικού προγραμματισμού προκειμένου να υπολογιστούν τα βέλτιστα χαρτοφυλάκια ενεργειακών τεχνολογιών. Επιπρόσθετα, χρησιμοποιείται πολυστοχικός προγραμματισμός με σκοπό την αντιμετώπιση της αβεβαιότητας του προβλήματος βελτιστοποίησης των τεχνολογιών. Συμπληρωματικά, εξετάζεται και η ευστάθεια του προβλήματος συγκρίνοντας εύρωστα βέλτιστα χαρτοφυλάκια μεταξύ διαφορετικών σεναρίων.

3. Μεθοδολογικό υπόβαθρο

3.1. Θεωρία χαρτοφυλακίου και εφαρμογές στην ενέργεια

Ένα από τα κυριότερα προβλήματα της χρηματοοικονομικής είναι η αξιολόγηση αποφάσεων επενδύσεων σε συνθήκες κινδύνου και αβεβαιότητας. Η επένδυση μπορεί να οριστεί ως μια δέσμευση κεφαλαίων για ένα χρονικό διάστημα, η οποία αναμένεται να αποφέρει πρόσθετα κεφάλαια στον επενδυτή. Κάθε επένδυση απαιτεί να αποφύγει ο επενδυτής να καταναλώσει κεφάλαια του, προκειμένου να επιδιώξει μια αβέβαιη μελλοντική ωφέλεια. Άρα κάθε επένδυση σε κάποιο βαθμό ενέχει κίνδυνο. Η διαδικασία της επένδυσης σε χρεόγραφα μπορεί να διαιρεθεί σε δυο μέρη: στην ανάλυση χρεογράφων και στη διαχείριση χαρτοφυλακίου.

Το σύνολο των περιουσιακών στοιχείων ή των χρεογράφων που έχουμε στην κατοχή μας, λέγεται χαρτοφυλάκιο. Η Θεωρία Χαρτοφυλακίου εξετάζει τις ιδιότητες των διαφόρων περιουσιακών στοιχείων, ή επενδυτικών επιλογών, που μπορεί να έχει στη διάθεσή του ένας επενδυτής κι επιδιώκει την σύνθεση αρίστων χαρτοφυλακίων, που να μεγιστοποιούν την απόδοσή τους και να ελαχιστοποιούν τον κίνδυνό τους, ικανοποιώντας τον σκοπό κάθε ορθολογικού επενδυτή.

Εάν όλες οι συνθήκες της αγοράς ήταν τέλειες, δηλαδή να υπήρχε πλήρης βεβαιότητα, οπότε το επιτόκιο χορηγήσεων και καταθέσεων να ήταν το ίδιο, να μην υπήρχαν φόροι, το κόστος πληροφόρησης να ήταν μηδενικό, και οι πληροφορίες να ήταν διαθέσιμες σε όλους, τότε θα μιλούσαμε για Τέλεια Αγορά (Perfect Market). Το γεγονός όμως ότι η αγορά δεν είναι τόσο τέλεια, αποτελεί έναν λόγο για τον οποίο είναι απαραίτητη η μελέτη της Θεωρίας Χαρτοφυλακίου.

Για την επίτευξη του στόχου ενός ορθολογικού επενδυτή θα πρέπει να μειωθεί ο κίνδυνος του χαρτοφυλακίου χωρίς να μειωθεί η απόδοση. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με την διαφοροποίηση χαρτοφυλακίου, δηλαδή την επενδυτική στρατηγική κατά την οποία συγκεντρώνουμε μια ποικιλία χρεογράφων (ή περιουσιακών στοιχείων) στο χαρτοφυλάκιο, με διαφορετικές αποδόσεις, διαφορετικές συσχετίσεις μεταξύ των αποδόσεων τους και διαφορετικά επίπεδα κινδύνου, με αντικειμενικό στόχο να μειωθεί ο συνολικός κίνδυνος του χαρτοφυλακίου χωρίς να μειωθεί η απόδοση.

Συγκεκριμένα, στο πλαίσιο της θεωρίας επενδύσεων χαρτοφυλακίου οι επενδυτές τοποθετούν το κεφάλαιό τους σε πολλά διαφορετικά περιουσιακά στοιχεία με σκοπό τη μεγιστοποίηση της απόδοσης και την ελαχιστοποίηση του κινδύνου, ή την επίτευξη ενός συνδυασμού απόδοσης-κινδύνου κατάλληλου για της ανάγκες κάθε συγκεκριμένου επενδυτή.

ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΧΑΡΤΟΦΥΛΑΚΙΟΥ ΓΙΑ ΤΟΝ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟ ΒΕΛΤΙΣΤΩΝ
ΧΑΡΤΟΦΥΛΑΚΙΩΝ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΩΝ ΥΠΟ ΤΟ ΠΡΙΣΜΑ ΣΤΟΧΑΣΤΙΚΗΣ ΚΑΙ ΝΤΕΤΕΡΜΙΝΙΣΤΙΚΗΣ
ΑΒΕΒΑΙΟΤΗΤΑΣ

Η θεωρία χαρτοφυλακίου βασίζεται στην εργασία του Harry Markowitz που αφορούσε στον καθορισμό του άριστου χαρτοφυλακίου. Με τον όρο διαχείριση χαρτοφυλακίου εννοούμε τις απαραίτητες ενέργειες που ο κάθε επενδυτής πρέπει να πραγματοποιήσει, για κάθε χαρτοφυλάκιο που δημιουργεί, έτσι ώστε να διασφαλιστεί το κεφάλαιο το οποίο έχει επενδυθεί. Ορίζεται ως η διαδικασία συνδυασμού διαφόρων χρεογράφων σε ένα χαρτοφυλάκιο, το οποίο δημιουργείται ανάλογα από τις ανάγκες του κάθε επενδυτή, η παρακολούθηση του χαρτοφυλακίου αυτού και η αποτίμηση της απόδοσης του.

Το μοντέλο Markowitz, παρά τις όποιες αδυναμίες του, αποτέλεσε τη βάση για τη λεγόμενη "Σύγχρονη Θεωρία Χαρτοφυλακίου". Μια δημοσίευση στην εφημερίδα "Journal of Finance" το 1952 τάραξε τα νερά στο χώρο της διαχείρισης χαρτοφυλακίου και δημιούργησε μια νέα εποχή και ένα νέο τρόπο σκέψης στην χρηματιστηριακή πρακτική. Ο H. Markowitz κατέληξε σε κάποια συμπεράσματα τα οποία αποτέλεσαν την ύλη του βιβλίου του που εκδόθηκε το 1959 και είχε τίτλο "Portfolio Selection".

Ο H. Markowitz παρουσίασε ένα υπόδειγμα (μοντέλο) κατασκευής αποτελεσματικών χαρτοφυλακίων. Βασική ιδέα του μοντέλου είναι η επιλογή ενός «άριστου» χαρτοφυλακίου που αποτελείται από μετοχές ή από άλλες επενδύσεις που εμπεριέχουν κίνδυνο, το οποίο προσφέρει στον επενδυτή την καλύτερη δυνατή σχέση κινδύνου –απόδοσης. Σύμφωνα με το Markowitz ο μέσος επενδυτής, προσπαθεί και να μεγιστοποιήσει την αναμενόμενη απόδοση και να ελαχιστοποιήσει τον κίνδυνο.

Η διαμόρφωση ενός προβλήματος δημιουργίας πολιτικής για το κλίμα συνήθως περιλαμβάνει τρία στάδια, σύμφωνα με τον Markowitz (1952). Την επιλογή του βέλτιστου χαρτοφυλακίου προϋποθέτει την πραγματοποίηση πιθανοτικών εκτιμήσεων για τη μελλοντική απόδοση των διαθέσιμων επιλογών, τον προσδιορισμό ενός αποτελεσματικού συνόλου χαρτοφυλακίων μέσω της ανάλυσης αυτών των εκτιμήσεων και τέλος την επιλογή ενός ενιαίου χαρτοφυλακίου που ταιριάζει καλύτερα στις προτιμήσεις του επενδυτή. Αν και η ανάλυση χαρτοφυλακίου αντιστοιχεί στη δεύτερη φάση αυτής της διαδικασίας, η διαμόρφωση ενός προβλήματος πολιτικής για το κλίμα στο εν λόγω πλαίσιο συνήθως συνεπάγεται πρόσθετες προσπάθειες και στα τρία στάδια που αναφέρθηκαν.

Μπορεί οι επενδύσεις στον τομέα της ενέργειας να έχουν αποτελέσει αντικείμενο έρευνας πολύ πριν την κλιματική πολιτική, όμως παρουσιάζεται στη βιβλιογραφία επενδυτικά χαρτοφυλάκια για τη βελτιστοποίηση του συνδυασμού παραγωγής ενέργειας (π.χ. Bar-Lev και Kratz, 1976 ή Zhu and Fan, 2010) ή συνδυασμού ενέργειας (π.χ. Pugh et al., 2011) μιας χώρας ή μιας περιφέρειας. Μεταξύ αυτών των μελετών, πολλοί άλλοι επικεντρώθηκαν στις αγορές ηλεκτρικής ενέργειας (π.χ., Zon and Fuss, 2006, Siddiqui κ. ά., 2016 ή Cucchiella κ. ά., 2017) ενώ άλλοι αποσκοπούσαν στην προώθηση και περαιτέρω διάδοση της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, (Albrecht, 2007 και Awerbuch, 2000), καθώς και αιολική ενέργεια (Adabi et al., 2016, Santos-Alamillos et al., 2017) και βιομάζα (Lintunen και Uusivuori, 2016). Επιπλέον, η εστίαση ορισμένων από αυτές τις μελέτες ανάλυσης χαρτοφυλακίων δεν περιοριζόταν στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, αλλά συμπεριέλαβε την αξιολόγηση των επενδύσεων έρευνας και ανάπτυξης σε ενεργειακές τεχνολογίες (π.χ. Baker and Solak, 2011 and Lemoine et al., 2012) μέτρα σχετικά με τις εκπομπές (Aresano et al., 2012 and Flues et al., 2014), ή μέτρα και τεχνολογίες σε τομείς έντονα συνδεδεμένους με τον τομέα της ενέργειας, όπως η ενεργειακή απόδοση στα κτίρια (Westner and Madlener, 2010 και Shakouri et al. 2015) ή τα καύσιμα μεταφοράς (Marrero et al., 2015) και τις αντίστοιχες τεχνολογίες. Αξίζει να σημειωθεί ότι υπάρχουν δύο κύριες προσεγγίσεις για την ανάπτυξη χαρτοφυλακίων στις αναλύσεις που αφορούν την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας: χαρτοφυλάκια με βάση την χωρητικότητα και χαρτοφυλάκια με βάση την ενέργεια. Όπως παρατήρησε ο Jansen et al. (2008), ενώ το πρώτο μπορεί να φαίνεται πιο κοντά στην έννοια των περιουσιακών στοιχείων του χαρτοφυλακίου και συνεπώς διαισθητικά ελκυστικό, τα τελευταία είναι πιο ρεαλιστικά, δεδομένου ότι η εγκατεστημένη ισχύς τείνει να ποικίλλει μεταξύ των χαρτοφυλακίων που πρέπει να ικανοποιούν μια συγκεκριμένη ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας.

Εκτός από τους Lemoine et al. (2016), οι οποίοι εξετάζουν διαφορετικές επιλογές έρευνας και ανάπτυξης και αντίστοιχα μέσα πολιτικής για ένα δυναμικό χαρτοφυλάκιο μείωσης, ο Luo και ο Wu (2016), οι οποίοι εξετάζουν την παγκόσμια αγορά εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα και οι Romejko & Nakano (2017), οι οποίοι επικεντρώνονται στα εναλλακτικά καύσιμα τα μοναδικά πεδία εφαρμογής που έχουν μελετηθεί χωρίς να εξεταστεί ο τομέας της ενέργειας είναι η περιβαλλοντική διαχείριση και ο τομέας της γεωργίας και της δασοκομίας σε διάφορες εφαρμογές. Συγκεκριμένα, οι Crowe και Parker (2008) χρησιμοποιούν ανάλυση χαρτοφυλακίων για να επιλέξουν ένα βέλτιστο σύνολο πηγών σπόρων προς αναγέννηση των δασών λευκής ερυθρελάτης με τρόπο ανθεκτικό στο κλίμα. Οι Mitter et al. (2015) προσπαθούν να ποσοτικοποιήσουν τις επιπτώσεις της αλλαγής του κλίματος στην ευάλωτη γεωργική κατάσταση και να αναπτύξουν αξιόπιστα χαρτοφυλάκια φυτικής παραγωγής αναλύοντας την επίδραση των πολιτικών προσαρμογής στη γεωργία. Οι Seo και Mendelsohn (2007) εξετάζουν τον τρόπο με τον οποίο οι αγρότες επιλέγουν το ζωικό τους κεφάλαιο βάσει διαφορετικών τοποθεσιών στην Αφρική. Ενώ οι Lintunen και Uusivuori (2016) αναζητούν το βέλτιστο χαρτοφυλάκιο μέτρων μετριασμού που ρυθμίζει τις ροές άνθρακα των δασών, εξετάζοντας

ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΧΑΡΤΟΦΥΛΑΚΙΟΥ ΓΙΑ ΤΟΝ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟ ΒΕΛΤΙΣΤΩΝ
ΧΑΡΤΟΦΥΛΑΚΙΩΝ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΩΝ ΥΠΟ ΤΟ ΠΡΙΣΜΑ ΣΤΟΧΑΣΤΙΚΗΣ ΚΑΙ ΝΤΕΤΕΡΜΙΝΙΣΤΙΚΗΣ
ΑΒΕΒΑΙΟΤΗΤΑΣ

ταυτόχρονα την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από βιομάζα. Είναι ενδιαφέρον το γεγονός ότι όλες οι εφαρμογές ανάλυσης χαρτοφυλακίων περιβαλλοντικού ενδιαφέροντος επικεντρώθηκαν στο νερό (Marinon et al., 2011, και Buurman & Babovic, 2016) και στους υπόγειους υδάτινους πόρους (Hua et al., 2015). Ανεξάρτητα από τον τομέα εφαρμογής τους, οι μελέτες αναφέρονται ρητά στον μετριασμό της κλιματικής αλλαγής ή στην προσαρμογή σε αυτή ως μέρος του πεδίου μελέτης, χρησιμοποιώντας μια συνάρτηση χρησιμότητας που σχετίζεται με τις εκπομπές ή αξιολογώντας τα μέσα, τα μέτρα ή τις επενδύσεις στην πολιτική για το κλίμα. Ενώ οι υπόλοιποι εμπλέκονται εμμέσως με την πολιτική για το κλίμα, μέσω περιορισμών που σχετίζονται με το περιβάλλον και το κλίμα, μόνο ο Pugh et al.(2011) υιοθέτησε μια διατομεακή προσέγγιση αναζητώντας ένα βέλτιστο χαρτοφυλάκιο επενδύσεων στους τομείς των μεταφορών, των κτιρίων, της βιομηχανίας και της ενέργειας, συμπεριλαμβανομένων των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, της πυρηνικής ενέργειας και της δέσμευσης και αποθήκευσης άνθρακα.

3.2. Πολυκριτηριακός Μαθηματικός Προγραμματισμός

Η Επιχειρησιακή Έρευνα είναι το επιστημονικό πεδίο που έχει ως σκοπό να μελετήσει, να μοντελοποιήσει και να προτείνει τις καλύτερες δυνατές (βέλτιστες) λύσεις σε πολύπλοκα προβλήματα σχεδιασμού και λειτουργίας συστημάτων. Ένας από τους βασικότερους τομείς της Επιχειρησιακής Έρευνας είναι ο Μαθηματικός Προγραμματισμός, όπου το υπό εξέταση σύστημα περιγράφεται από ένα μαθηματικό μοντέλο που περιλαμβάνει μία ή περισσότερες αντικειμενικές συναρτήσεις (κριτήρια βελτιστοποίησης) και συγκεκριμένους περιορισμούς που εκφράζονται με μαθηματικές σχέσεις. Βασικό χαρακτηριστικό των πρώτων μεθόδων επιχειρησιακής έρευνας ήταν η επίλυση των προβλημάτων και η λήψη αποφάσεων επιδιώκοντας την εύρεση της βέλτιστης λύσης.

Τα βασικά συστατικά ενός προβλήματος μαθηματικού προγραμματισμού είναι τα ακόλουθα:

Μεταβλητές απόφασης: Εκφράζουν ουσιαστικά τους αγνώστους του προβλήματος και είναι οι μεταβλητές που ελέγχει ο αποφασίζων, δηλ. εκείνες των οποίων τις τιμές μπορεί να καθορίσει. Το σύνολο των μεταβλητών απόφασης αποτελεί ουσιαστικά το αντικείμενο της διαδικασίας λήψης απόφασης. Η διαδικασία βελτιστοποίησης αποσκοπεί στο να βρεθούν οι τιμές εκείνες για τις μεταβλητές απόφασης οι οποίες βελτιστοποιούν την αντικειμενική συνάρτηση.

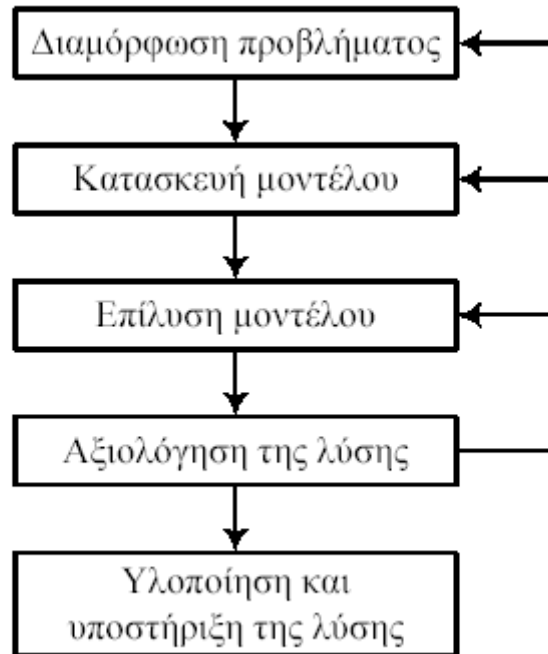
Αντικειμενική συνάρτηση: Αποτελεί τη μαθηματική σχέση των μεταβλητών απόφασης που εκφράζει το κριτήριο βελτιστοποίησης. Επιδιώκεται είτε η ελαχιστοποίηση είτε η μεγιστοποίηση της τιμής της αντικειμενικής συνάρτησης. Στα προβλήματα πολυκριτηριακού μαθηματικού προγραμματισμού (multiobjective mathematical programming) υπάρχουν περισσότερες από μία αντικειμενικές συναρτήσεις (κριτήρια απόφασης), για αυτό και τα προβλήματα αυτά αναφέρονται και ως προβλήματα διανυσματικής βελτιστοποίησης (vector optimization).

Περιορισμοί: Είναι οι μαθηματικές σχέσεις που καθορίζουν τις τιμές που μπορούν να πάρουν οι μεταβλητές απόφασης στη διαδικασία της βελτιστοποίησης. Καθορίζουν δηλαδή το πεδίο ορισμού (εφικτό χώρο) του προβλήματος. Οι περιορισμοί μπορεί να είναι ισότητες ή ανισοεξισώσεις.

Παράμετροι: Είναι τα εξωγενώς οριζόμενα (εκτός του ελέγχου του αποφασίζοντος) μεγέθη του προβλήματος. Πρόκειται ουσιαστικά για τους γνωστούς όρους του προβλήματος οι οποίοι έχουν σταθερή τιμή στη διαδικασία βελτιστοποίησης. Συνήθως είναι συντελεστές των μεταβλητών απόφασης ή εκφράζουν ποσότητες απαραίτητες στη διαμόρφωση των περιορισμών (π.χ. την απαιτούμενη ζήτηση μιας δραστηριότητας).

ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΧΑΡΤΟΦΥΛΑΚΙΟΥ ΓΙΑ ΤΟΝ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟ ΒΕΛΤΙΣΤΩΝ
ΧΑΡΤΟΦΥΛΑΚΙΩΝ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΩΝ ΥΠΟ ΤΟ ΠΡΙΣΜΑ ΣΤΟΧΑΣΤΙΚΗΣ ΚΑΙ ΝΤΕΤΕΡΜΙΝΙΣΤΙΚΗΣ
ΑΒΕΒΑΙΟΤΗΤΑΣ

Το μεθοδολογικό πλαίσιο της επιχειρησιακής έρευνας στην ‘παραδοσιακή’ του μορφή όπως αναφέρεται στην βιβλιογραφία, φαίνεται στο Σχήμα 3.1.



Σχήμα 3.1: Μεθοδολογικό πλαίσιο επιχειρησιακής έρευνας

Στο πρώτο στάδιο πραγματοποιείται η διαμόρφωση του προβλήματος, που περιλαμβάνει τον καθορισμό των μεταβλητών απόφασης (decision variables), τον προσδιορισμό του στόχου του προβλήματος (objective) και τον προσδιορισμό του χώρου των εφικτών λύσεων (feasible solutions). Το δεύτερο στάδιο αφορά την κατασκευή του κατάλληλου μοντέλου που περιγράφει το πρόβλημα. Ως μοντέλο ορίζεται η μαθηματική αναπαράσταση του προβλήματος που αποτυπώνει όλες τις μεταβλητές απόφασης, τους στόχους και τους περιορισμούς, και η κατασκευή του βασίζεται σε κάποιες υποθέσεις, οι οποίες όσο πιο ρεαλιστικές είναι τόσο αυξάνεται η πιθανότητα το μοντέλο να συμβάλει με επιτυχία στην αντιμετώπιση του προβλήματος που ερευνάται. Το τρίτο στάδιο, αφορά την επίλυση του μοντέλου με την κατάλληλη μαθηματική μέθοδο έτσι ώστε να προσδιοριστούν οι τιμές των μεταβλητών απόφασης οι οποίες αντιστοιχούν σε μία εφικτή λύση που βελτιστοποιεί τον στόχο του προβλήματος. Η επόμενη φάση ερευνά την ποιότητα της λύσης (ευαισθησία, ευστάθεια κλπ) σε συνάρτηση με τις παραμέτρους του μοντέλου, τις υποθέσεις και των δεδομένων του

προβλήματος. Τέλος, στο τελευταίο στάδιο περιλαμβάνεται η υλοποίηση της λύσης και η υποστήριξη – αιτιολόγηση της σε περίπτωση που χρειαστεί .

Η λήψη αποφάσεων με το ‘παραδοσιακό’ μεθοδολογικό πλαίσιο παρουσιάζει διάφορα προβλήματα, βασικότερα χαρακτηριστικά των οποίων είναι :

- Η ύπαρξη πολλαπλών κριτηρίων οδηγεί σε αντικρουόμενα αποτελέσματα, καθώς η επιλογή που θεωρείται ως βέλτιστη με βάση ένα κριτήριο δεν είναι απαραίτητα βέλτιστη και σε σχέση με τα υπόλοιπα κριτήρια της ανάλυσης.
- Δεδομένης της αντικρουόμενης φύσης των κριτηρίων δεν είναι δυνατός ο εντοπισμός μίας βέλτιστης λύσης.
- Η επιλογή της κατάλληλης λύσης είναι υποκειμενική και βασίζεται στην πολιτική λήψης αποφάσεων που ακολουθεί αυτός που αποφασίζει.

Οι πρακτικές εφαρμογές του μαθηματικού προγραμματισμού με ένα κριτήριο είναι χιλιάδες τα τελευταία χρόνια. Όμως γίνεται όλο και πιο εμφανές ότι η λήψη αποφάσεων με ένα και μόνο κριτήριο δεν μπορεί να αντικατοπτρίσει την πολυπλοκότητα της σημερινής εποχής. Έτσι όλο και περισσότερο γίνεται λήψη αποφάσεων με πολλαπλά κριτήρια με σκοπό την εύρεση λύσεων που ανταποκρίνονται στην πραγματικότητα.

Ο Πολυκριτηριακός (γραμμικός) προγραμματισμός ή πολυστοχικός προγραμματισμός αποτελεί επέκταση του γραμμικού προγραμματισμού και περιλαμβάνει την λήψη αποφάσεων με την επίλυση μοντέλων μαθηματικού προγραμματισμού με περισσότερες από μια αντικειμενικές συναρτήσεις. Με αυτόν τον τρόπο γίνεται δυνατή η πιο σφαιρική αντιμετώπιση οποιουδήποτε προβλήματος αφού λαμβάνονται υπόψη περισσότερα του ενός κριτήρια αξιολόγησης. Η επίλυση των προβλημάτων πολυκριτηριακού γραμμικού προγραμματισμού είναι αρκετά πιο περίπλοκη σε σχέση με τα αντίστοιχα προβλήματα γραμμικού προγραμματισμού και εμπλέκουν άμεσα τον αποφασίζοντα στη διαδικασία λήψης της απόφασης.

Το βασικότερο χαρακτηριστικό των προβλημάτων Πολυκριτηριακού Γραμμικού προγραμματισμού είναι ότι δεν υπάρχει μια βέλτιστη λύση η οποία προκύπτει από την διαδικασία επίλυσης όπως στον Γραμμικό Προγραμματισμό, αλλά ένα σύνολο από ικανές λύσεις μεταξύ των οποίων καλείται να επιλέξει ο αποφασίζων την καλύτερη σύμφωνα με τις προτιμήσεις του. Στα προβλήματα με ένα μόνο κριτήριο απόφασης, ο αποφασίζων συμμετέχει μόνο κατά το στάδιο της μορφοποίησης του προβλήματος. Αφού καθορίσει το κριτήριο απόφασης, η επίλυση του προβλήματος γίνεται χωρίς την περαιτέρω ανάμιξή του στη διαδικασία λήψης απόφασης. Για αυτό υποστηρίζεται ότι τα μονοκριτηριακά προβλήματα ουσιαστικά δεν είναι προβλήματα λήψης απόφασης, αλλά προβλήματα υπολογισμού της βέλτιστης λύσης με βάση το μοναδικό κριτήριο απόφασης (Zeleny 1982). Αυτό δεν συμβαίνει στην Πολυκριτηριακή Λήψη Αποφάσεων (ΠΚΛΑ) όπου η συμμετοχή του αποφασίζοντα στη

διαδικασία επίλυσης είναι απαραίτητη ώστε να εκφράσει τις προτιμήσεις του σε σχέση με τις επιδόσεις των εναλλακτικών επιλογών στα εξεταζόμενα κριτήρια και να καταλήξει στην τελική του απόφαση. Αν υπάρχει κάποια εναλλακτική επιλογή που να έχει την καλύτερη επίδοση ως προς όλα τα κριτήρια τότε η λύση του προβλήματος είναι προφανής. Αυτό όμως σπάνια συμβαίνει γιατί τα κριτήρια απόφασης είναι συνήθως αλληλοσυγκρουόμενα εκφράζοντας διαφορετικά χαρακτηριστικά των εναλλακτικών επιλογών.

Τα προβλήματα της ΠΚΛΑ είναι χαμηλού βαθμού δόμησης (ill structured problems), δηλαδή η ορθολογική λύση δεν καθορίζεται από το ίδιο το πρόβλημα (όπως όταν υπάρχει μόνο ένα κριτήριο απόφασης) αλλά αποτελεί αντικείμενο αναζήτησης με την άμεση εμπλοκή του αποφασίζοντα στη διαδικασία αυτή, ο οποίος εκφράζει τις υποκειμενικές του προτιμήσεις. Για αυτό το λόγο, οι μέθοδοι αντιμετώπισης τέτοιων προβλημάτων ορίζονται (Roy, 1985) και ως μέθοδοι πολυκριτηριακής υποστήριξης αποφάσεων (Multiple Criteria Decision Aid, MCDA).

Όταν το σύνολο των εναλλακτικών επιλογών είναι διακριτό και ρητά καθορισμένο με συγκεκριμένες επιλογές που χαρακτηρίζονται από την επίδοσή τους σε κάποια κριτήρια, τότε το πρόβλημα χαρακτηρίζεται ως πρόβλημα Πολυκριτηριακής Ανάλυσης – ΠΚΑ (Multiple Attribute Decision Making, MADM).

Αντίθετα, όταν το σύνολο των δυνατών επιλογών δεν δίδεται ρητά αλλά έμμεσα μέσω των τιμών των μεταβλητών απόφασης ενός προβλήματος μαθηματικού προγραμματισμού, τότε το πρόβλημα ανήκει στον Πολυκριτηριακό Μαθηματικό Προγραμματισμό –ΠΚΜΠ (Multiple Objective Mathematical Programming, MOMP). Οι μαθηματικές σχέσεις μεταξύ των μεταβλητών απόφασης που πρέπει να ικανοποιούνται αποτελούν τους περιορισμούς του προβλήματος, ενώ οι συναρτήσεις εκείνες των μεταβλητών απόφασης που πρέπει να βελτιστοποιηθούν ονομάζονται αντικειμενικές συναρτήσεις. Με τον όρο λύση του προβλήματος εννοείται κάθε συνδυασμός τιμών που μπορούν να λάβουν οι μεταβλητές απόφασης. Ο ΠΚΜΠ επιλύει το πρόβλημα της διανυσματικής βελτιστοποίησης (vector optimization) που αποτελεί μία επέκταση της βαθμωτής βελτιστοποίησης (scalar optimization) με την οποία ασχολείται ο συμβατικός Μαθηματικός Προγραμματισμός με μία αντικειμενική συνάρτηση.

Η εισαγωγή πολλών αντικειμενικών συναρτήσεων σ' ένα πρόβλημα ΓΠ δημιουργεί το πρόβλημα της γραμμικής διανυσματικής μεγιστοποίησης (linear vector maximum problem). Με τον όρο μεγιστοποίηση εννοείται γενικότερα η βελτιστοποίηση αφού και η ελαχιστοποίηση μπορεί εύκολα να μετατραπεί σε μεγιστοποίηση με αλλαγή προσήμου. Η ανάλυση των προβλημάτων αυτών αποτελεί το αντικείμενο του ΠΚΓΠ. Το πρόβλημα του ΠΚΓΠ μαθηματικά ορίζεται ως εξής:

ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΧΑΡΤΟΦΥΛΑΚΙΟΥ ΓΙΑ ΤΟΝ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟ ΒΕΛΤΙΣΤΩΝ
ΧΑΡΤΟΦΥΛΑΚΙΩΝ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΩΝ ΥΠΟ ΤΟ ΠΡΙΣΜΑ ΣΤΟΧΑΣΤΙΚΗΣ ΚΑΙ ΝΤΕΤΕΡΜΙΝΙΣΤΙΚΗΣ
ΑΒΕΒΑΙΟΤΗΤΑΣ

$$\begin{aligned} \max \{ \mathbf{c1} \mathbf{x} = z1 \} \\ \max \{ \mathbf{c2} \mathbf{x} = z2 \} \\ \dots \dots \dots (1) \\ \max \{ \mathbf{cp} \mathbf{x} = zp \} \\ \text{s.t. } \mathbf{x} \in S = \{ \mathbf{x} \in R^n \mid \mathbf{Ax} = \mathbf{b}, \mathbf{x} \geq \mathbf{0}, \mathbf{b} \in R^m \} \end{aligned}$$

όπου:

S : το εφικτό χωρίο των περιορισμών

n : ο αριθμός των μεταβλητών

m : ο αριθμός των περιορισμών

p : ο αριθμός των αντικειμενικών συναρτήσεων

\mathbf{c}^i : το διάνυσμα γραμμής των συντελεστών της 'i' αντικειμενικής συνάρτησης

z_i : η τιμή της 'i' αντικειμενικής συνάρτησης

\mathbf{A} : η μήτρα ($m \times n$) των τεχνολογικών συντελεστών

\mathbf{b} : το διάνυσμα ($m \times 1$) των σταθερών όρων (δεξί σκέλος περιορισμών)

\mathbf{x} : το διάνυσμα ($n \times 1$) των μεταβλητών απόφασης

Οι μεταβλητές απόφασης εκφράζουν τα μεγέθη εκείνα του προβλήματος για τα οποία πρέπει να υπολογιστούν οι τιμές τους. Τα ήδη γνωστά μεγέθη του προβλήματος (μήτρα \mathbf{A} , διανύσματα \mathbf{b} και \mathbf{c}^i) ονομάζονται και παράμετροι του προβλήματος. Οι αντικειμενικές συναρτήσεις είναι συναρτήσεις των μεταβλητών απόφασης, των οποίων επιδιώκεται η βελτιστοποίηση (μεγιστοποίηση ή ελαχιστοποίηση). Οι περιορισμοί είναι οι διάφορες σχέσεις (ισότητες ή ανισότητες) που πρέπει να πληρούν οι μεταβλητές απόφασης σύμφωνα με το πρόβλημα και οριοθετούν το εφικτό χωρίο S . Με τον όρο λύση ενός προβλήματος ΠΚΓΠ ή ΓΠ, εννοείται ο συνδυασμός των τιμών που λαμβάνουν οι μεταβλητές απόφασης. Αν η λύση αυτή ανήκει στο S (οι τιμές των μεταβλητών απόφασης ικανοποιούν τους περιορισμούς) τότε πρόκειται για εφικτή λύση του προβλήματος αλλιώς χαρακτηρίζεται ως μη εφικτή λύση.

Σε αντίθεση με τον ΓΠ όπου η διαδικασία επίλυσης επικεντρώνεται στην εξέταση του χώρου των μεταβλητών απόφασης R_n , στον ΠΚΓΠ έχει ιδιαίτερη σημασία ο χώρος των αντικειμενικών συναρτήσεων R_p . Αυτό συμβαίνει διότι η διαδικασία επίλυσης στα προβλήματα του ΠΚΓΠ αφορά την εξέταση των τιμών των αντικειμενικών συναρτήσεων που

προκύπτουν από κάθε λύση. Συνεπώς, είναι αρκετά βοηθητική η απεικόνιση του προβλήματος στο χώρο των αντικειμενικών συναρτήσεων R^p αντί του χώρου των μεταβλητών απόφασης R^n . Εξ' άλλου, το p , δηλαδή ο αριθμός των αντικειμενικών συναρτήσεων, είναι συνήθως πολύ μικρότερο του n που εκφράζει το πλήθος των μεταβλητών απόφασης, κι έτσι η γραφική απεικόνιση της κατάστασης του προβλήματος είναι πιο εύκολη. Στα προβλήματα ΠΚΓΠ, επειδή υπάρχουν περισσότερες από μία αλληλοσυγκρουόμενες αντικειμενικές συναρτήσεις, δεν υπάρχει μία λύση που να τις βελτιστοποιεί συγχρόνως όλες. Η έννοια λοιπόν της άριστης λύσης του ΓΠ αντικαθίσταται στον ΠΚΓΠ από αυτήν της ικανής λύσης.

Ικανή λύση (efficient, non-dominated solution):

Μία λύση x' ενός προβλήματος Πολυκριτηριακού Γραμμικού Προγραμματισμού λέγεται ικανή (ή κατά Pareto άριστη, ή αποτελεσματική ή πιο σύντομα λύση Pareto) αν και μόνο αν $x' \in S$ και δεν υπάρχει άλλη λύση $x \in S$ τέτοια ώστε $f_i(x) \geq f_i(x')$ για κάθε $i=1,2,\dots,p$ και $f_i(x) > f_i(x')$ για τουλάχιστον ένα i .

Με απλά λόγια μια κατά Pareto άριστη λύση δεν είναι αντικειμενικά χειρότερη από καμία άλλη εφικτή λύση του προβλήματος. Επίσης, κάθε κατά Pareto άριστη λύση αντιστοιχεί σε ένα μη βελτιώσιμο διάνυσμα στο χώρο των αντικειμενικών συναρτήσεων, με την έννοια ότι δεν μπορούμε να βελτιώσουμε την τιμή μιας αντικειμενικής συνάρτησης χωρίς να χειροτερεύσουμε τουλάχιστον μία από τις άλλες. Ο όρος κατά Pareto άριστη λύση χρησιμοποιείται επίσης για να εκφράσει και το αντίστοιχο διάνυσμα τιμών των κριτηρίων $z' = (f_1(x'), \dots, f_p(x'))$ στο χώρο των αντικειμενικών συναρτήσεων R^p . Όταν υπάρχει λύση $x \in S$ τέτοια ώστε $f_i(x) \geq f_i(x')$ για $i = 1, 2, \dots, p$ με τουλάχιστον μία αυστηρή ανισότητα τότε η λύση x υπερτερεί (dominates) της x' και η x' κυριαρχείται από την x . Το σύνολο των κατά Pareto άριστων λύσεων ορίζεται ως το σύνολο Pareto (Pareto set).

Όπως είναι κατανοητό, οι λύσεις που ενδιαφέρουν τον αποφασίζοντα στη διαδικασία εύρεσης της προτιμότερης λύσης είναι οι λύσεις που περιλαμβάνονται στο σύνολο Pareto.

Αντικειμενικός σκοπός της επίλυσης των προβλημάτων Πολυκριτηριακού Γραμμικού 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 προβλήματος Πολυκριτηριακού Γραμμικού Προγραμματισμού αποδεκτή είναι να πρόκειται για ικανή λύση.

3.3. Μέθοδοι επίλυσης Πολυκριτηριακού Γραμμικού Προγραμματισμού

Ενώ στον απλό ΓΠ καθιερώθηκε ως βασική μέθοδος επίλυσης η μέθοδος Simplex, που ανακαλύφθηκε πριν από 50 σχεδόν χρόνια από τον Dantzig, στον ΠΓΠ δεν υπάρχει μία τεχνική που να δείχνει ότι επικράτησε με το πέρασμα των χρόνων. Αν και το βασικό υπολογιστικό υπόβαθρο όλων των τεχνικών ΠΓΠ απορρέει από τη μέθοδο Simplex (με τις διάφορες παραλλαγές της), εν τούτοις οι διάφορες μέθοδοι που έχουν αναπτυχθεί διαφέρουν μεταξύ τους (Μαυρωτάς, 2000). Αυτό οφείλεται κυρίως στο γεγονός ότι η επιλογή της μεθόδου εξαρτάται συνήθως τόσο από τα χαρακτηριστικά του προβλήματος (μέγεθος, είδος μεταβλητών κλπ), όσο και από τις απαιτήσεις και προτιμήσεις του αποφασίζοντα ο οποίος συμμετέχει ενεργά στη διαδικασία επίλυσης και εύρεσης της τελικής λύσης (Evans 1984, Shin and Ravidran 1991).

Οι διαφορές μεταξύ των μεθόδων προκύπτουν κυρίως από τους διαφορετικούς τρόπους εμπλοκής του αποφασίζοντα στη διαδικασία επίλυσης και από τη διαφορετική υποστήριξη αποφάσεων που παρέχουν. Έτσι λοιπόν, ένας αρκετά διαδεδομένος τρόπος ταξινόμησης των μεθόδων ΠΓΠ είναι ανάλογα με το στάδιο επίλυσης του προβλήματος από τον αναλυτή, στο οποίο εκφράζει τις προτιμήσεις του ο αποφασίζων (Hwang Masud 1979, Evans 1984). Η έκφραση της προτίμησης μπορεί να γίνεται πριν τη διαδικασία επίλυσης, κατά τη διάρκεια της διαδικασίας επίλυσης και τέλος, μετά την διαδικασία επίλυσης.

Έκφραση προτίμησης πριν την επίλυση (a priori)

Στην κατηγορία αυτή ανήκουν οι μέθοδοι ΠΚΓΠ στις οποίες ο αποφασίζων είναι σε θέση να συγκεκριμενοποιήσει απόλυτα τις προτιμήσεις του πριν τη διαδικασία επίλυσης. Αυτό γίνεται είτε καθορίζοντας a priori τη σημαντικότητα των κριτηρίων είτε καθορίζοντας κάποιες τιμές – στόχους για τα κριτήρια. Στην πρώτη περίπτωση βασίζεται η δημοφιλής **μέθοδος των σταθμισμένων βαρών (weighted sums approach)** όπου ο αποφασίζων αποδίδει σε κάθε κριτήριο – αντικειμενική συνάρτηση έναν συντελεστή βαρύτητας με τη μορφή μοναδιαίων παραχωρήσεων (trade offs). Στη σημαντικότητα των κριτηρίων βασίζεται και η μέθοδος του **συναινετικού προγραμματισμού (compromise programming)**, (Zeleny, 1973), που επιχειρεί να συνδυάσει τις αντικειμενικές συναρτήσεις σε μία ολική, με τη χρήση βαρών λ_i που κυμαίνονται μεταξύ (0,1) και το άθροισμά τους ισοδυναμεί με τη μονάδα. Από την άλλη, καθορισμό τιμών στόχων για τις αντικειμενικές συναρτήσεις περιλαμβάνει η **μέθοδος του προγραμματισμού στόχων (goal programming)**. Επίσης, στην κατηγορία των a priori μεθόδων ανήκει και η γνωστή αλλά απλοϊκή **λεξικογραφική βελτιστοποίηση**, η οποία συνήθως ενσωματώνεται σαν στάδιο επίλυσης κάποιας άλλης μεθόδου.

Έκφραση προτίμησης κατά τη διάρκεια της επίλυσης (interactive)

Οι μέθοδοι που ανήκουν στην κατηγορία αυτή ονομάζονται αλληλεπιδραστικές λόγω της άμεσης εμπλοκής και καθοδήγησης του αποφασίζοντα στη διαδικασία επίλυσης. Οι αλληλεπιδραστικές μέθοδοι χαρακτηρίζονται από φάσεις διαλόγου με τον αποφασίζοντα που εναλλάσσονται με φάσεις υπολογισμών από το πρόγραμμα. Είναι επαναληπτικές διαδικασίες όπου η αλληλεπίδραση μεταξύ αποφασίζοντα και μεθόδου συνεχίζεται μέχρι να ικανοποιηθεί κάποιο κριτήριο σύγκλισης και να βρεθεί η τελική λύση.

Χαρακτηριστικές μέθοδοι αυτής της κατηγορίας είναι η **μέθοδος STEM** (Step Method), (Benayoun et al., 1971), η **μέθοδος Zionts-Wallenius**, (Ziont and Wallenius, 1983) και η μέθοδος **Interval Criterion Weights**, (Steur, 1977), κ.α.

Έκφραση προτίμησης μετά την επίλυση (a posteriori)

Οι a posteriori μέθοδοι είναι οι λιγότερο δημοφιλείς εξαιτίας της υπολογιστικής προσπάθειας που απαιτούν (ο υπολογισμός των αποτελεσματικών λύσεων είναι συνήθως μια χρονοβόρα διαδικασία), καθώς και της έλλειψης ευρέως διαθέσιμου λογισμικού. Μάλιστα, για μεγάλα προβλήματα με εκατοντάδες περιορισμούς και μεταβλητές απόφασης ο αριθμός των ικανών λύσεων είναι τόσο μεγάλος που ο υπολογισμός τους καθίσταται υπολογιστικά ανέφικτος. Με την εξέλιξη όμως της ταχύτητας και της χωρητικότητας των σύγχρονων υπολογιστών όλο και μεγαλύτερα προβλήματα Πολυκριτηριακού Γραμμικού Προγραμματισμού μπορούν να επιλυθούν (Evans, 1984).

Η διαδικασία λύσης διαίρεται σε δύο φάσεις: Αρχικά, στην παραγωγή των αποδοτικών λύσεων και στη συνέχεια στην συμμετοχή του αποφασίζοντα όταν όλες οι πληροφορίες είναι έτοιμες για επεξεργασία. Ως εκ τούτου πλεονεκτούν, όταν ο αποφασίζων δεν είναι σχεδόν ποτέ διαθέσιμος και η αλληλεπίδραση μαζί του είναι δύσκολη, επειδή δραστηριοποιείται μόνο στο δεύτερο στάδιο, γνωρίζοντας όλες τις πιθανές εναλλακτικές (τις αποτελεσματικές λύσεις του Πολυκριτηριακού Μαθηματικού Προγραμματισμού). Εκτός αυτού, το γεγονός ότι καμία από τις πιθανές λύσεις δεν έχει μείνει άνευ επεξεργασίας, ενισχύει την εμπιστοσύνη του ιθύνοντος σχετικά με την τελική του απόφαση.

Οι μέθοδοι παραγωγής μπορούν να χωρισθούν σε δύο κατηγορίες: αυτές που παράγουν το σύνολο των ακραίων ικανών λύσεων και αυτές που προχωρούν λίγο παραπέρα, παράγοντας και τις ενδιάμεσες (μη ακραίες) ικανές λύσεις, που βρίσκονται στο εσωτερικό των εδρών ή των ακμών του ικανού συνόρου. Προαπαιτούμενο βέβαια 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 από τις ακραίες ικανές λύσεις οι οποίες αρκούν για τη διαδικασία λήψης απόφασης (Breslawski and Zionts, 1992). Υπάρχει όμως η δυνατότητα από την προτιμότερη ικανή ακραία λύση και τις γειτονικές της ακραίες ικανές

λύσεις να προκύψουν και οι ενδιάμεσες ικανές λύσεις τις οποίες μπορεί επίσης να εξετάσει ο αποφασίζων.

Πλεονέκτημα αυτών των μεθόδων είναι ότι προσδίδουν μεγαλύτερη εμπιστοσύνη στον αποφασίζων για την επιλογή του, καθώς του δίνονται όλες οι δυνατές εναλλακτικές και δεν απαιτούν την έντονη εμπλοκή του. Από την άλλη όμως το σημαντικό μειονέκτημά τους, είναι η υπολογιστική τους πολυπλοκότητα που τις καθιστά χρονοβόρες στην επίλυση ή ακόμα και ανέφικτες χρονικά. Τέτοιες μέθοδοι είναι η **μέθοδος των συντελεστών στάθμισης** (weighting method), η **μέθοδος των περιορισμών** (ϵ -constraint method) και οι **μέθοδοι πολυκριτηριακής Simplex** που παραλλάσσουν τη μέθοδο Simplex ώστε να μπορεί να διαχειριστεί περισσότερες της μίας αντικειμενικές συναρτήσεις.

Η Μέθοδος AUGMECON (Augmented ϵ -constraint method)

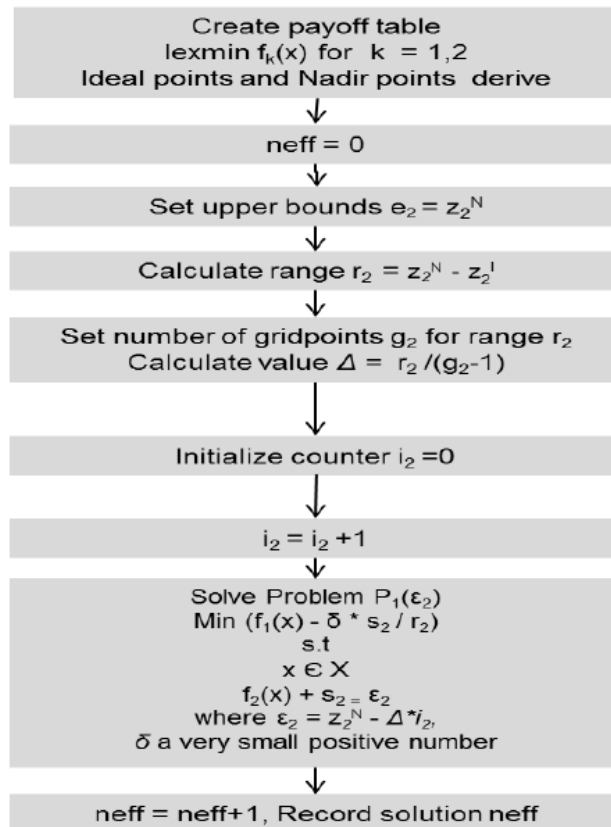
A. Λεξικογραφική Βελτιστοποίηση του Πίνακα Πληρωμών

Για να μπορέσει να εφαρμοσθεί η μέθοδος των περιορισμών θα πρέπει να γνωρίζουμε το εύρος της κάθε αντικειμενικής συνάρτησης, τουλάχιστον για τις $p-1$ αντικειμενικές συναρτήσεις οι οποίες θα χρησιμοποιηθούν ως περιορισμοί. Ο υπολογισμός του εύρους των αντικειμενικών συναρτήσεων στο σύνολο του εφικτού πεδίου τιμών δεν είναι κάτι τετριμμένο. Ενώ η καλύτερη τιμή είναι εύκολο να βρεθεί μέσα από ατομική βελτιστοποίηση η χειρότερη τιμή δεν είναι. Η πιο κοινή προσέγγιση είναι να υπολογισθούν τα εύρη από τον πίνακα πληρωμών (ο πίνακας με τα αποτελέσματα από την ανεξάρτητη βελτιστοποίηση των p αντικειμενικών συναρτήσεων). Η χειρότερη τιμή συνήθως προσεγγίζεται από το ελάχιστο της αντίστοιχης στήλης. Παρόλα αυτά, ακόμα και σε αυτή την περίπτωση, πρέπει να ήμαστε σίγουροι ότι οι λύσεις της ανεξάρτητης βελτιστοποίησης είναι όντως κατά Pareto βέλτιστες (ή ικανές) λύσεις. Παρουσία εναλλακτικών βέλτιστων η λύση που παράγεται από ένα εμπορικό λογισμικό δεν είναι εγγυημένα μια κατά Pareto βέλτιστη λύση. Για να ξεπεράσουμε αυτή την ασάφεια, προτείνεται η λεξικογραφική βελτιστοποίηση για κάθε αντικειμενική συνάρτηση έτσι ώστε να κατασκευαστεί ο πίνακας πληρωμών με μόνο κατά Pareto βέλτιστες λύσεις.

Μια εναλλακτική απλή διαδικασία για να ξεπεραστεί η δυσκολία υπολογισμού των χείριστων λύσεων των αντικειμενικών συναρτήσεων είναι να καθοριστούν κατώτατα όρια για τις αντικειμενικές συναρτήσεις (κατώτατα σε προβλήματα μεγιστοποίησης και ανώτατα σε επίπεδα ελαχιστοποίησης). Τα κατώτατα όρια παίζουν το ρόλο φραγμών στη βελτιστοποίηση. Λύσεις χειρότερες των ακραίων δεν είναι επιτρεπόμενες.

B. Υλοποίηση

Πρακτικά, όπως αναλύθηκε και πριν, η μέθοδος των περιορισμών εφαρμόζεται ως εξής: από τον πίνακα πληρωμών λαμβάνουμε το εύρος κάθε μιας από τις $p-1$ αντικειμενικές συναρτήσεις οι οποίες θα χρησιμοποιηθούν ως περιορισμοί. Κατόπιν χωρίζουμε το εύρος της i -οστής αντικειμενικής συνάρτησης σε qi ίσα διαστήματα χρησιμοποιώντας $(qi-1)$ ενδιάμεσα ισαπέχοντα grid points. Έτσι έχουμε συνολικά $(qi+1)$ grid points που χρησιμοποιούνται για να διαφοροποιήσουν παραμετρικά το RHS (ei) της i -οστής αντικειμενικής συνάρτησης. Ο συνολικός αριθμός των τρεξιμάτων είναι $(q2+1) \times (q3+1) \times \dots \times (qp+1)$. Μια επιθυμητή ιδιότητα της μεθόδου των περιορισμών είναι ότι μπορούμε να ελέγξουμε την πυκνότητα της αναπαράστασης του συνόλου των ικανών λύσεων με σωστή ανάθεση των τιμών στο qi . Όσο πιο μεγάλος είναι ο αριθμός των grid points τόσο πιο πολλές είναι και οι ικανές λύσεις, με το κόστος όμως, του παραπάνω υπολογιστικού χρόνου. Το διάγραμμα ροής του αλγορίθμου παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.2.



Σχήμα 3.2. Διάγραμμα ροής αλγορίθμου

Η Μέθοδος AUGMECON 2

Η μέθοδος Augmecon2 αποτελεί ουσιαστικά μια βελτίωση της μεθόδου Augmecon. Όπως είδαμε στη μέθοδο Augmecon το εύρος κάθε αντικειμενικής συνάρτησης η οποία χρησιμοποιείται ως περιορισμός διαιρείται σε διαστήματα και τα ισαπέχοντα σημεία ορισμού των διαστημάτων χρησιμοποιούνται ως δεξί σκέλος στους αντίστοιχους περιορισμούς. Αν λοιπόν θεωρήσουμε την αντικειμενική συνάρτηση k η οποία έχει εύρος rk και χωρίζεται σε qk ίσα διαστήματα, τότε το βήμα με το οποίο μεταβάλλεται το αντίστοιχο δεξί σκέλος του σχετικού περιορισμού είναι :

$$stepk = rk/qk$$

Κατά τη διάρκεια της διαδικασίας, πραγματοποιείται όπως είδαμε μονοκριτηριακή βελτιστοποίηση και υπολογίζεται για κάθε περιορισμό που αντιστοιχεί σε αντικειμενική συνάρτηση και η αντίστοιχη μεταβλητή απόκλισης sk . Για την k -αντικειμενική συνάρτηση έχουμε:

$$fk(x) - sk = ek$$

Το ek προσδιορίζεται από την ακόλουθη σχέση:

$$ek = fmink + t \times stepk$$

όπου $fmink$ είναι το ελάχιστο της k -αντικειμενικής συνάρτησης και t ο μετρητής των επαναλήψεων που διατρέχει τα $gridpoints$ ($t = 0 \dots qk$).

Σε κάθε επανάληψη ελέγχουμε τη μεταβλητή απόκλισης που αντιστοιχεί στην αντικειμενική συνάρτηση του πιο εσωτερικού βρόγχου. Αν υποθέσουμε ότι ο πιο εσωτερικός βρόγχος αντιστοιχεί στην αντικειμενική συνάρτηση p τότε υπολογίζεται ο συντελεστής παράκαμψης b ως εξής:

$$b = \text{int}(sp/stepp)$$

όπου $\text{int}()$ είναι η συνάρτηση που επιστρέφει το ακέραιο μέρος ενός πραγματικού αριθμού, sp είναι η μεταβλητή απόκλισης που προκύπτει και $stepp$ το βήμα μεταβολής του δεξιού σκέλους κατά τη διαδικασία της ϵ -constraint που αντιστοιχεί στην p -αντικειμενική συνάρτηση.

Όταν ο b ή η μεταβλητή απόκλισης sp είναι μεγαλύτερη από το βήμα μεταβολής $stepp$ τότε αυτό σημαίνει ότι και στην επόμενη επανάληψη θα προκύψει η ίδια κατά Pareto άριστη λύση, οπότε η συγκεκριμένη επανάληψη είναι περιττή και μπορεί να παρακαμφθεί. Το πόσες συνεχόμενες επαναλήψεις μπορούμε να παρακάμψουμε με αυτόν τον τρόπο μας το λέει ο συντελεστής παράκαμψης b .

ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΧΑΡΤΟΦΥΛΑΚΙΟΥ ΓΙΑ ΤΟΝ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟ ΒΕΛΤΙΣΤΩΝ
ΧΑΡΤΟΦΥΛΑΚΙΩΝ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΩΝ ΥΠΟ ΤΟ ΠΡΙΣΜΑ ΣΤΟΧΑΣΤΙΚΗΣ ΚΑΙ ΝΤΕΤΕΡΜΙΝΙΣΤΙΚΗΣ
ΑΒΕΒΑΙΟΤΗΤΑΣ

Με την εισαγωγή της συγκεκριμένης τεχνικής της παράκαμψης περιττών επαναλήψεων μπορούμε να επιτύχουμε σημαντική οικονομία, κυρίως σε προβλήματα τα οποία έχουν και δυαδικές μεταβλητές.

3.4. Ανάλυση Ευστάθειας

Στο πεδίο της λήψης αποφάσεων υπό συνθήκες αβεβαιότητας πρωτοπόροι με τις δουλειές τους ήταν ο Dantzig (Dantzig, 1955) και οι Charnes και Cooper (Charnes and Cooper, 1959), οι οποίοι έθεσαν τα θεμέλια για το στοχαστικό προγραμματισμό και τη βελτιστοποίηση υπό πιθανολογικούς περιορισμούς, αντίστοιχα.

Όμως, οι δύο παραπάνω τεχνικές και μεθοδολογίες επίλυσης προβλημάτων υπό αβεβαιότητα, θεωρούν ότι οι κατανομές πιθανότητας των αγνώστων παραμέτρων είναι γνωστές, πράγμα που προφανώς δε μπορεί να ισχύει σε κάθε περίπτωση (Scarf, 1958). Επιπλέον, οι άγνωστες πληροφορίες που εισέρχονται στο μαθηματικό μοντέλο μπορούν να οδηγήσουν σε ανέφικτες λύσεις κατά την εφαρμογή τους στην πραγματικότητα ή ακόμα και σε λύσεις οι οποίες θα δώσουν πραγματικά αποτελέσματα που θα απέχουν σε μεγάλο βαθμό από αυτά που εξήχθησαν από την επίλυση του μοντέλου. Ο Soyster (1973), αντιμετώπισε το παραπάνω πρόβλημα, θεωρώντας για κάθε άγνωστη μεταβλητή του μοντέλου την χειρότερη δυνατή τιμή από αυτές που μπορεί να πάρει. Εισήγαγε έτσι την έννοια της ευστάθειας των λύσεων καθώς πέτυχε την ολική προφύλαξη του μοντέλου απέναντι στην αβεβαιότητα των παραμέτρων παρόλο που το μοντέλο του θεωρείται υπερβολικά συντηρητικό.

Από τότε πολλές μελέτες έχουν διεξαχθεί πάνω στην ανάλυση της ευστάθειας των μοντέλων και των βέλτιστων λύσεων που πηγάζουν από αυτά για μονοκριτηριακή βελτιστοποίηση, ενώ σχετικά πρόσφατα οι μελέτες έχουν στραφεί και στον πολυστοχικό προγραμματισμό.

Ο Roy σε άρθρο του το 2010 (Roy, 2010), ορίζει την ανάλυση ευστάθειας σαν ένα πολύπλευρο πρόβλημα και εισάγει έναν πιο δόκιμο όρο για αυτή την ανάλυση, *robustness concern*. Σύμφωνα με το Roy, στόχος της ανάλυσης ευστάθειας είναι αρχικά να εντοπίσει όλα τα αδύναμα-ασταθή σημεία και τις ζώνες αβεβαιότητας του μοντέλου (*frailty points*) και να τα αντιμετωπίσει με διάφορους τρόπους ώστε να επιτευχθεί η εύρεση ευσταθών λύσεων οι οποίες θα επηρεάζονται το λιγότερο δυνατό από την επικράτηση δυσμενών μελλοντικών σεναρίων.

Τα παραπάνω αδύναμα σημεία μπορεί να είναι ένα από τα παρακάτω στοιχεία ή και συνδυασμός αυτών.

- Άγνωστες τιμές παραμέτρων που αφορούν μελλοντικές καταστάσεις.
- Αβέβαιες τιμές παρόντων δεδομένων του μοντέλου.
- Εξισώσεις που πλαισιώνουν το μοντέλο οι οποίες όμως αποκλίνουν από τις αληθινές.
- Προτιμήσεις του αποφασίζοντα που αφορούν κυρίως στη βαρύτητα των κριτηρίων στον πολυστοχικό προγραμματισμό οι οποίες αποτυπώνονται με αβέβαιο τρόπο.

Για να αντιμετωπιστούν αυτά τα σημεία που καθιστούν το μοντέλο ασταθές, κάποιες δεδομένες τεχνικές προτείνονται στη βιβλιογραφία.

1. Προσομοίωση και εισαγωγή στο μοντέλο πολλαπλών μελλοντικών σεναρίων, εκ των οποίων ένα θα επαληθευτεί στην πραγματικότητα.
2. Ορισμός κατανομών πιθανότητας για τις αβέβαιες μεταβλητές-παραμέτρους όπως στον στοχαστικό προγραμματισμό.
3. Διενέργεια δημοσκοπήσεων για την στατιστική προσέγγιση παραμέτρων που αφορούν δεδομένα του πληθυσμού.
4. Εισαγωγή ασαφών παραμέτρων ως μέτρα ευστάθειας του μοντέλου για να οριστεί η επικινδυνότητα της λήψης απόφασης με τα παρόντα δεδομένα.
5. Έλεγχος της συμπεριφοράς της βέλτιστης λύσης στη μεταβολή των τιμών των αβέβαιων παραμέτρων (ανάλυση ευαισθησίας).

Προσομοίωση Monte Carlo

Στη στοχαστική ανάλυση, οι τιμές των μεταβλητών ακολουθούν μια κατανομή πιθανότητας, δηλαδή δεν λαμβάνουν συγκεκριμένες τιμές, αφού κυμαίνονται σε μια περιοχή τιμών σε κάθε σημείο της οποίας αντιστοιχεί μια πιθανότητα. Λόγω του ότι οι μεταβλητές λαμβάνονται με τη μορφή κατανομής πιθανότητας, το αποτέλεσμα υπολογίζεται επίσης με τη μορφή κατανομής πιθανότητας. Μια συνηθισμένη μέθοδος στοχαστικής ανάλυσης που χρησιμοποιείται ευρέως, είναι η προσομοίωση Monte-Carlo. Η μέθοδος είναι κατάλληλη για την επίλυση περίπλοκων αριθμητικών προβλημάτων, που είναι δύσκολο να λυθούν αναλυτικά (Μαυρωτάς, 2000).

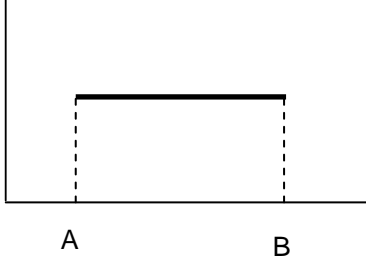
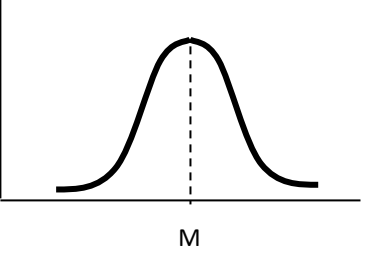
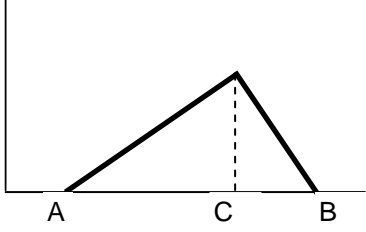
Με τη μέθοδο προσομοίωσης Monte Carlo παράγονται χαρτοφυλάκια επενδυτικών σχεδίων ίσα με τον αριθμό των επαναλήψεων, για διάφορες τιμές των μεταβλητών οι οποίες λαμβάνονται από συγκεκριμένες κατανομές πιθανότητας. Γενικά, οι μεταβλητές μπορεί να λάβουν τιμές από διάφορες κατανομές, όπως φαίνεται στον Πίνακα 3.1. Στο Σχήμα 3.3 φαίνονται τρία συγκεκριμένα είδη κατανομών πιθανότητας (ομοιόμορφη, κανονική, τριγωνική) για τις «αβέβαιες» μεταβλητές καθώς και οι παράμετροι τους. Σε αυτή τη διπλωματική εργασία κάναμε χρήση της ομοιόμορφης κατανομής για να προσομοιώσουμε τις τιμές των παραμέτρων.

ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΧΑΡΤΟΦΥΛΑΚΙΟΥ ΓΙΑ ΤΟΝ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟ ΒΕΛΤΙΣΤΩΝ
ΧΑΡΤΟΦΥΛΑΚΙΩΝ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΩΝ ΥΠΟ ΤΟ ΠΡΙΣΜΑ ΣΤΟΧΑΣΤΙΚΗΣ ΚΑΙ ΝΤΕΤΕΡΜΙΝΙΣΤΙΚΗΣ
ΑΒΕΒΑΙΟΤΗΤΑΣ

Πίνακας 3.1. Κατανομές μεταβλητών (Μαυρωτάς, 2000)

ΚΑΤΑΝΟΜΕΣ ΜΕΤΑΒΛΗΤΩΝ	
n-διάστατη κανονική	Poisson
Κανονική – Gaussian	t-student
Αρνητική Διωνυμική	Εκθετική
Λογαριθμοκανονική	Bernoulli
Υπεργεωμετρική	Τριγωνική
Πολυωνυμική	Rayleigh
Ομοιόμορφη	Cauchy
F-Snedecor	Weibull
Γεωμετρική	Γάμμα
Διωνυμική	Βήτα

ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΧΑΡΤΟΦΥΛΑΚΙΟΥ ΓΙΑ ΤΟΝ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟ ΒΕΛΤΙΣΤΩΝ
ΧΑΡΤΟΦΥΛΑΚΙΩΝ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΩΝ ΥΠΟ ΤΟ ΠΡΙΣΜΑ ΣΤΟΧΑΣΤΙΚΗΣ ΚΑΙ ΝΤΕΤΕΡΜΙΝΙΣΤΙΚΗΣ
ΑΒΕΒΑΙΟΤΗΤΑΣ

ΟΝΟΜΑ	ΜΟΡΦΗ	ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ
Ομοιόμορφη κατανομή (<i>Uniform distribution</i>)		A: ελάχιστη τιμή B: μέγιστη τιμή
Κανονική (ή Gaussian) κατανομή (<i>Normal distribution</i>)		M: μέση τιμή σ: τυπική απόκλιση
Τριγωνική κατανομή (<i>Triangular distribution</i>)		A: ελάχιστη τιμή C: πιο πιθανή τιμή B: μέγιστη τιμή

Σχήμα 3.3. Κατανομές πιθανότητας και οι παράμετροί τους (Μαυρωτάς,2000)

Η ομοιόμορφη κατανομή χρησιμοποιείται όταν η εν λόγω μεταβλητή λαμβάνει τιμές με την ίδια πιθανότητα σε ένα συγκεκριμένο διάστημα $[A,B]$, οπότε ο αποφασίζων εισάγει ως παραμέτρους της κατανομής την ελάχιστη (min) και μέγιστη τιμή (max) του διαστήματος αυτού.

Η κανονική κατανομή χρησιμοποιείται για μεταβλητές όπου οι τιμές τους κυμαίνονται συμμετρικά γύρω από μια μέση τιμή. Ο αποφασίζων εισάγει ως παραμέτρους της κατανομής τη μέση τιμή (M) και την τυπική απόκλιση (σ). Οι τιμές της μεταβλητής αυτής κυμαίνονται στο διάστημα $[M-3\sigma, M+3\sigma]$.

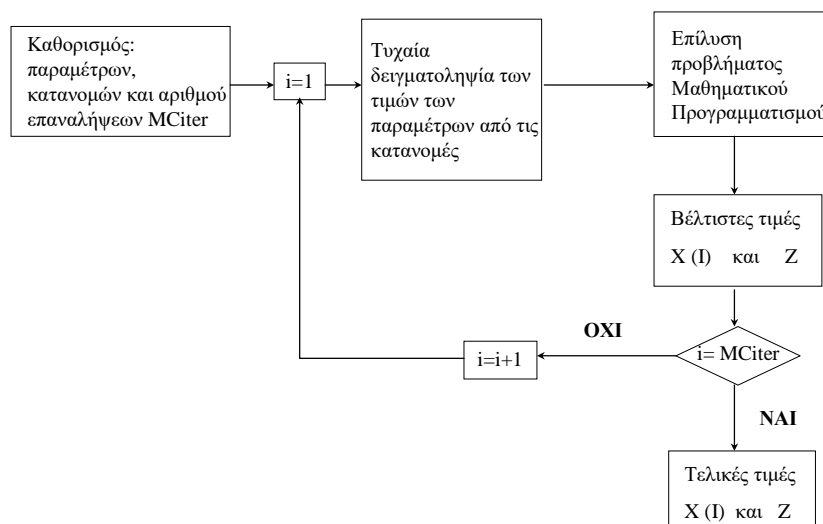
Η τριγωνική κατανομή χρησιμοποιείται όταν ο αποφασίζων θέλει να εισάγει μια απλή κατανομή με μη συμμετρικά χαρακτηριστικά. Συγκεκριμένα, ο αποφασίζων μπορεί να δώσει το διάστημα μεταβολής $[A,B]$ της μεταβλητής και την πιο πιθανή τιμή (C) στο διάστημα αυτό.

ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΧΑΡΤΟΦΥΛΑΚΙΟΥ ΓΙΑ ΤΟΝ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟ ΒΕΛΤΙΣΤΩΝ
ΧΑΡΤΟΦΥΛΑΚΙΩΝ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΩΝ ΥΠΟ ΤΟ ΠΡΙΣΜΑ ΣΤΟΧΑΣΤΙΚΗΣ ΚΑΙ ΝΤΕΤΕΡΜΙΝΙΣΤΙΚΗΣ
ΑΒΕΒΑΙΟΤΗΤΑΣ

Έτσι διαμορφώνεται μια κατανομή που έχει τιμές στο διάστημα $[A,B]$ αλλά με μεγαλύτερη συχνότητα γύρω από το σημείο C .

Στην παρούσα διπλωματική εργασία, η συνδυασμένη χρήση της τεχνικής προσομοίωσης Monte Carlo και του 0-1 Ακέραιου Γραμμικού Προγραμματισμού, επέτρεψε τη διαχείριση της αβεβαιότητας των πιο ευμετάβλητων παραμέτρων του συστήματος, δημιουργώντας εύρωστα ενεργειακά χαρτοφυλάκια. Η εισαγωγή του παράγοντα της αβεβαιότητας στο μοντέλο, χρησιμοποιώντας τη μέθοδο Monte Carlo, περιγράφεται παρακάτω.

Αρχικά καθορίζονται οι βασικές αβέβαιοι παράμετροι, οι κατανομές τους καθώς και ο αριθμός των επιθυμητών επαναλήψεων της συνολικής διαδικασίας. Με τη βοήθεια γεννήτριας ψευδο-τυχαίων αριθμών (optionseed-GAMS), γίνεται τυχαία δειγματοληψία των τιμών των παραμέτρων από την ομοιόμορφη κατανομή που χρησιμοποιείται, για κάθε μεταβλητή αντίστοιχα. Στη συνέχεια, επιλύεται το πρόβλημα 0-1 Ακέραιου Γραμμικού Προγραμματισμού, με τη βοήθεια του λογισμικού GAMS (*General Algebraic Modeling System*). Έτσι, προκύπτουν οι βέλτιστες τιμές για την αντικειμενική συνάρτηση Z (συνολική επίδοση σχεδίων – TOTSCORE – total score of projects) και τις μεταβλητές απόφασης $X(I)$ (δυαδικές μεταβλητές 1-0 για την πραγματοποίηση ή όχι κάποιου σχεδίου, αντίστοιχα). Αν ο αριθμός των επαναλήψεων που έχουν ολοκληρωθεί συμπίπτει με τον επιθυμητό, λαμβάνονται οι τελικές τιμές της αντικειμενικής συνάρτησης και των μεταβλητών απόφασης. Διαφορετικά η διαδικασία αυτή, επαναλαμβάνεται.



Σχήμα 3.4. Διάγραμμα ροής διαδικασίας επίλυσης Γ.Π με Monte-Carlo

ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΧΑΡΤΟΦΥΛΑΚΙΟΥ ΓΙΑ ΤΟΝ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟ ΒΕΛΤΙΣΤΩΝ
ΧΑΡΤΟΦΥΛΑΚΙΩΝ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΩΝ ΥΠΟ ΤΟ ΠΡΙΣΜΑ ΣΤΟΧΑΣΤΙΚΗΣ ΚΑΙ ΝΤΕΤΕΡΜΙΝΙΣΤΙΚΗΣ
ΑΒΕΒΑΙΟΤΗΤΑΣ

Συνοπτικά, τα βήματα που ακολουθούνται στη στοχαστική ανάλυση με τη βοήθεια της μεθόδου Monte Carlo είναι τα ακόλουθα:

- ✓ Καθορίζονται οι βασικές αβέβαιοι παράμετροι.
- ✓ Ορίζονται συγκεκριμένες κατανομές πιθανότητας για τις παραμέτρους αυτές.
- ✓ Γίνεται τυχαία δειγματοληψία από τις κατανομές για τις τιμές των παραμέτρων.
- ✓ Υπολογίζεται το τελικό αποτέλεσμα.
- ✓ Τα βήματα 3 έως 4 επαναλαμβάνονται, τόσες φορές όσες και ο αριθμός των επαναλήψεων (εν προκειμένω 1000 φορές).

3.5. Μοντελοποίηση Ολοκληρωμένης Αποτίμησης

Η μοντελοποίηση ολοκληρωμένης αποτίμησης είναι ιδιαίτερα πολύτιμη για να αντιμετωπιστούν προκλήσεις βιωσιμότητας και η χρήση της είναι διαδεδομένη για να διερευνηθούν πιθανές στρατηγικές ενεργειακού σχεδιασμού και κλιματικής δράσης. Τα Μοντέλα Ολοκληρωμένης Αποτίμησης (MOA) δίνουν πληροφορίες σημαντικές για αντισταθμίσεις μεταξύ διαφορετικών στόχων πολιτικής, προσδιορίζουν διαδράσεις μεταξύ διαφορετικών τομέων, και ως ένα βαθμό μπορούν να λάβουν υπόψιν τους την αβεβαιότητα σε παράγοντες όπως τεχνολογική ανάπτυξη, κλιματική αλλαγή, ανθρώπινη συμπεριφορά, πληθυσμός και οικονομική ανάπτυξη.

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 MOA. Παρά το ότι οι ερευνητές έχουν αξιοποιήσει τις προσεγγίσεις βασισμένες σε MOA για να διεκρινθούν μελλοντικά μονοπάτια 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.

Ακόμη, τα MOA 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 MOA. Τέλος, η μοντελοποίηση του κλίματος και της οικονομίας που βασίζεται σε MOA σε πολλές περιπτώσεις εξαιρεί τους φορείς που χαράζουν πολιτικές, όπως και ομάδες εμπειρογνομόνων, ή περιορίζει την συμμετοχή τους στην μερική διαμόρφωση των υποθέσεων με τις οποίες πραγματοποιούνται οι προσομοιώσεις.

Το μοντέλο GCAM

Το GCAM είναι ένα δυναμικό-αναδρομικό, μερικά ισορροπημένο μοντέλο με τεχνολογικά πλούσιες αναπαραστάσεις της οικονομίας, της ενέργειας, των γεωργικών, και των τομέων χρήσης γης. Αναπτύχθηκε από το Joint Global Change Research Institute, μια συνεργασία μεταξύ του Pacific Northwest National Laboratory (PNNL) και το Πανεπιστημίου του Μέριλαντ. Σε χρονικό διάστημα άνω των 30 ετών το GCAM και οι προκάτοχοί του (π.χ. MiniCAM) χρησιμοποιήθηκαν σε εφαρμογές που ερευνούν μελλοντικά σενάρια εκπομπών και ενεργειακές τεχνολογίες (Edmonds, Wise and MacCracken, 1994; Rao *et al.*, 2017). Το GCAM είναι ένα από τα τέσσερα μοντέλα που επιλέγονται για την ανάπτυξη των αντιπροσωπευτικών οδών συγκέντρωσης της 5^{ης} έκθεσης αξιολόγησης της IPCC (Pachauri *et al.* της 2015) και έχει συμπεριληφθεί σε όλες σχεδόν τις μεγάλες κλιματικές/ενεργειακές αξιολογήσεις κατά τη διάρκεια των τελευταίων δεκαετιών. Συνδέει κοινωνικοοικονομικές, ενεργειακές, χρήσης γης

και κλιματικές ενότητες και 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). Οι αντιπροσωπευτικές εφαρμογές του μοντέλου GCAM περιλαμβάνουν αυτές των Edmonds and Reilly, 1983; Reilly *et al.*, 1987; Edmonds, Wise and MacCracken, 1994; Calvin *et al.*, 2009; Wise *et al.*, 2009; Ebi *et al.*, 2014; Fisher *et al.*, 2014; Collins *et al.*, 2015; Shi *et al.*, 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 πόρων. Οι απεμπλουτισμένοι πόροι περιλαμβάνουν τα ορυκτά καύσιμα όπως το πετρέλαιο, το αέριο, ο άνθρακας, και το ουράνιο (για την πυρηνική ενέργεια). Οι ανανεώσιμοι πόροι περιλαμβάνουν διαφορετικούς τύπους βιομάζας (αστικά απορρίμματα και υπολείμματα), αιολική (on και off-shore), γεωθερμία, υδροηλεκτρική ενέργεια, PV, και συγκεντρωμένη ηλιακή ενέργεια (CSP). Όσον αφορά την ενότητα χρήσης γης, το μοντέλο χωρίζεται σε 283 αγρο-οικολογικές ζώνες (AEZs; Monfreda, Ramankutty και 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 (a) 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.

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

4. Περιγραφή των κοινωνικοοικονομικών σεναρίων

Κατά τη διάρκεια των τελευταίων ετών, μια διεθνής ομάδα επιστημόνων του κλίματος, οικονομολόγοι και μοντελιστές ενεργειακών συστημάτων έχουν χτίσει μια σειρά από νέα «μονοπάτια» που εξετάζουν πώς η παγκόσμια κοινωνία, τα δημογραφικά και τα οικονομικά στοιχεία ενδέχεται να μεταβληθούν κατά τη διάρκεια του επόμενου αιώνα. Είναι κοινώς γνωστές ως «κοινά κοινωνικοοικονομικά μονοπάτια» (Shared Socioeconomic Pathways - SSPs).

Στα τέλη της δεκαετίας του 2000, ερευνητές από διαφορετικές ομάδες μοντελιστών σε όλο τον κόσμο άρχισαν τη διαδικασία της ανάπτυξης νέων σεναρίων για να διερευνήσουν πώς ο κόσμος θα μπορούσε να αλλάξει κατά το υπόλοιπο του 21ου αιώνα.

Οι προηγούμενες προσπάθειες κατά τη διάρκεια της δεκαετίας του 1990 είχαν αναπτύξει τα σεναρία "SRES", τα οποία εξέτασαν τέσσερις διαφορετικές πιθανές μελλοντικές τροχιές του πληθυσμού, της οικονομικής ανάπτυξης και των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου. Ωστόσο, αυτά έγιναν σύντομα ξεπερασμένα, διότι έλειπαν κάποιες μεγάλες αλλαγές στην κοινωνία και την παγκόσμια οικονομία που έχουν συμβεί κατά τα τελευταία είκοσι χρόνια.

Μια ομάδα ερευνητών ανέπτυξε έπειτα τα «Representative Concentration Pathways» (RCPs), που περιγράφουν τα διαφορετικά επίπεδα αερίων θερμοκηπίων και άλλων θερμοκρασιακών αερίων που μπορεί να εμφανιστούν στο μέλλον.

Μια δεύτερη ομάδα ασχολήθηκε με την μοντελοποίηση του τρόπου με τον οποίο οι κοινωνικοοικονομικοί παράγοντες μπορούν να αλλάξουν τον επόμενο αιώνα. Αυτά περιλαμβάνουν χαρακτηριστικά όπως ο πληθυσμός, η οικονομική ανάπτυξη, η εκπαίδευση, η αστικοποίηση και ο ρυθμός της τεχνολογικής ανάπτυξης. Αυτά τα "κοινά κοινωνικοοικονομικά μονοπάτια" (SSPs) εξετάζουν πέντε διαφορετικούς τρόπους με τους οποίους ο κόσμος θα μπορούσε να εξελιχθεί σε περίπτωση απουσίας της πολιτικής για το κλίμα και πώς διαφορετικά επίπεδα μετριασμού της κλιματικής αλλαγής θα μπορούσαν να επιτευχθούν όταν οι στόχοι μετριασμού των RCPs συνδυαστούν με τα SSPs.

Οι δύο προσπάθειες σχεδιάστηκαν για να είναι συμπληρωματικές. Τα RCPs έθεσαν μονοπάτια για τις συγκεντρώσεις αερίων του θερμοκηπίου, και αποτελεσματικά το ποσό της θέρμανσης που θα μπορούσε να συμβεί μέχρι το τέλος του αιώνα. Επίσης τα SSPs έθεσαν το στάδιο στο οποίο οι μειώσεις των εκπομπών θα επιτευχθούν ή όχι.

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. Αυτές εξαιρούν τις

δεσμεύσεις για τη θέσπιση νέων πολιτικών, όπως αυτές που περιλαμβάνονται στη συμφωνία του Παρισιού μέχρι το 2025 και 2030.

Τα SSPs χαρακτηρίζουν διαφορετικούς κόσμους βάσης επειδή 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 κάποια πολιτική κλίματος.

Ενώ τα RCPs είχαν τελειώσει εγκαίρως για να χρησιμοποιηθούν στην 5η Έκθεση Αξιολόγησης της IPCC, η ανάπτυξη των πιο σύνθετων SSPs υπήρξε μια πολύ μεγαλύτερη και πιο εμπλεκόμενη διαδικασία. Τα SSPs είχαν αρχικά δημοσιευθεί το 2016, αλλά πρόσφατα άρχισαν να χρησιμοποιούνται στον επόμενο γύρο της μοντελοποίησης του κλίματος, γνωστή ως Coupled Model Intercomparison Project version 6 ή CMIP6, στο πλαίσιο της προετοιμασίας για την 6^η Έκθεση Αξιολόγησης της IPCC.

Τα SSPs βασίζονται σε πέντε αφηγήσεις που περιγράφουν ευρείες κοινωνικοοικονομικές τάσεις που θα μπορούσαν να διαμορφώσουν τη μελλοντική κοινωνία. Αυτές προορίζονται να εκτείνονται στο εύρος των εύλογων προθεσμιών.

Περιλαμβάνουν: έναν κόσμο της αειφορίας - εστιασμένης ανάπτυξης και ισότητας (SSP1), ένα "middle of the road" κόσμο όπου οι τάσεις ακολουθούν τα γενικά ιστορικά μοτίβα τους (SSP2), ένα κατακερματισμένο κόσμο "αναζωπύρωσης εθνικισμού" (SSP3), ένα κόσμο συνεχώς αυξανόμενης ανισότητας (SSP4), και έναν κόσμο ταχείας και απεριόριστης ανάπτυξης της οικονομικής παραγωγής και της χρήσης ενέργειας (SSP5).

Τα χαρακτηριστικά κάθε SSP περιγράφονται λεπτομερώς παρακάτω:

SSP1: Χαμηλές προκλήσεις για τον μετριασμό και την προσαρμογή στην κλιματική αλλαγή

Ο κόσμος μετατοπίζεται σταδιακά, αλλά διάχυτα, προς μια πιο βιώσιμη πορεία, δίνοντας έμφαση στην πιο περιεκτική ανάπτυξη που σέβεται τα αντιληπτά περιβαλλοντικά όρια. Η διαχείριση των παγκόσμιων αστικών τάξεων βελτιώνεται αργά, οι επενδύσεις εκπαίδευσης και υγείας επιταχύνουν τη δημογραφική μετάβαση, και η έμφαση στην οικονομική ανάπτυξη μετατοπίζεται προς μια ευρύτερη έμφαση στην ανθρώπινη ευημερία. Ωθούμενη από μια αυξανόμενη δέσμευση για την επίτευξη των αναπτυξιακών στόχων, η ανισότητα μειώνεται τόσο κατά μήκος όσο και εντός των χωρών. Η κατανάλωση προσανατολίζεται προς τη χαμηλή υλική αύξηση και τη χαμηλότερη ενεργειακή ένταση.

SSP2: Μεσαίες προκλήσεις για τον μετριασμό και την προσαρμογή στην κλιματική αλλαγή

Ο κόσμος ακολουθεί ένα μονοπάτι στο οποίο οι κοινωνικές, οικονομικές και τεχνολογικές τάσεις δεν μετακινούνται σημαντικά από τα ιστορικά μοτίβα. Η ανάπτυξη και η αύξηση του εισοδήματος προχωρούν άνισα, ενώ ορισμένες χώρες σημειώνουν σχετικά καλή πρόοδο, ενώ άλλες υπολείπονται των προσδοκιών. Τα παγκόσμια και εθνικά θεσμικά όργανα εργάζονται προς την κατεύθυνση της επίτευξης διαρκών αναπτυξιακών στόχων. Τα περιβαλλοντικά συστήματα αντιμετωπίζουν υποβάθμιση, αν και υπάρχουν κάποιες βελτιώσεις στη συνολική ένταση των πόρων και η χρήση της ενέργειας μειώνεται. Η παγκόσμια αύξηση του πληθυσμού είναι μέτρια. Η εισοδηματική ανισότητα παραμένει ή βελτιώνεται μόνο αργά και οι προκλήσεις στη μείωση της τρωτότητας στις κοινωνικές και περιβαλλοντικές αλλαγές παραμένουν.

SSP3: Υψηλές προκλήσεις για τον μετριασμό και την προσαρμογή στην κλιματική αλλαγή

Μια αναζωπύρωση του εθνικισμού, ανησυχίες για την ανταγωνιστικότητα και την ασφάλεια, καθώς και περιφερειακές συγκρούσεις ωθούν τις χώρες να επικεντρωθούν όλο και περισσότερο στα εγχώρια ή το πολύ περιφερειακά ζητήματα. Οι πολιτικές αλλάζουν με την πάροδο του χρόνου ώστε να προσανατολίζονται όλο και περισσότερο προς εθνικά και περιφερειακά θέματα ασφαλείας. Οι χώρες εστιάζουν στην επίτευξη των στόχων της ενέργειας και της ασφάλειας των τροφίμων εντός των περιφερειών τους σε βάρος της ανάπτυξης που βασίζεται ευρύτερα. Οι επενδύσεις στην εκπαίδευση και την τεχνολογική ανάπτυξη μειώνονται. Η οικονομική ανάπτυξη είναι αργή, η κατανάλωση είναι εντατική, και οι ανισότητες εξακολουθούν να υφίστανται ή επιδεινώνονται με την πάροδο του χρόνου. Η πληθυσμιακή αύξηση είναι χαμηλή σε βιομηχανικές χώρες και υψηλή στις αναπτυσσόμενες χώρες. Μια χαμηλή διεθνής προτεραιότητα για την αντιμετώπιση των περιβαλλοντικών ανησυχιών οδηγεί σε ισχυρή υποβάθμιση του περιβάλλοντος σε ορισμένες περιοχές.

SSP4: Χαμηλές προκλήσεις για τον μετριασμό, υψηλές προκλήσεις για την προσαρμογή στην κλιματική αλλαγή

Οι πολύ άνισες επενδύσεις στο ανθρώπινο κεφάλαιο, σε συνδυασμό με τις αυξανόμενες ανισότητες στις οικονομικές ευκαιρίες και την πολιτική εξουσία, οδηγούν σε αυξανόμενες ανισότητες και διαστρωμάτωση τόσο εκτός όσο και εντός των χωρών. Με την πάροδο του χρόνου, ένα χάσμα διευρύνεται μεταξύ μιας διεθνώς συνδεδεμένης κοινωνίας που συμβάλλει στους τομείς της γνώσης και της έντασης κεφαλαίου της παγκόσμιας οικονομίας, καθώς και σε μια κατακερματισμένη ομάδα χαμηλού εισοδήματος, ανεπαρκώς εκπαιδευμένων κοινωνιών

που εργάζονται σε μια οικονομία εργασίας και χαμηλής τεχνολογίας. Η κοινωνική συνοχή υποβαθμίζεται και η σύγκρουση και η αναταραχή γίνονται ολοένα και συχνότερες. Η τεχνολογική ανάπτυξη είναι υψηλή στην οικονομία και τους τομείς υψηλής τεχνολογίας. Ο παγκοσμίως συνδεδεμένος ενεργειακός τομέας διαφοροποιείται, με επενδύσεις και στα δύο καύσιμα υψηλής έντασης άνθρακα, όπως ο λιθάνθρακας και το μη συμβατικό πετρέλαιο, αλλά και σε ενεργειακές πηγές χαμηλών εκπομπών άνθρακα. Οι περιβαλλοντικές πολιτικές εστιάζουν στα τοπικά ζητήματα γύρω από τις μεσαίες και υψηλά εισοδηματικές περιοχές.

SSP5: Υψηλές προκλήσεις για τον μετριασμό, χαμηλές προκλήσεις για την προσαρμογή στην κλιματική αλλαγή

Αυτός ο κόσμος θέτει την αυξανόμενη πίστη στις ανταγωνιστικές αγορές, την καινοτομία και τις συμμετοχικές κοινωνίες για να παράγει την ταχεία τεχνολογική πρόοδο και την ανάπτυξη του ανθρώπινου κεφαλαίου ως πορεία στη βιώσιμη ανάπτυξη. Οι παγκόσμιες αγορές ενσωματώνονται όλο και περισσότερο. Υπάρχουν επίσης ισχυρές επενδύσεις στην υγεία, την εκπαίδευση και τα ιδρύματα για την ενίσχυση του ανθρώπινου και κοινωνικού κεφαλαίου. Ταυτόχρονα, η ώθηση για την οικονομική και κοινωνική ανάπτυξη συνδυάζεται με την εκμετάλλευση των άφθονων ορυκτών πόρων καυσίμων και την υιοθέτηση των πόρων και της ενεργειακής έντασης σαν τρόπο ζωής σε όλο τον κόσμο. Όλοι αυτοί οι παράγοντες οδηγούν σε ραγδαία ανάπτυξη της παγκόσμιας οικονομίας, ενώ ο παγκόσμιος πληθυσμός κορυφώνεται και μειώνεται στον 21ο αιώνα. Τα τοπικά περιβαλλοντικά προβλήματα, όπως η ατμοσφαιρική ρύπανση, διαχειρίζονται επιτυχώς. Υπάρχει πίστη στην ικανότητα να διαχειρίζονται αποτελεσματικά τα κοινωνικά και οικολογικά συστήματα, συμπεριλαμβανομένης της γεω-μηχανικής, εάν είναι απαραίτητο.

Αυτές οι αφηγήσεις περιγράφουν εναλλακτικές πορείες για τη μελλοντική κοινωνία. Παρουσιάζουν βασικά σενάρια για το τί θα συμβεί αν υπάρχει απουσία πολιτικής για το κλίμα, και επιτρέπουν στους ερευνητές να εξετάσουν τα εμπόδια και τις ευκαιρίες για την άμβλυνση του κλίματος και την προσαρμογή σε κάθε πιθανό μελλοντικό κόσμο, όταν συνδυάζεται με τους στόχους μετριασμού.

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 SSP5 υποθέτει ότι αυτό θα πρέπει να οδηγείται από μια ενεργειακή ένταση, σε μια οικονομία βασισμένη στα ορυκτά καύσιμα, ενώ στο SSP1 υπάρχει μια αυξανόμενη μετατόπιση προς τις βιώσιμες πρακτικές.

Τα σενάρια SSP3 και SSP4 είναι πιο απαισιόδοξα στη μελλοντική οικονομική και κοινωνική τους ανάπτυξη, με μικρή επένδυση στην εκπαίδευση ή την υγεία στις φτωχότερες χώρες σε συνδυασμό με έναν ταχέως αναπτυσσόμενο πληθυσμό και αυξανόμενες ανισότητες.

Το SSP2 αντιπροσωπεύει ένα "μέση του δρόμου" σενάριο όπου τα ιστορικά μοτίβα της ανάπτυξης συνεχίζονται σε όλο τον 21ο αιώνα.

Τα SSPs σχεδιάστηκαν για να αντικατοπτρίζουν κόσμους στους οποίους οι προκλήσεις μετριασμού και προσαρμογής ποικίλλουν από χαμηλό σε πολύ υψηλό επίπεδο. Ενώ τα baseline SSP σενάρια προϋποθέτουν την απουσία της πολιτικής για το κλίμα, οι ερευνητές ήθελαν επίσης να δούνε πώς οι υποκείμενες κοινωνικοοικονομικές συνθήκες θα επηρεάσουν την εφαρμογή της πολιτικής για το κλίμα.

Για παράδειγμα, το SSP1 διαθέτει χαμηλές προκλήσεις για τον μετριασμό και την προσαρμογή λόγω της ταχείας τεχνολογικής ανάπτυξης, της σχετικής παγκόσμιας ισότητας εισοδήματος και της εστίασης στην περιβαλλοντική βιωσιμότητα. Το SSP4, από την άλλη πλευρά, χαρακτηρίζει τις ομοίως χαμηλές προκλήσεις στον μετριασμό λόγω της ταχείας τεχνολογικής ανάπτυξής του, αλλά τις υψηλές προκλήσεις στην προσαρμογή κλίματος λόγω της επίμονης ανισότητας και της φτώχειας σε πολλά μέρη του κόσμου.

Πολλά από τα SSPs καταλήγουν να είναι γενικά παρόμοια στις αφηγήσεις των παλαιών σεναρίων SRES, που χρησιμοποιούνται στην 3^η και 4^η έκθεση αξιολόγησης της IPCC. Για παράδειγμα, το SSP1 που επικεντρώνεται στη βιωσιμότητα είναι μάλλον παρόμοιο με το SRES B1, ενώ το πιο 'μεσαίου δρόμου' SSP2 είναι παρόμοιο με το SRES B2. Το παγκοσμίως κατακεραματισμένο SSP3 είναι αρκετά παρόμοιο με SRES A2 και το υψηλά εξαρτώμενο από ορυκτά καύσιμα και μεγάλη ανάπτυξη SSP5 μοιράζεται πολλά στοιχεία με το SRES A1F1.

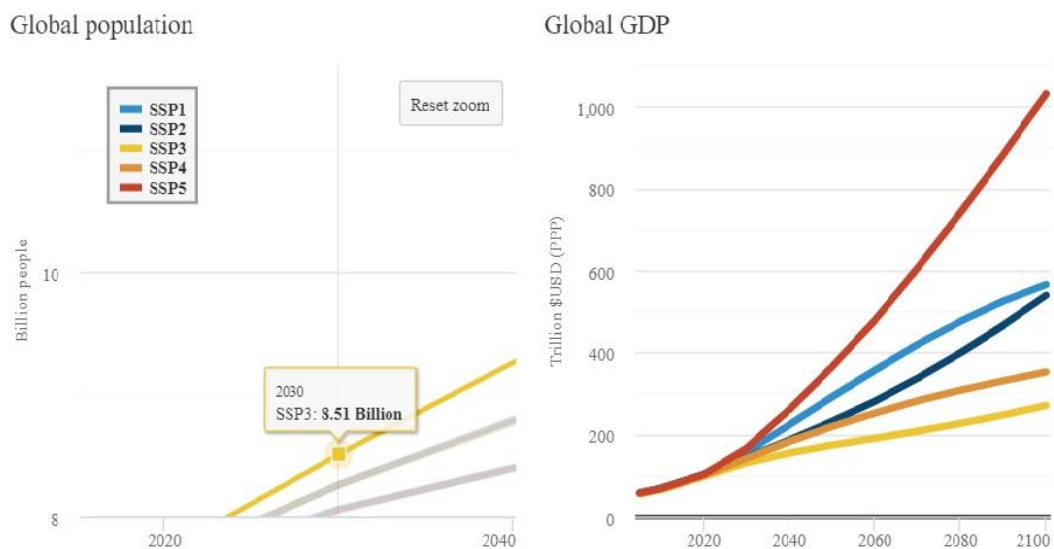
Σε αντίθεση με τα σενάρια SRES, ωστόσο, ο μετριασμός υπολογίζεται χωριστά από τα υποκείμενα μονοπάτια. Κάθε SSP έχει ένα βασικό σενάριο που περιγράφει τις μελλοντικές εξελίξεις ελλείψει νέων πολιτικών για το κλίμα, πέραν εκείνων που έχουν ήδη πραγματοποιηθεί σήμερα. Τα SSPs μπορεί στη συνέχεια να συνδυαστούν με διάφορους στόχους μετριασμού των εκπομπών.

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, αν και, όπως αναφέρθηκε δεν είναι όλα τα SSPs συμβατά με τον περιορισμό της θερμοκρασίας σε 1,5C ή 2C πάνω από τα προβιομηχανικά επίπεδα όπως στα RCPs.

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 τεχνολογικές εξελίξεις και τις αλλαγές στον τρόπο ζωής.

ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΧΑΡΤΟΦΥΛΑΚΙΟΥ ΓΙΑ ΤΟΝ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟ ΒΕΛΤΙΣΤΩΝ ΧΑΡΤΟΦΥΛΑΚΙΩΝ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΩΝ ΥΠΟ ΤΟ ΠΡΙΣΜΑ ΣΤΟΧΑΣΤΙΚΗΣ ΚΑΙ ΝΤΕΤΕΡΜΙΝΙΣΤΙΚΗΣ ΑΒΕΒΑΙΟΤΗΤΑΣ

Το παρακάτω σχήμα δείχνει τον παγκόσμιο πληθυσμό (αριστερά) και τις προβλέψεις του ΑΕΠ (δεξιά) για κάθε ένα από τα πέντε SSPs κατά τη διάρκεια του 21ου αιώνα. Ενώ πολλές ομάδες ερευνητών δημιούργησαν εκτιμήσεις του πληθυσμού και του ΑΕΠ, μια ενιαία προβολή επιλέχθηκε ως αντιπροσωπευτική για κάθε SSP για να εξασφαλίσει τη συνέπεια στις προσπάθειες μοντελοποίησης.



Σχήμα 4.1: Παγκόσμιος πληθυσμός (αριστερά) σε δισεκατομμύρια και παγκόσμιο ακαθάριστο εγχώριο προϊόν (δεξιά) σε τρισεκατομμύρια δολάρια ΗΠΑ σε βάση ισοτιμίας αγοραστικής δύναμης (PPP). Δεδομένα από τη βάση δεδομένων SSP.

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.

Τα επίπεδα πληθυσμών είναι χαμηλότερα σε SSP1 και SSP5, αυξάνονται σε 8.500.000.000 μεταξύ 2050 και 2060, και μειώνονται στο σημερινό επίπεδο των περίπου 7.000.000.000 ως το 2100. Αυτό είναι σε γενικές γραμμές συνεπές με το χαμηλό σενάριο γονιμότητας του Ηνωμένου έθνους.

Τα SSP2 και SSP4 είναι στην "μέση του δρόμου", με πληθυσμό που κορυφώνεται μεταξύ 2070 και 2080 στα περίπου 9.500.000.000, αν και αυτό είναι ακόμα χαμηλότερο από το μέσο σενάριο γονιμότητας του ΟΗΕ στα περίπου 11.500.000.000. Τέλος, το SSP3 δείχνει συνεχιζόμενη παγκόσμια αύξηση του πληθυσμού μέχρι το τέλος του αιώνα, φθάνοντας τα 12.600.000.000 έως το 2100. Το SSP3 είναι υψηλότερο από το μέσο σενάριο γονιμότητας του ΟΗΕ, αλλά ακόμα κάτω από το υψηλό σενάριο γονιμότητας του ΟΗΕ.

Οι προβολές πληθυσμών στα SSPs είναι γενικά λίγο χαμηλότερες απ' ό,τι στις προηγούμενες προσπάθειες μοντελοποίησης (παραδείγματος χάριν, SRES), 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.

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 πρότυπα 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 από 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 βρίσκεται στο SSP5, με ταχεία ανάπτυξη και σύγκλιση μεταξύ των χωρών και το παγκόσμιο μέσο κατά κεφαλήν ΑΕΠ περίπου στα \$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 \$20.000 το 2100, ελάχιστα πάνω από τα σημερινά επίπεδα.

Τα SSPs επίσης διαφέρουν σημαντικά στο επίπεδο των μελλοντικών ανισοτήτων εντός και μεταξύ των χωρών. Το SSP4 έχει την υψηλότερη ανισότητα, ακολουθούμενο από το SSP3. Τόσο το SSP1 όσο και το SSP5 διαθέτουν σχετικά δίκαιη ανάπτυξη.

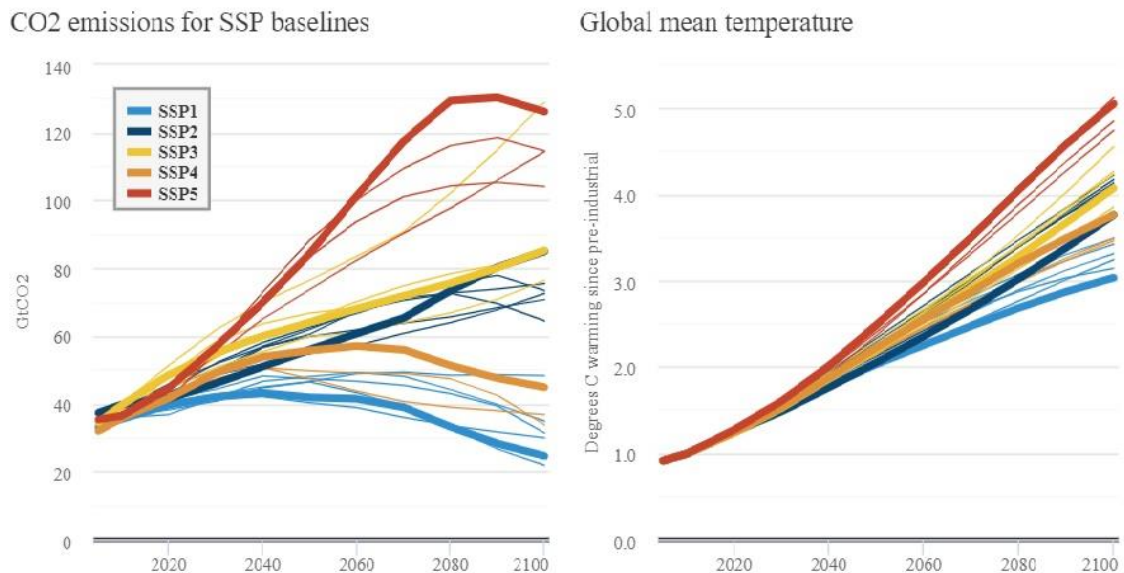
Τέλος, τα SSPs παρέχουν εκτιμήσεις για το πώς ο κόσμος θα γίνει πιο αστικός στο μέλλον. Αυτό κυμαίνεται από ένα χαμηλό ποσοστό 60% του πληθυσμού που θα ζει στις πόλεις το 2100 στο SSP3, παρόμοιο με το σημερινό ποσοστό 54%, και μέχρι 92% σε SSP1, SSP4, και SSP5. Το SSP2 είναι στη μέση, φθάνοντας σε 80% αστικοποίηση μέχρι το 2100.

Οι ερευνητές χρησιμοποίησαν έξι διαφορετικά ολοκληρωμένα μοντέλα αξιολόγησης (IAMs) για να μεταφράσουν τις κοινωνικοοικονομικές συνθήκες των SSPs σε εκτιμήσεις των

ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΧΑΡΤΟΦΥΛΑΚΙΟΥ ΓΙΑ ΤΟΝ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟ ΒΕΛΤΙΣΤΩΝ ΧΑΡΤΟΦΥΛΑΚΙΩΝ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΩΝ ΥΠΟ ΤΟ ΠΡΙΣΜΑ ΣΤΟΧΑΣΤΙΚΗΣ ΚΑΙ ΝΤΕΤΕΡΜΙΝΙΣΤΙΚΗΣ ΑΒΕΒΑΙΟΤΗΤΑΣ

μελλοντικών χαρακτηριστικών της ενεργειακής χρήσης και των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου.

Τα IAMs προσθέτουν πτυχές της κοινωνίας σε ένα μοντέλο ενεργειακών συστημάτων, προσομοιάζοντας πώς ο πληθυσμός, η οικονομική ανάπτυξη και η χρήση της ενέργειας επηρεάζουν και αλληλεπιδρούν με το φυσικό κλίμα. Παράγουν σενάρια για το πώς οι εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου μπορεί να ποικίλλουν στο μέλλον με βάση τους υποκείμενους κοινωνικοοικονομικούς παράγοντες και πώς η χρήση της ενέργειας, η παραγωγή και η οικονομική δραστηριότητα μπορεί να αλλάξει για να ανταποκριθεί στους στόχους μετριασμού του κλίματος.



Σχήμα 4.2: Οι εκπομπές CO₂ (αριστερά) σε γιγατόνους (GtCO₂) και η παγκόσμια μέση μεταβολή της θερμοκρασίας της επιφάνειας σε σχέση με τα προ-βιομηχανικά επίπεδα (δεξιά) σε βαθμούς C σε όλα τα μοντέλα και SSPs για baseline σενάρια χωρίς πολιτική κλίματος.

Οι παγκόσμιες εκπομπές CO₂ ποικίλλουν σημαντικά μεταξύ των διαφόρων baseline σεναρίων SSP. Γενικά, ένα από τα ισχυρά σημεία των SSP είναι η επισήμανση της σπουδαιότητας των βασικών παραδοχών για τις εκπομπές και τις θερμοκρασίες που προκύπτουν.

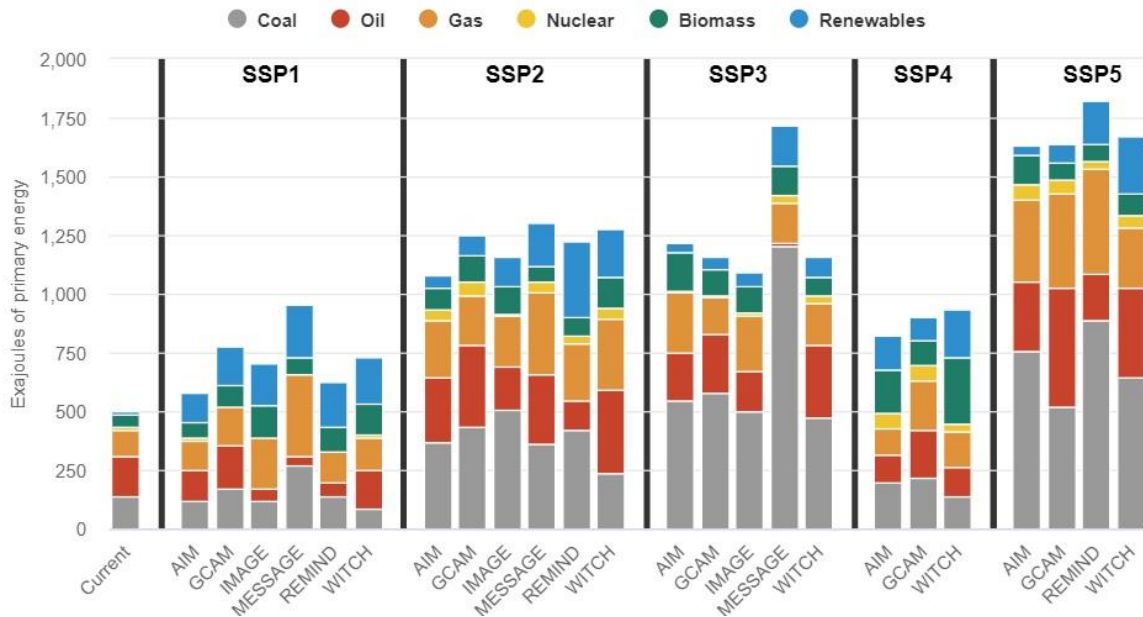
ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΧΑΡΤΟΦΥΛΑΚΙΟΥ ΓΙΑ ΤΟΝ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟ ΒΕΛΤΙΣΤΩΝ
ΧΑΡΤΟΦΥΛΑΚΙΩΝ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΩΝ ΥΠΟ ΤΟ ΠΡΙΣΜΑ ΣΤΟΧΑΣΤΙΚΗΣ ΚΑΙ ΝΤΕΤΕΡΜΙΝΙΣΤΙΚΗΣ
ΑΒΕΒΑΙΟΤΗΤΑΣ

Στο σχετικά εστιασμένο στην αειφορία SSP1, οι εκπομπές κορυφώνονται μεταξύ του 2040 και 2060, ακόμη και ελλείψει συγκεκριμένων πολιτικών για το κλίμα, και μειώνονται σε περίπου 22 έως 48 GtCO₂ ανά έτος έως το 2100. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα 3-3.5 C αύξηση της θέρμανσης μέχρι το 2100. Στο 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. Τα μοντέλα δείχνουν ένα ευρύ φάσμα των πιθανών εκπομπών για το SSP3, με τα περισσότερα τρεξίματα να δείχνουν αυξήσεις περίπου 76-86 GtCO₂ έως το 2100. Η θέρμανση το 2100 στο SSP3 εκτιμάται σε 3.9-4.6 C. Παρά την υψηλή ανισότητα, οι εκπομπές είναι σχετικά χαμηλές στο SSP4 λόγω της ταχείας τεχνολογικής προόδου στις ενεργειακές πηγές χαμηλών εκπομπών άνθρακα. Οι εκπομπές 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 SSP5 δείχνει τις υψηλότερες εκπομπές από κάθε SSP, που κυμαίνονται από 104-126 GtCO₂ έως το 2100, με αποτέλεσμα την αύξηση της θερμοκρασίας κατά 4.7-5.1 C

Ενώ τα baseline σενάρια SSP αντιπροσωπεύουν όλους τους κόσμους χωρίς νέες πολιτικές για την αντιμετώπιση της κλιματικής αλλαγής, διαφέρουν σημαντικά στον τρόπο με τον οποίο βλέπουν την αλλαγή της παγκόσμιας χρήσης ενέργειας. Ορισμένα σενάρια, όπως το SSP3, προβλέπουν μικρή ανάπτυξη των εναλλακτικών τεχνολογιών χαμηλών εκπομπών άνθρακα, ή τεχνολογιών που μπορούν να αντιμετωπίσουν φθηνά αρνητικές επιπτώσεις των ορυκτών καυσίμων, όπως η ατμοσφαιρική ρύπανση στο SSP5. Σε αυτούς τους κόσμους, ο άνθρακας εξακολουθεί να είναι μία από τις πρωτογενείς παγκόσμιες πηγές ενέργειας μέχρι το τέλος του αιώνα, οδηγώντας σε υψηλές εκπομπές CO₂ και την αύξηση της θερμοκρασίας. Άλλα σενάρια, όπως το SSP1 και SSP4, έχουν ένα πολύ μεγαλύτερο μερίδιο της ενέργειας που προέρχεται από τις ανανεώσιμες πηγές, με κάποια ηλεκτροδότηση των τρεχόντων τελικών χρήσεων ορυκτών καυσίμων, όπως η μεταφορά ή η θέρμανση, αλλά που οδηγούνται από το μειωμένο κόστος παρά τις ανησυχίες για το κλίμα.

ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΧΑΡΤΟΦΥΛΑΚΙΟΥ ΓΙΑ ΤΟΝ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟ ΒΕΛΤΙΣΤΩΝ ΧΑΡΤΟΦΥΛΑΚΙΩΝ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΩΝ ΥΠΟ ΤΟ ΠΡΙΣΜΑ ΣΤΟΧΑΣΤΙΚΗΣ ΚΑΙ ΝΤΕΤΕΡΜΙΝΙΣΤΙΚΗΣ ΑΒΕΒΑΙΟΤΗΤΑΣ

Primary energy in 2100 by model for SSP baseline scenarios



Σχήμα 4.3: Παγκόσμια χρήση πρωτογενούς ενέργειας για κάθε τύπο καυσίμου στο 2100 σε exajoules (EJ) για τα baseline σενάρια σε κάθε IAM και SSP. Η τρέχουσα ενεργειακή χρήση (για το 2010) παρουσιάζεται για αναφορά στην αριστερή στήλη.

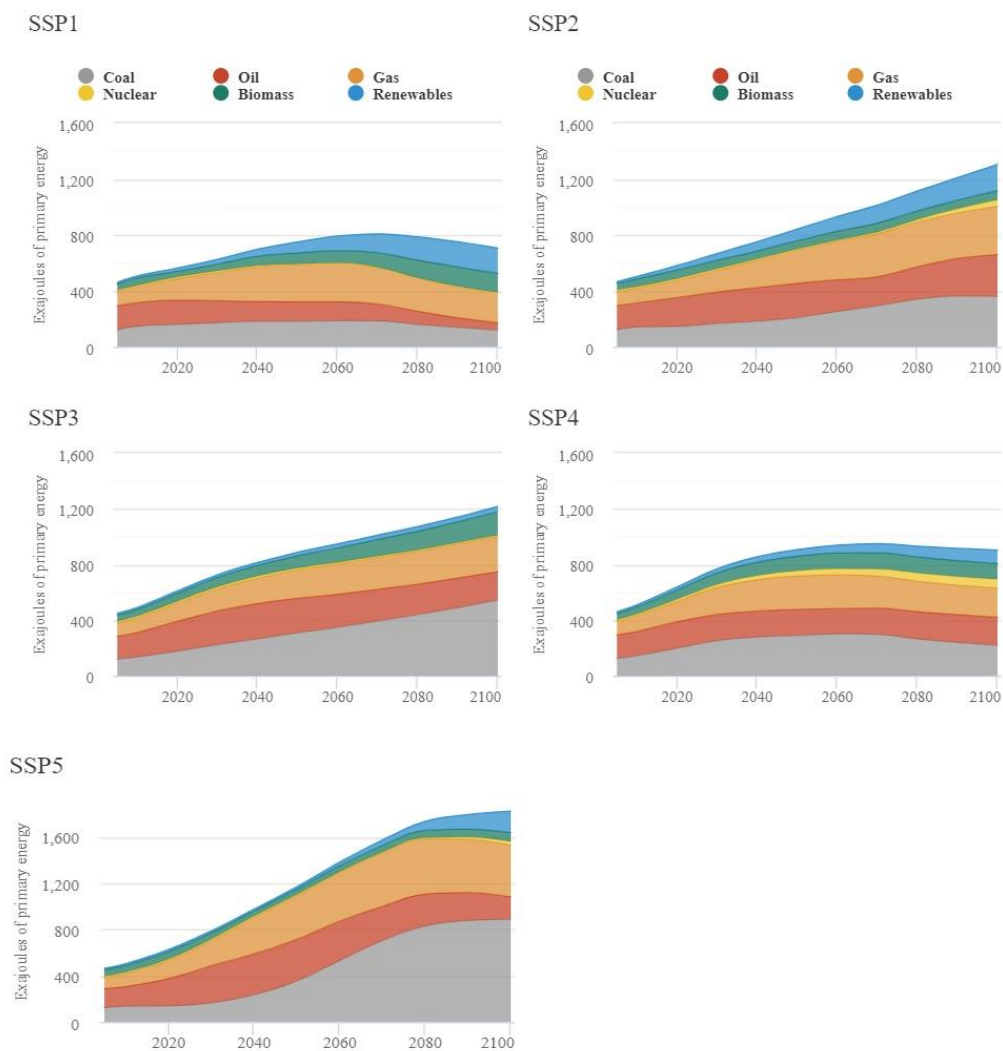
Τα baseline σενάρια SSP καλύπτουν ένα ευρύ φάσμα μελλοντικής ζήτησης ενέργειας. Στο άνω άκρο, το σενάριο SSP5 έχει ζήτηση ενέργειας πάνω από 1.500 exajoules ετησίως, τρεις φορές υψηλότερη από τη σημερινή των 500EJ. Τα SSP2 και SSP3 έχουν διπλάσια από την τρέχουσα ζήτηση ενέργειας, ενώ στο SSP1 η ζήτηση ενέργειας παραμένει μόνο 50% πάνω από τα σημερινά επίπεδα, παρά την ταχεία οικονομική ανάπτυξη.

Η ενεργειακή πρόσβαση είναι επίσης αρκετά διαφορετική στα SSPs. Στα SSP3 και SSP4 baseline σενάρια υπάρχει συνεχής χρήση της παραδοσιακής βιομάζας, όπως το ξύλο ή η κοπριά των ζώων, στα νοικοκυριά των αναπτυσσομένων χωρών, ενώ η χρήση του άνθρακα και της βιομάζας στα νοικοκυριά μειώνεται δραματικά στα άλλα τρία σενάρια.

Συνολικά, η χρήση άνθρακα είναι αρκετά υψηλή σε SSP3 και SSP5. Στο baseline σενάριο του SSP5 (MARKER), η χρήση άνθρακα μεταξύ 2005 και 2100 είναι περίπου 44.500 exajoules, σημαντικά μεγαλύτερη από τα τρέχοντα τεχνολογικά και οικονομικά ανακτήσιμα αποθεματικά των περίπου 21.000EJ.

ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΧΑΡΤΟΦΥΛΑΚΙΟΥ ΓΙΑ ΤΟΝ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟ ΒΕΛΤΙΣΤΩΝ ΧΑΡΤΟΦΥΛΑΚΙΩΝ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΩΝ ΥΠΟ ΤΟ ΠΡΙΣΜΑ ΣΤΟΧΑΣΤΙΚΗΣ ΚΑΙ ΝΤΕΤΕΡΜΙΝΙΣΤΙΚΗΣ ΑΒΕΒΑΙΟΤΗΤΑΣ

Ωστόσο, εξακολουθεί να είναι εντός της εμβέλειας όλων των γνωστών πόρων του άνθρακα, οι οποίοι εκτιμώνται σε περίπου 490.000 EJ, ένα μέρος των οποίων θα μπορούσε να γίνει οικονομικά ανακτήσιμο με πρόσθετες τεχνολογικές εξελίξεις. Όμως, τα υψηλά σενάρια χρήσης άνθρακα, όπως αυτά που υπάρχουν στο SSP5, έχουν επικριθεί στο παρελθόν ως δυνητικά μη ρεαλιστικά. Ακόμη και στο εστιασμένο στην αειφορία SSP1 η χρήση άνθρακα είναι κοντά στα σημερινά επίπεδα για το 2100, αντικατοπτρίζοντας την πρόκληση της μετάβασης μακριά από τα ορυκτά καύσιμα, ελλείψει πολιτικής για το κλίμα.



Σχήμα 4.4: Παγκόσμια χρήση πρωτογενούς ενέργειας ανά τύπο καυσίμου μεταξύ 2005 και 2100 σε exajoules (EJ) για κάθε baseline σενάριο SSP.

5. Εφαρμογή Προβλήματος

Μεταξύ των πιο ευρέως χρησιμοποιούμενων μεθόδων για τη δημιουργία του συνόλου των βέλτιστων χαρτοφυλακίων σε προβλήματα βελτιστοποίησης με πολλαπλές αντικειμενικές συναρτήσεις είναι η μέθοδος *ε-constraint*. Η κύρια ιδέα της μεθόδου *ε-constraint* είναι να βελτιστοποιηθεί μία από τις αντικειμενικές συναρτήσεις χρησιμοποιώντας τις άλλες αντικειμενικές συναρτήσεις ($p - 1$) ως περιορισμούς. Η παρακάτω εφαρμογή χρησιμοποιεί τη μέθοδο AUGMECON 2, μια επέκταση της μεθόδου *ε-constraint* (Mavrotas and Florios, 2013) για την καθοδήγηση του μοντέλου βελτιστοποίησης και την παραγωγή του συνόλου των βέλτιστων χαρτοφυλακίων. Η μέθοδος AUGMECON 2 εγγυάται την παραγωγή όλων των Pareto βέλτιστων λύσεων, αποφεύγοντας παράλληλα τη δημιουργία άλλων, μη βέλτιστων λύσεων. Το πρόβλημα βελτιστοποίησης του χαρτοφυλακίου λύνεται στο γενικό αλγεβρικό σύστημα μοντελοποίησης (GAMS).

Αρχικά διαμορφώνουμε ένα τρι-αντικειμενικό πρόβλημα βελτιστοποίησης, δεδομένου ότι υποθέτουμε τρία κριτήρια αξιολόγησης ή στόχους για να βελτιστοποιήσουμε:

- 1) Μεγιστοποίηση των μειώσεων των εκπομπών αερίων θερμοκηπίου
- 2) Μεγιστοποίηση της αλλαγής επιπέδου ενεργειακής πρόσβασης
- 3) Μεγιστοποίηση της αποφυγής πρόωρων θανάτων

Τα τεχνολογικά μονοπάτια περιλαμβάνουν υδροποιημένο αέριο πετρελαίου (LPG), φωτοβολταϊκά (PV), βιοαέριο, αιθανόλη, καύση ξυλάνθρακα και ξυλείας ως βιομάζας.

Στην συνέχεια επιλύονται τριανταέξι (36) προβλήματα βελτιστοποίησης. Αυτά διαφέρουν σε τρεις βασικές παραμέτρους:

- 1) Χρονικός ορίζοντας: λύνονται τρία διαφορετικά προβλήματα βελτιστοποίησης, με χρονικούς ορίζοντες μέχρι το 2020, 2030 και το 2040 αντίστοιχα. Τα τρία διαφορετικά χρονικά σημεία αντανακλώνται ως διαφορές στις τιμές των δεδομένων εισόδου ανάλυσης χαρτοφυλακίου.
- 2) Σενάρια πολιτικής : εξετάζονται δύο σενάρια, ήτοι ένα βασικό σενάριο χωρίς επιλογές για την αύξηση της βιώσιμης δασικής παραγωγής και ένα σενάριο πολιτικής που αναλαμβάνει δράσεις που επικεντρώνονται στην αύξηση της βιώσιμης παραγωγής. Η διαφορά μεταξύ των δύο σεναρίων έγκειται στο γεγονός ότι το πρώτο περιορίζεται από την τρέχουσα (χαμηλή) δασική απόδοση στην Ανατολική Αφρική, ενώ στο δεύτερο

σενάριο υπάρχει μια ενεργή εκστρατεία για την αύξηση της βιώσιμης παραγωγής βιομάζας μέσω της περιστροφικής δασοκομίας. Τα διαφορετικά σενάρια ερμηνεύονται ως διαφορές στα δεδομένα εισόδου ανάλυσης χαρτοφυλακίου.

- 3) Περιορισμός του προϋπολογισμού: δεδομένου ότι σκοπός της βελτιστοποίησης είναι να προσδιοριστούν οι ιδανικοί συνδυασμοί με περιορισμένους προϋπολογισμούς, λαμβάνεται υπόψη ένας περιορισμός του προϋπολογισμού προκειμένου να διασφαλιστεί ότι το συνολικό κόστος των εγκεκριμένων αιτήσεων δεν υπερβαίνει μια προκαθορισμένη τιμή. Εξετάζονται δύο διαφορετικοί δημοσιονομικοί περιορισμοί: ένας αυστηρός με χαμηλό προϋπολογισμό και ένας με υψηλότερο.
- 4) Κοινωνικοοικονομικά σενάρια SSPs: όλα τα προβλήματα λύνονται και ως προς τα τρία διαφορετικά σενάρια SSP που μας ενδιαφέρουν. Αυτά είναι τα SSP2, SSP3 και SSP5.

Τα σύνολα δεδομένων εισόδου που χρησιμοποιούνται για την ανάλυση χαρτοφυλακίου προέρχονται από το μοντέλο Global Change Assessment Model (GCAM). Αυτά τα σύνολα δεδομένων παρέχουν πληροφορίες σχετικά με τη συμβολή κάθε τεχνολογίας σε καθεμία από τις αντικειμενικές λειτουργίες κάτω από είκοσι (20) διαφορετικές τιμές επιδότησης. Η άσκηση μοντελοποίησης GCAM βασίζεται στα κοινά κοινωνικοοικονομικά μονοπάτια (SSP) (O'Neill *et al.*, 2014), και τα αποτελέσματα από συγκεκριμένα SSPs, δηλαδή τα SSP2 ('Middle of the Road'), SSP3 ('Regional Rivalry') και SSP5 ('Fossil-fuelled Development') έχουν χρησιμεύσει ως είσοδος για το πρόβλημα βελτιστοποίησης. Ο κύριος σκοπός της μοντελοποίησης διαφορετικών SSPs ήταν η εξεύρεση των περιθωρίων της αποτελεσματικότητας της πολιτικής, τα οποία χρησιμοποιούνται για την ανάλυση ευαισθησίας. Στο πλαίσιο της Ανατολικής Αφρικής, τα SSP3 και SSP5 μπορεί να θεωρηθούν ως ακραία σενάρια της αντίστοιχα χαμηλής και υψηλής ανάπτυξης, και αναμένεται να αντιπροσωπεύουν τα περιθώρια της αβεβαιότητας για την εφαρμογή της πολιτικής, αν και σε λίγες περιπτώσεις, οι μέσες συνθήκες που εκπροσωπούνται στο SSP2 μεταφράζονται σε υψηλότερη ή χαμηλότερη σχέση κόστους-αποτελεσματικότητας.

Το αποτέλεσμα του καθενός από τα 36 τρεξίματα βελτιστοποίησης ανάλυσης χαρτοφυλακίων αποτελεί ένα Pareto μέτωπο των βέλτιστων ενεργειακών χαρτοφυλακίων. Κάθε χαρτοφυλάκιο είναι ένα σύνολο ενεργειακών τεχνολογιών, μεταξύ των οποίων διανέμονται διαφορετικά επίπεδα επιδότησης, που αντιστοιχούν σε διαφορετική συμβολή στα κριτήρια βελτιστοποίησης. Πληροφορίες σχετικά με τον τρόπο συμμετοχής κάθε τεχνολογίας στα χαρτοφυλάκια όσον αφορά την επιδότηση, τη μείωση των εκπομπών αερίων θερμοκηπίου, την πρόσβαση στην ενέργεια και τη μείωση της θνησιμότητας που σχετίζεται με τη ρύπανση μπορούν εύκολα να εξαχθούν από την ανάλυση του χαρτοφυλακίου.

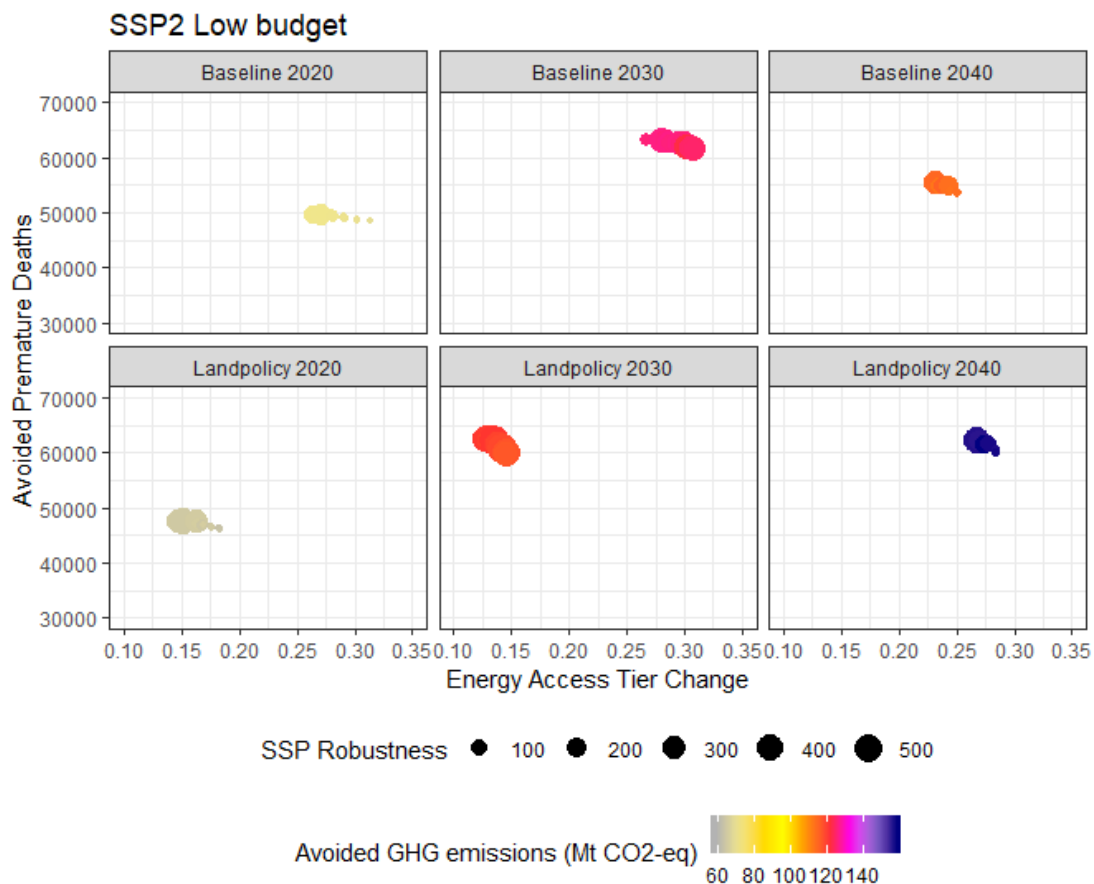
ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΧΑΡΤΟΦΥΛΑΚΙΟΥ ΓΙΑ ΤΟΝ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟ ΒΕΛΤΙΣΤΩΝ
ΧΑΡΤΟΦΥΛΑΚΙΩΝ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΩΝ ΥΠΟ ΤΟ ΠΡΙΣΜΑ ΣΤΟΧΑΣΤΙΚΗΣ ΚΑΙ ΝΤΕΤΕΡΜΙΝΙΣΤΙΚΗΣ
ΑΒΕΒΑΙΟΤΗΤΑΣ

Η προτεινόμενη προσέγγιση αξιολογεί αποτελεσματικά την ευρωστία των βέλτιστων χαρτοφυλακίων που προκύπτουν, εξετάζοντας τις επιπτώσεις τόσο της ντετερμινιστικής όσο και της στοχαστικής αβεβαιότητας. Η ντετερμινιστική αβεβαιότητα υποτίθεται μέσω της ανάλυσης σεναρίων: έχουμε σχεδιάσει διαφορετικά σενάρια όσον αφορά την απόδοση της τεχνολογίας σε καθεμία από τις προαναφερόμενες παραμέτρους, αλλά και όσον αφορά τον μέγιστο προϋπολογισμό που μπορεί να χορηγηθεί για την υποστήριξη αυτών των τεχνολογιών. Όσο αφορά τα σενάρια πολιτικής το σενάριο «baseline» δεν περιλαμβάνει επιλογές για την αύξηση της βιώσιμης παραγωγής των δασών. Από την άλλη πλευρά, το σενάριο «landpolicy» προϋποθέτει εκπαιδευτικές πολιτικές που επικεντρώνονται στη διδασκαλία των ιδιοκτητών δασικών εκτάσεων πώς να εφαρμόσουν την αμειψισπορά κλπ.

Όσον αφορά τη στοχαστική αβεβαιότητα, η οποία είναι εγγενής σε αυτές τις παραμέτρους, αυτή ενσωματώνεται στο μοντέλο μέσω μιας προσομοίωσης Monte Carlo. Οι αβέβαιες παράμετροι του μοντέλου, ήτοι η απόδοση των υποτιθέμενων τεχνολογιών όσον αφορά τη μεγιστοποίηση των μειώσεων των εκπομπών, την πρόσβαση στην ενέργεια και τα οφέλη για την υγεία, θεωρούνται στοχαστικές, παίρνοντας τιμές από μια ομοιόμορφη κατανομή. Αρχικά, προσδιορίζεται το μέτωπο Pareto αναφοράς, που προκύπτει όταν τρέχουμε τη βελτιστοποίηση με τις εισόδους όπως προκύπτουν από το μοντέλο GCAM, δηλαδή χωρίς να λαμβάνουμε υπόψη την αβεβαιότητα των παραμέτρων. Στη συνέχεια, η προσομοίωση Monte Carlo εκτελείται επαναληπτικά για να δοκιμαστούν τυχαίες τιμές για τις αβέβαιες παραμέτρους, και το μοντέλο στη συνέχεια επιλύεται για να δημιουργήσει το σύνολο των Pareto βέλτιστων χαρτοφυλακίων. Τελικά, η εκτέλεση πολλαπλών επαναλήψεων του Monte Carlo έχει ως αποτέλεσμα έναν μεγάλο αριθμό διαφοροποιημένων Pareto μετώπων, τα οποία αναλύονται για να εξαχθούν συμπεράσματα σχετικά με την ευρωστία των χαρτοφυλακίων που αποτελούν το Pareto μέτωπο όταν δεν εξετάζεται καμία αβεβαιότητα. Σε αυτή την ανάλυση, πραγματοποιούνται 1.000 επαναλήψεις Monte Carlo.

6.Αποτελέσματα

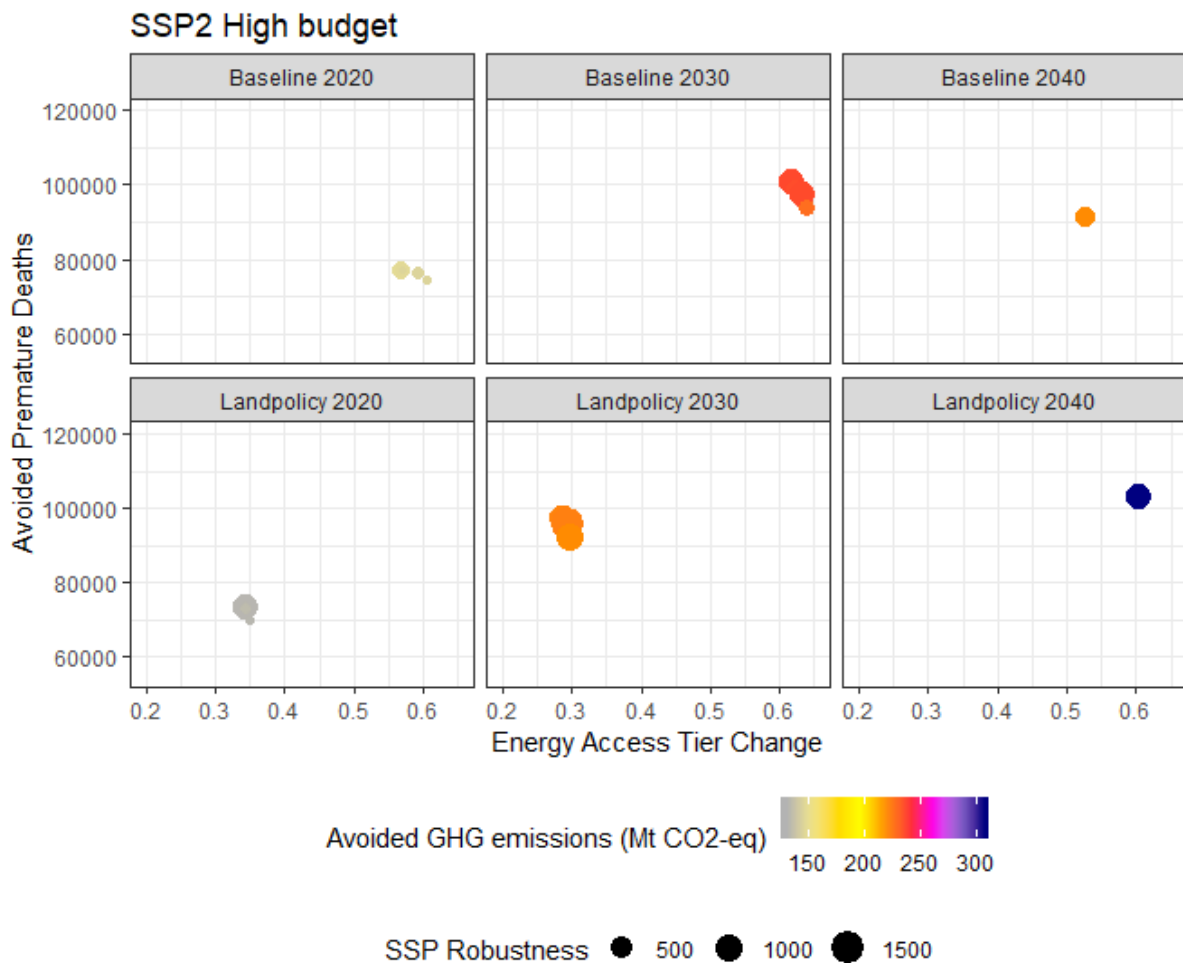
Στις παρακάτω γραφικές παραστάσεις φαίνονται τα αποτελέσματα για κάθε κοινωνικοοικονομικό σενάριο SSP και τον αντίστοιχο προϋπολογισμό του. Στον κάθετο άξονα υπάρχει ο δείκτης της αποφυγής πρόωρων θανάτων και στον οριζόντιο άξονα ο δείκτης της αλλαγής επιπέδου ενεργειακής πρόσβασης. Οι μειώσεις των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου διαβαθμίζονται ανάλογα με τον χρωματισμό, όπως φαίνεται και στο σχετικό υπόδειγμα κάτω από τις γραφικές παραστάσεις. Επίσης, η ευστάθεια των αποτελεσμάτων αναπαρίσταται με το μέγεθος της κουκκίδας. Όσο μεγαλύτερη είναι η κουκίδα τόσο πιο ευσταθές είναι το αντίστοιχο αποτέλεσμα.



Σχήμα 6.1: Αποτελέσματα για SSP2 με μικρό προϋπολογισμό

ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΧΑΡΤΟΦΥΛΑΚΙΟΥ ΓΙΑ ΤΟΝ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟ ΒΕΛΤΙΣΤΩΝ
ΧΑΡΤΟΦΥΛΑΚΙΩΝ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΩΝ ΥΠΟ ΤΟ ΠΡΙΣΜΑ ΣΤΟΧΑΣΤΙΚΗΣ ΚΑΙ ΝΤΕΤΕΡΜΙΝΙΣΤΙΚΗΣ
ΑΒΕΒΑΙΟΤΗΤΑΣ

Για το σενάριο SSP2 και για μικρό προϋπολογισμό παρατηρούμε ότι καλύτερα αποτελέσματα παρουσιάζουν σε συνολικό βαθμό τα σενάρια Baseline 2030 και Landpolicy 2040. Αυτό προκύπτει αν συνυπολογίσουμε τον δείκτη αποφυγής πρόωρων θανάτων, τον δείκτη αλλαγής επιπέδου ενεργειακής πρόσβασης και τις μειώσεις εκπομπών αερίου του θερμοκηπίου, με το δεύτερο σενάριο να παρουσιάζει και πιο αυξημένη ευστάθεια.

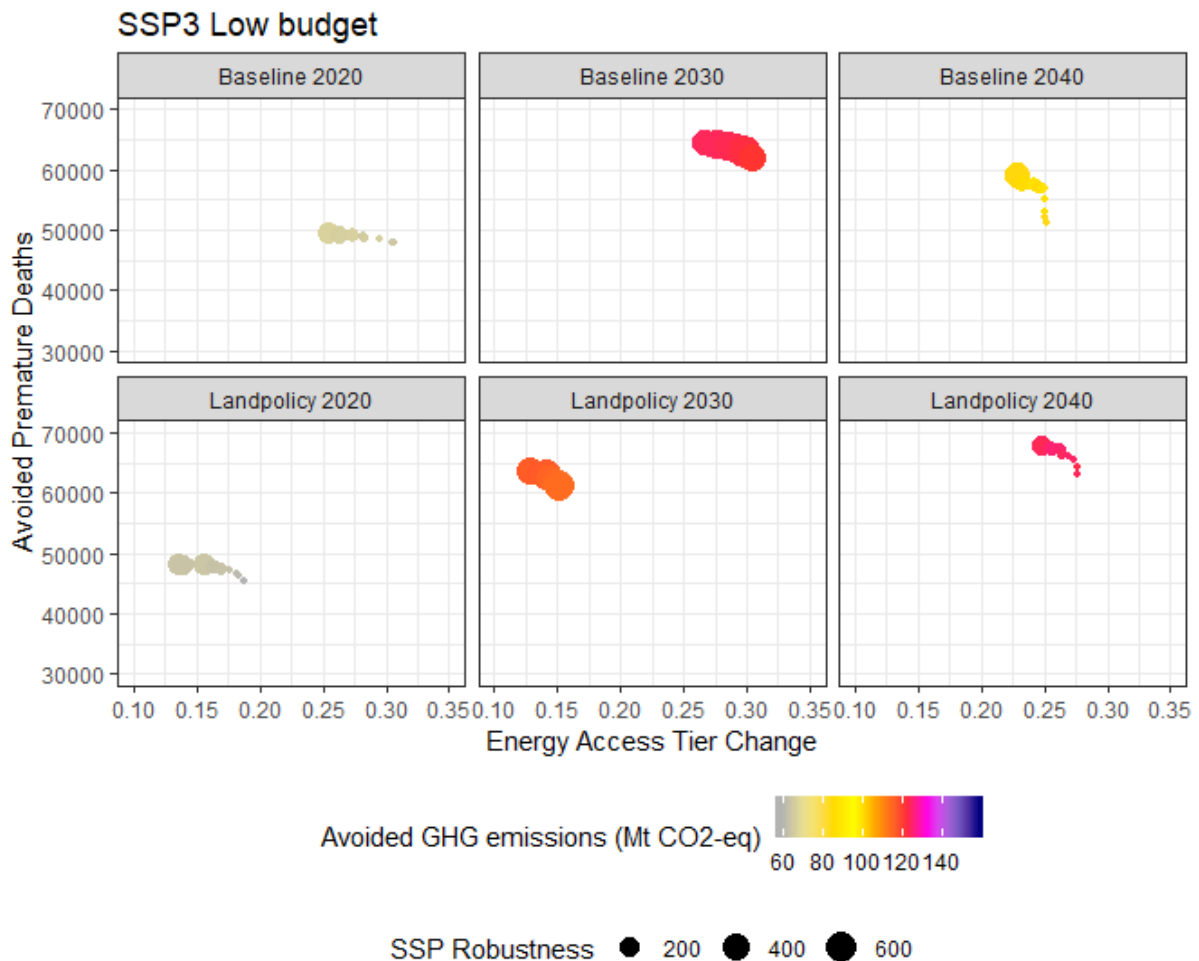


Σχήμα 6.2: Αποτελέσματα για SSP2 με υψηλό προϋπολογισμό

Και στο αντίστοιχο σενάριο για υψηλότερο αυτή τη φορά προϋπολογισμό, φαίνεται ότι σε συνολικό βαθμό καλύτερα αποτελέσματα παρουσιάζουν και πάλι τα σενάρια Baseline 2030

ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΧΑΡΤΟΦΥΛΑΚΙΟΥ ΓΙΑ ΤΟΝ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟ ΒΕΛΤΙΣΤΩΝ ΧΑΡΤΟΦΥΛΑΚΙΩΝ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΩΝ ΥΠΟ ΤΟ ΠΡΙΣΜΑ ΣΤΟΧΑΣΤΙΚΗΣ ΚΑΙ ΝΤΕΤΕΡΜΙΝΙΣΤΙΚΗΣ ΑΒΕΒΑΙΟΤΗΤΑΣ

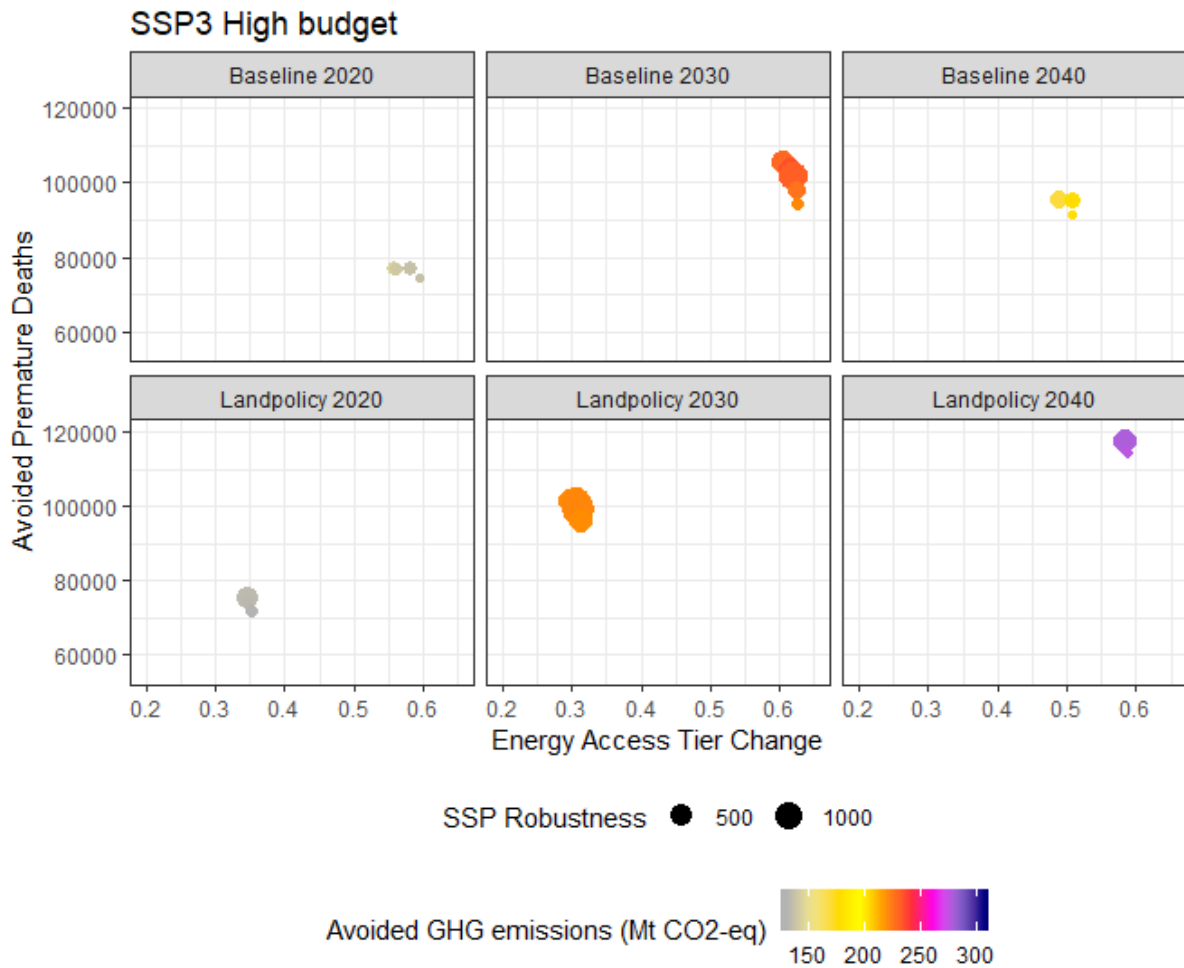
και Landpolicy 2040. Στην πρώτη περίπτωση έχουμε μεγαλύτερη αλλαγή επιπέδου ενεργειακής πρόσβασης ενώ στην δεύτερη έχουμε μεγαλύτερη αποφυγή πρόωρων θανάτων.



Σχήμα 6.3: Αποτελέσματα για SSP3 με μικρό προϋπολογισμό

Συνεχίζοντας με το SSP3 σενάριο και για μικρό προϋπολογισμό, παρατηρούμε ότι καλύτερα αποτελέσματα παρουσιάζει το Baseline 2030 σενάριο έχοντας αυξημένους όλους τους δείκτες, όπως και αυξημένη ευστάθεια. Το Landpolicy 2040 ακολουθεί έχοντας χαμηλότερη ευστάθεια και έπειτα το Baseline 2040 έχοντας χαμηλότερο δείκτη αποφυγής εκπομπών αερίου θερμοκηπίου.

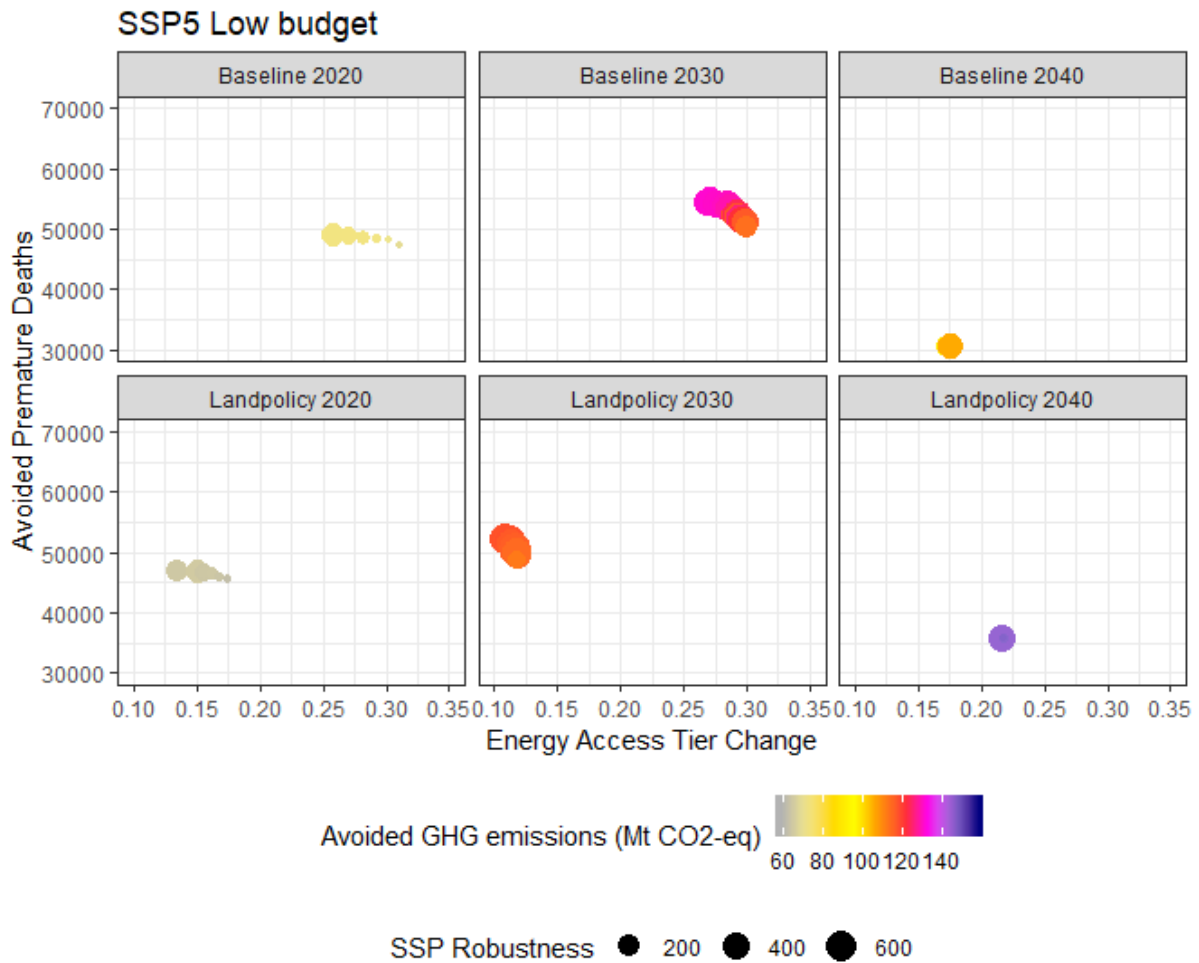
ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΧΑΡΤΟΦΥΛΑΚΙΟΥ ΓΙΑ ΤΟΝ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟ ΒΕΛΤΙΣΤΩΝ ΧΑΡΤΟΦΥΛΑΚΙΩΝ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΩΝ ΥΠΟ ΤΟ ΠΡΙΣΜΑ ΣΤΟΧΑΣΤΙΚΗΣ ΚΑΙ ΝΤΕΤΕΡΜΙΝΙΣΤΙΚΗΣ ΑΒΕΒΑΙΟΤΗΤΑΣ



Σχήμα 6.4: Αποτελέσματα για SSP3 με υψηλό προϋπολογισμό

Για υψηλό προϋπολογισμό στο ίδιο σενάριο βλέπουμε ότι εξαιρετικά αποτελέσματα παρουσιάζει το Landpolicy 2040 σενάριο έχοντας πολύ αυξημένους όλους τους δείκτες. Το σενάριο Baseline 2030 επίσης παρουσιάζει αρκετά καλά αποτελέσματα έχοντας και λίγο πιο αυξημένα επίπεδα ευστάθειας.

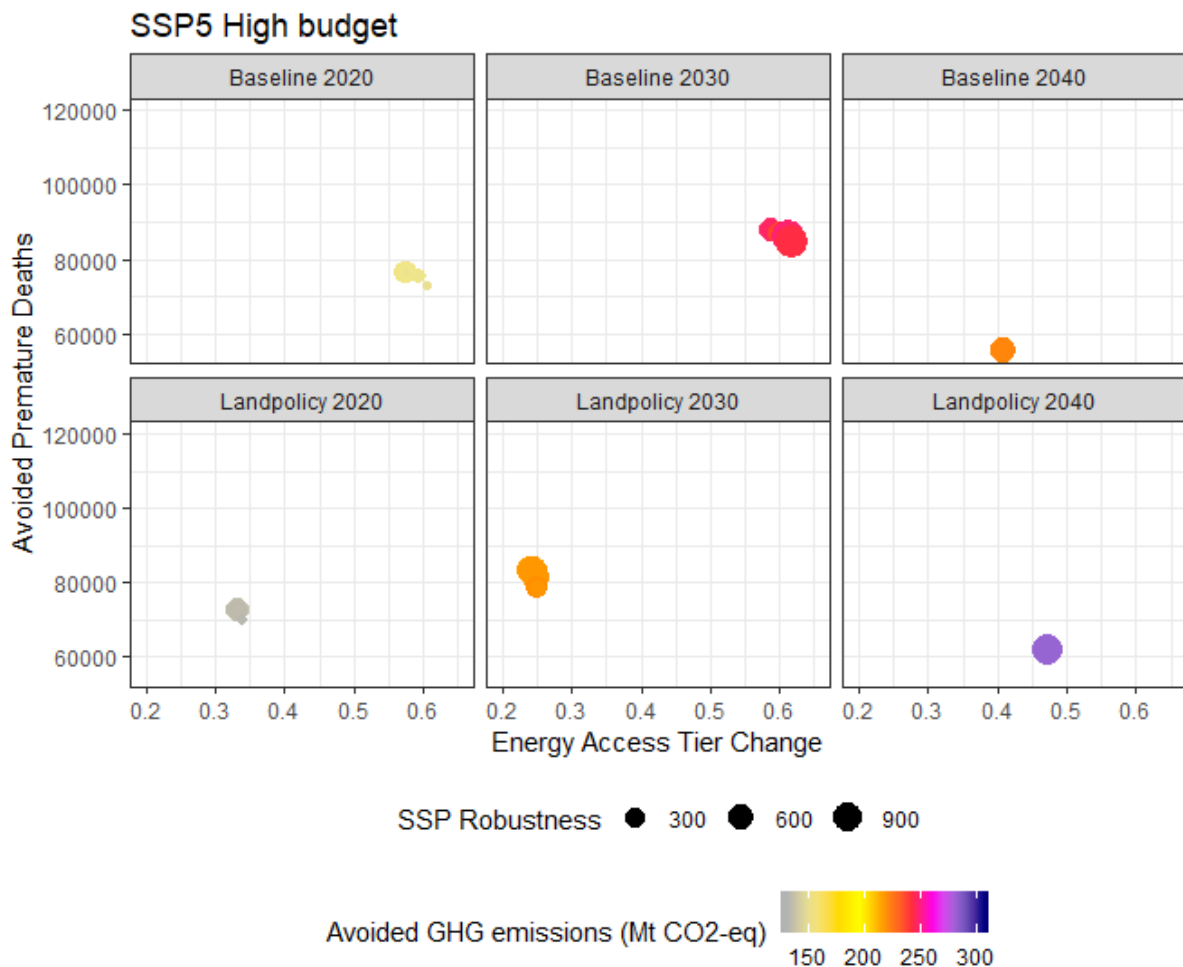
ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΧΑΡΤΟΦΥΛΑΚΙΟΥ ΓΙΑ ΤΟΝ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟ ΒΕΛΤΙΣΤΩΝ ΧΑΡΤΟΦΥΛΑΚΙΩΝ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΩΝ ΥΠΟ ΤΟ ΠΡΙΣΜΑ ΣΤΟΧΑΣΤΙΚΗΣ ΚΑΙ ΝΤΕΤΕΡΜΙΝΙΣΤΙΚΗΣ ΑΒΕΒΑΙΟΤΗΤΑΣ



Σχήμα 6.5: Αποτελέσματα για SSP5 με μικρό προϋπολογισμό

Στο σενάριο SSP5 και για μικρό προϋπολογισμό παρατηρούμε γενικότερα χειρότερα αποτελέσματα σχεδόν σε όλες τις περιπτώσεις, αν εξαιρέσουμε το σενάριο Baseline 2030 το οποίο έχει καλή ευστάθεια και σχετικά υψηλές τιμές σε όλους τους δείκτες του.

ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΧΑΡΤΟΦΥΛΑΚΙΟΥ ΓΙΑ ΤΟΝ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟ ΒΕΛΤΙΣΤΩΝ ΧΑΡΤΟΦΥΛΑΚΙΩΝ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΩΝ ΥΠΟ ΤΟ ΠΡΙΣΜΑ ΣΤΟΧΑΣΤΙΚΗΣ ΚΑΙ ΝΤΕΤΕΡΜΙΝΙΣΤΙΚΗΣ ΑΒΕΒΑΙΟΤΗΤΑΣ



Σχήμα 6.6: Αποτελέσματα για SSP5 με υψηλό προϋπολογισμό

Τελειώνοντας με το ίδιο σενάριο και για υψηλό προϋπολογισμό παρατηρούμε και πάλι αρκετά μέτρια αποτελέσματα. Ξεχωρίζει μόνο το Baseline 2030 σενάριο με αρκετά υψηλό δείκτη ευστάθειας και αρκετά υψηλές τιμές στους δείκτες βελτιστοποίησης.

Στην συνέχεια, έχουμε δημιουργήσει γραφικές παραστάσεις που δείχνουν την συμμετοχή των έξι τεχνολογιών της εφαρμογής στους δείκτες μείωσης των εκπομπών αερίου θερμοκηπίου, μείωσης πρόωρων θανάτων, αλλαγής επιπέδου ενεργειακής πρόσβασης και επιδότησης. Οι παραστάσεις έχουν δημιουργηθεί και για τους δύο διαθέσιμους προϋπολογισμούς και παρουσιάζονται με βάση το κοινωνικοοικονομικό σενάριο SSP που εξετάζεται.

ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΧΑΡΤΟΦΥΛΑΚΙΟΥ ΓΙΑ ΤΟΝ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟ ΒΕΛΤΙΣΤΩΝ ΧΑΡΤΟΦΥΛΑΚΙΩΝ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΩΝ ΥΠΟ ΤΟ ΠΡΙΣΜΑ ΣΤΟΧΑΣΤΙΚΗΣ ΚΑΙ ΝΤΕΤΕΡΜΙΝΙΣΤΙΚΗΣ ΑΒΕΒΑΙΟΤΗΤΑΣ



Σχήμα 6.7: Συμμετοχή τεχνολογιών στην μείωση εκπομπών αερίων (χαμηλός προϋπολογισμός)

ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΧΑΡΤΟΦΥΛΑΚΙΟΥ ΓΙΑ ΤΟΝ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟ ΒΕΛΤΙΣΤΩΝ
ΧΑΡΤΟΦΥΛΑΚΙΩΝ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΩΝ ΥΠΟ ΤΟ ΠΡΙΣΜΑ ΣΤΟΧΑΣΤΙΚΗΣ ΚΑΙ ΝΤΕΤΕΡΜΙΝΙΣΤΙΚΗΣ
ΑΒΕΒΑΙΟΤΗΤΑΣ

Στο SSP2 σενάριο παρατηρούμε την μεγάλη συμμετοχή του βιοαερίου στην μείωση των εκπομπών αερίου του θερμοκηπίου. Σε αρκετά μεγάλο βαθμό συνεισφέρει και το υδροποιημένο αέριο πετρελαίου, ενώ μικρότερη συμμετοχή έχουν οι τεχνολογίες των φωτοβολταϊκών, της καύσης ξυλάνθρακα και της αιθανόλης. Η συμμετοχή της ξυλείας ως βιομάζας είναι μηδενική. Στο SSP3 σενάριο τα αποτελέσματα είναι σχεδόν ίδια με πριν με την διαφορά ότι στα σενάρια Baseline2040 και Landpolicy2040 βλέπουμε αυξημένη συμμετοχή του υδροποιημένου αερίου πετρελαίου και των φωτοβολταϊκών και όπως είναι λογικό μείωση αντίστοιχα στην συμμετοχή του βιοαερίου. Τέλος, στο SSP5 σενάριο η κύρια διαφορά που παρατηρούμε είναι μια μείωση στην συμμετοχή του υδροποιημένου αερίου πετρελαίου και των φωτοβολταϊκών κατά τον χρονικό ορίζοντα του 2040.

ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΧΑΡΤΟΦΥΛΑΚΙΟΥ ΓΙΑ ΤΟΝ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟ ΒΕΛΤΙΣΤΩΝ ΧΑΡΤΟΦΥΛΑΚΙΩΝ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΩΝ ΥΠΟ ΤΟ ΠΡΙΣΜΑ ΣΤΟΧΑΣΤΙΚΗΣ ΚΑΙ ΝΤΕΤΕΡΜΙΝΙΣΤΙΚΗΣ ΑΒΕΒΑΙΟΤΗΤΑΣ



Σχήμα 6.8: Συμμετοχή τεχνολογιών στην μείωση πρόωρων θανάτων (χαμηλός προϋπολογισμός)

Όσον αφορά την μείωση θανάτων τώρα, στο SSP2 σενάριο βλέπουμε ότι υπάρχει μεγάλη συνεισφορά του βιοαερίου και μικρότερη του υγροποιημένου αερίου πετρελαίου, των φωτοβολταϊκών και των άλλων τεχνολογιών. Η τεχνολογία των καυσόξυλων δεν συμμετέχει καθόλου στην μείωση των πρόωρων θανάτων καθώς έχει αρνητική επιρροή στην υγεία των ανθρώπων. Στα SSP3 και SSP5 σενάρια δεν παρατηρείται κάποια σημαντική αλλαγή, παρά μόνο μια αυξομείωση στην συμμετοχή των φωτοβολταϊκών.

ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΧΑΡΤΟΦΥΛΑΚΙΟΥ ΓΙΑ ΤΟΝ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟ ΒΕΛΤΙΣΤΩΝ ΧΑΡΤΟΦΥΛΑΚΙΩΝ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΩΝ ΥΠΟ ΤΟ ΠΡΙΣΜΑ ΣΤΟΧΑΣΤΙΚΗΣ ΚΑΙ ΝΤΕΤΕΡΜΙΝΙΣΤΙΚΗΣ ΑΒΕΒΑΙΟΤΗΤΑΣ



Σχήμα 6.9: Συμμετοχή τεχνολογιών στην αλλαγή επιπέδου ενεργειακής πρόσβασης (χαμηλός προϋπολογισμός)

Στο SSP2 σενάριο παρατηρούμε την έντονη συμμετοχή του βιοαερίου στην αλλαγή επιπέδου ενεργειακής πρόσβασης. Επίσης σημαντικό ρόλο παίζει το υγροποιημένο αέριο πετρελαίου και τα φωτοβολταϊκά. Στο SSP3 σενάριο υπάρχει μια μεγαλύτερη συμμετοχή των φωτοβολταϊκών στον ορίζοντα 2030 και 2040, ενώ στο SSP5 φαίνεται μια αύξηση της αιθανόλης στα πρώτα τρία σενάρια.

ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΧΑΡΤΟΦΥΛΑΚΙΟΥ ΓΙΑ ΤΟΝ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟ ΒΕΛΤΙΣΤΩΝ ΧΑΡΤΟΦΥΛΑΚΙΩΝ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΩΝ ΥΠΟ ΤΟ ΠΡΙΣΜΑ ΣΤΟΧΑΣΤΙΚΗΣ ΚΑΙ ΝΤΕΤΕΡΜΙΝΙΣΤΙΚΗΣ ΑΒΕΒΑΙΟΤΗΤΑΣ



Σχήμα 6.10: Συμμετοχή τεχνολογιών στην επιδότηση (χαμηλός προϋπολογισμός)

Στο SSP2 φαίνεται ότι μεγάλη συμμετοχή στην επιδότηση έχουν με περίπου ίσα ποσοστά το υγροποιημένο αέριο πετρελαίου και το βιοαέριο. Στο SSP3 και σε ορίζοντα 2040 παρατηρείται μια αυξημένη συμμετοχή του υγροποιημένου αερίου πετρελαίου στην επιδότηση, ενώ στο SSP5 στα πρώτα τρία σενάρια υπάρχει μια αύξηση της συμμετοχής της αιθανόλης στην επιδότηση.

ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΧΑΡΤΟΦΥΛΑΚΙΟΥ ΓΙΑ ΤΟΝ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟ ΒΕΛΤΙΣΤΩΝ ΧΑΡΤΟΦΥΛΑΚΙΩΝ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΩΝ ΥΠΟ ΤΟ ΠΡΙΣΜΑ ΣΤΟΧΑΣΤΙΚΗΣ ΚΑΙ ΝΤΕΤΕΡΜΙΝΙΣΤΙΚΗΣ ΑΒΕΒΑΙΟΤΗΤΑΣ



Σχήμα 6.11: Συμμετοχή τεχνολογιών στην μείωση εκπομπών αερίων (υψηλός προϋπολογισμός)

Στην περίπτωση τώρα που έχουμε στην διάθεσή μας τον υψηλότερο προϋπολογισμό, παρατηρούμε ότι στο σενάριο SSP2 μεγαλύτερη συμμετοχή στην μείωση εκπομπών αερίων έχει το υγροποιημένο αέριο πετρελαίου και τα φωτοβολταϊκά, ενώ το βιοαέριο ακολουθεί στη σειρά. Αυτό συμβαίνει σε αντίθεση με την περίπτωση του χαμηλού προϋπολογισμού όπου το

ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΧΑΡΤΟΦΥΛΑΚΙΟΥ ΓΙΑ ΤΟΝ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟ ΒΕΛΤΙΣΤΩΝ ΧΑΡΤΟΦΥΛΑΚΙΩΝ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΩΝ ΥΠΟ ΤΟ ΠΡΙΣΜΑ ΣΤΟΧΑΣΤΙΚΗΣ ΚΑΙ ΝΤΕΤΕΡΜΙΝΙΣΤΙΚΗΣ ΑΒΕΒΑΙΟΤΗΤΑΣ

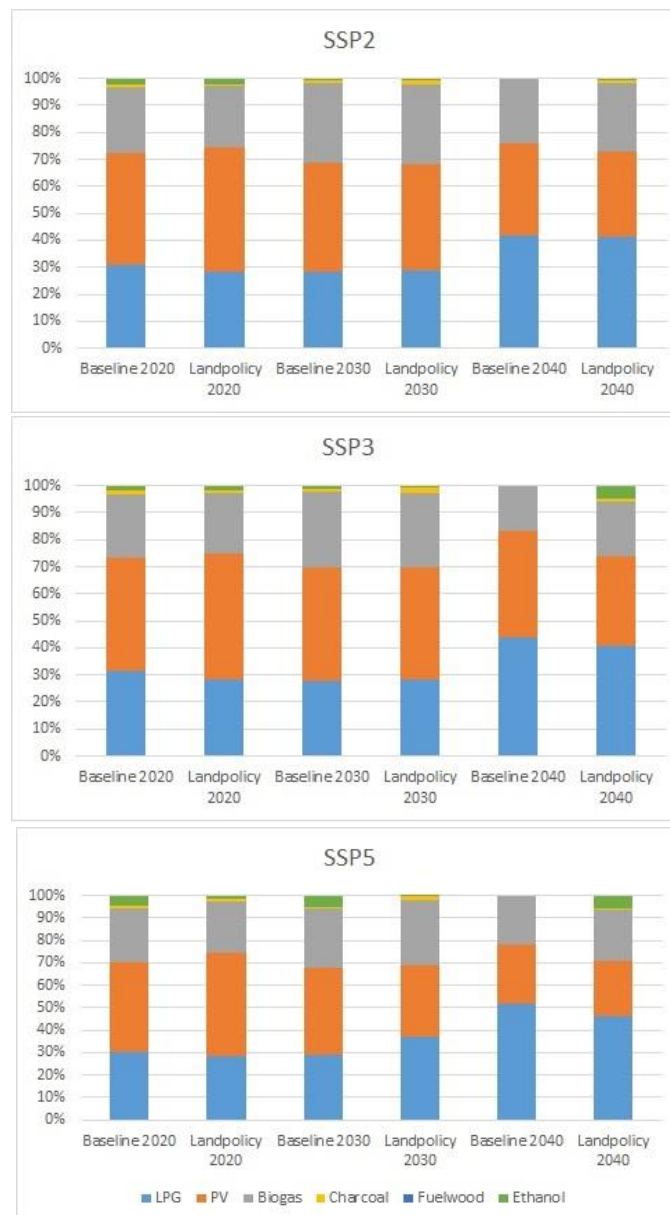
βιοαέριο είχε πολύ μεγάλη συνεισφορά, γιατί οι τεχνολογίες του υγροποιημένου αερίου πετρελαίου και των φωτοβολταϊκών χρειάζονται μεγαλύτερο κεφάλαιο. Στα σενάρια SSP3 και SSP5 φαίνονται σχεδόν τα ίδια αποτελέσματα με την μόνη διαφορά ότι υπάρχει μια ακόμα μικρότερη συμμετοχή του βιοαερίου προς τον ορίζοντα 2040.



Σχήμα 6.12: Συμμετοχή τεχνολογιών στην μείωση πρόωρων θανάτων (υψηλός προϋπολογισμός)

ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΧΑΡΤΟΦΥΛΑΚΙΟΥ ΓΙΑ ΤΟΝ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟ ΒΕΛΤΙΣΤΩΝ ΧΑΡΤΟΦΥΛΑΚΙΩΝ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΩΝ ΥΠΟ ΤΟ ΠΡΙΣΜΑ ΣΤΟΧΑΣΤΙΚΗΣ ΚΑΙ ΝΤΕΤΕΡΜΙΝΙΣΤΙΚΗΣ ΑΒΕΒΑΙΟΤΗΤΑΣ

Στο SSP2 σενάριο παρατηρούμε ότι η τεχνολογία του βιοαερίου είναι αυτή που έχει την μεγαλύτερη συμμετοχή στην μείωση πρόωρων θανάτων και ακολουθείται από τις τεχνολογίες υγροποιημένου αερίου πετρελαίου και φωτοβολταϊκών. Και εδώ πρέπει να επισημάνουμε την απουσία της τεχνολογίας των καυσόξυλων η οποία έχει αρνητική συνέπεια στην υγεία. Στα σενάρια SSP3 και SSP5 δεν παρουσιάζεται κάποια μεγάλη αλλαγή, παρά μόνο μια αύξηση της συμμετοχής της τεχνολογίας αιθανόλης στον ορίζοντα 2030.



Σχήμα 6.13: Συμμετοχή τεχνολογιών στην αλλαγή επιπέδου ενεργειακής πρόσβασης (υψηλός προϋπολογισμός)

ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΧΑΡΤΟΦΥΛΑΚΙΟΥ ΓΙΑ ΤΟΝ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟ ΒΕΛΤΙΣΤΩΝ ΧΑΡΤΟΦΥΛΑΚΙΩΝ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΩΝ ΥΠΟ ΤΟ ΠΡΙΣΜΑ ΣΤΟΧΑΣΤΙΚΗΣ ΚΑΙ ΝΤΕΤΕΡΜΙΝΙΣΤΙΚΗΣ ΑΒΕΒΑΙΟΤΗΤΑΣ

Σε ότι αφορά τώρα την αλλαγή επιπέδου ενεργειακής πρόσβασης, παρατηρούμε στο SSP2 σενάριο την μεγάλη συμμετοχή των τεχνολογιών των φωτοβολταϊκών και του υγροποιημένου αερίου πετρελαίου. Και εδώ είναι μικρότερη η συνεισφορά του βιοαερίου καθώς έχουμε μεγαλύτερο προϋπολογισμό. Στα σενάρια SSP3 και SSP5 δεν υπάρχουν μεγάλες αλλαγές και φαίνεται μια μικρή μόνο αύξηση της συμμετοχής της τεχνολογίας της αιθανόλης.



Σχήμα 6.14: Συμμετοχή τεχνολογιών στην επιδότηση (υψηλός προϋπολογισμός)

ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΧΑΡΤΟΦΥΛΑΚΙΟΥ ΓΙΑ ΤΟΝ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟ ΒΕΛΤΙΣΤΩΝ
ΧΑΡΤΟΦΥΛΑΚΙΩΝ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΩΝ ΥΠΟ ΤΟ ΠΡΙΣΜΑ ΣΤΟΧΑΣΤΙΚΗΣ ΚΑΙ ΝΤΕΤΕΡΜΙΝΙΣΤΙΚΗΣ
ΑΒΕΒΑΙΟΤΗΤΑΣ

Στο τελευταίο διάγραμμα που αφορά την συμμετοχή των τεχνολογιών στην επιδότηση, παρατηρούμε στο SSP2 μεγάλο ποσοστό συμμετοχής στις τεχνολογίες υδροποιημένου αερίου πετρελαίου και φωτοβολταϊκών, ενώ η τεχνολογία βιοαερίου έχει αρκετά μικρό ποσοστό συμμετοχής. Αυτό συμβαίνει γιατί έχουμε υψηλότερο προϋπολογισμό και επιδοτούνται οι τεχνολογίες αυτές. Στο SSP3 σενάριο υπάρχει μια αύξηση της συμμετοχής της τεχνολογίας της αιθανόλης στο Landpolicy2040 σενάριο. Τέλος τα ίδια αποτελέσματα με το SSP3 παρουσιάζονται και στο SSP5 σενάριο.

7. Συμπεράσματα

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής ήταν η εφαρμογή ενός μοντέλου πολυκριτηριακού γραμμικού προγραμματισμού το οποίο ενσωματώνει μεθοδολογίες για την ανάλυση ευστάθειας των κατά Pareto βέλτιστων χαρτοφυλακίων. Η εφαρμογή παρουσιάζει ευαισθησία στη μεταβολή των παραμέτρων του προβλήματος. Πλεονέκτημα της μεθοδολογίας αυτής είναι ότι παρόλο που δεν μπορεί να γίνει χαρακτηρισμός αρκετών διαφορετικών λύσεων ως απόλυτα ευσταθείς, μπορεί να αξιολογηθεί η κάθε λύση σε σχέση με τις υπόλοιπες. Αυτό επιτυγχάνεται καθώς κατά την επίλυση του μοντέλου για όλες τις επαναλήψεις παράγεται το πλήρες Pareto front. Έτσι έχουμε τη δυνατότητα να γνωρίζουμε για πόσες επαναλήψεις Monte Carlo εμφανίζεται το κάθε χαρτοφυλάκιο και συνεπώς να γίνει σύγκριση μεταξύ της σχετικής ευστάθειας των χαρτοφυλακίων.

Φυσικό αποτέλεσμα αυτών των πλεονεκτημάτων είναι ότι απαιτούν αρκετό υπολογιστικό χρόνο και αυτό είναι λογικό καθώς το ζητούμενο είναι να παραχθούν τα πλήρη pareto front για όλες τις επαναλήψεις. Ακόμη σημαντικό για την πραγματοποίηση της ανάλυσης ευστάθειας είναι ο αριθμός των επαναλήψεων να είναι αρκετά μεγάλος, όπως στην παρούσα εφαρμογή που έχουμε 1000 επαναλήψεις. Επιπλέον ο απαιτούμενος υπολογιστικός χρόνος εξαρτάται σημαντικά και από την πολυπλοκότητα του προβλήματος, δηλαδή από τον αριθμό των μεταβλητών απόφασης και τον αριθμό των αντικειμενικών συναρτήσεων.

Μετά την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων της εφαρμογής παρατηρούμε ότι πολύ σημαντικό ρόλο παίζει η συμμετοχή της τεχνολογίας του βιοαερίου στους περισσότερους δείκτες που εξετάσαμε. Ειδικά στα σενάρια που έχουμε τον χαμηλότερο προϋπολογισμό, η συνεισφορά του βιοαερίου είναι πολύ σημαντική. Στις περισσότερες περιπτώσεις έπεται η συνεισφορά του υδροποιημένου αερίου πετρελαίου και των φωτοβολταϊκών, εκτός από την περίπτωση που έχουμε υψηλό προϋπολογισμό και οι τεχνολογίες αυτές συμμετέχουν με μεγαλύτερα ποσοστά. Οι τεχνολογίες του ξυλάνθρακα και της αιθανόλης έχουν συμμετοχή σε αρκετά μικρότερο βαθμό. Η συμμετοχή της αιθανόλης δείχνει μια αύξηση στον χρονικό ορίζοντα 2040 και σε κάποια σενάρια στην περίπτωση που έχουμε υψηλό προϋπολογισμό. Τέλος, η καύση ξυλείας ως βιομάζας δεν έχει συμμετοχή καθώς δεν προτιμάται και έχει αρνητική επίπτωση στην υγεία των ανθρώπων.

Η παρούσα εφαρμογή χρησιμοποίησε ένα υπάρχον εργαλείο για την αξιολόγηση ενεργειακών πολιτικών, η ανάπτυξη του οποίου έχει γίνει στο περιβάλλον GAMS. Η κατασκευή του μοντέλου έχει γίνει με τρόπο που να επιτρέπει την εύκολη μετατροπή του, με σκοπό να επιλύει οποιοδήποτε παρόμοιο πρόβλημα πολυκριτηριακού ακέραιου γραμμικού προγραμματισμού για το οποίο αναζητείται η ευστάθεια του pareto front και των επιμέρους κατά pareto βέλτιστων χαρτοφυλακίων. Για να τροποποιηθεί όμως το μοντέλο αυτό απαιτείται από τον χρήστη να έχει μια βασική έστω γνώση του λογισμικού GAMS.

ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΧΑΡΤΟΦΥΛΑΚΙΟΥ ΓΙΑ ΤΟΝ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟ ΒΕΛΤΙΣΤΩΝ
ΧΑΡΤΟΦΥΛΑΚΙΩΝ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΩΝ ΥΠΟ ΤΟ ΠΡΙΣΜΑ ΣΤΟΧΑΣΤΙΚΗΣ ΚΑΙ ΝΤΕΤΕΡΜΙΝΙΣΤΙΚΗΣ
ΑΒΕΒΑΙΟΤΗΤΑΣ

Μια πιθανή πρόταση συνεπώς θα ήταν να γίνει το εργαλείο πιο φιλικό προς τον χρήστη, υλοποιώντας το μοντέλο σε κάποια γλώσσα προγραμματισμού που θα επέτρεπε την φιλική προς τον χρήστη εισαγωγή των απαραίτητων δεδομένων. Έτσι θα γίνει εύκολη η εφαρμογή της μεθοδολογίας στα διαφορετικά προβλήματα, καθώς και η αυτοματοποιημένη επεξεργασία των πρωτογενών δεδομένων. Για την παρουσίαση των αποτελεσμάτων στον χρήστη αυτά πρέπει πρώτα να επεξεργαστούν και να δημιουργηθούν τα αντίστοιχα διαγράμματα. Με την αυτοματοποιημένη επεξεργασία των αποτελεσμάτων το εργαλείο θα γίνει πολύ πιο χρήσιμο για τον χρήστη. Όμως, θα πρέπει πρώτα να αξιολογήσουμε την ανάγκη για συχνή χρήση και το εύρος των διαφορετικών προβλημάτων τα οποία θέλουμε να μπορεί να επιλύει το εργαλείο.

8. Βιβλιογραφία

- 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.
- Albrecht, J. (2007). The future role of photovoltaics: A learning curve versus portfolio perspective. *Energy Policy*, 35(4), 2296-2304.
- Anagnostopoulos, K. P., & Mamanis, G. (2010). A portfolio optimization model with three objectives and discrete variables. *Computers & Operations Research*, 37(7), 1285–1297
- Antunes, C. H., & Henriques, C. O. (2016). Multi-Objective Optimization and Multi-Criteria Analysis Models and Methods for Problems in the Energy Sector. In *Multiple Criteria Decision Analysis* (pp. 1067–1165). Springer, New York, NY
- Arnesano, M., Carlucci, A. P., & Laforgia, D. (2012). Extension of portfolio theory application to energy planning problem—The Italian case. *Energy*, 39(1), 112-124.
- Arnesano, M., Carlucci, A.P., Laforgia, D. (2012). Extension of portfolio theory application to energy planning problem – The Italian case. *Energy, Sustainable Energy and Environmental Protection 2010*, 39, 112–124.
- Awerbuch, S. (2000). Investing in photovoltaics: risk, accounting and the value of new technology. *Energy Policy*, 28(14), 1023-1035.
- Awerbuch, S., & Berger, M. (2003). Applying portfolio theory to EU electricity planning and policy making (IEA/EET working paper; report number EET/2003/03).
- Babaei, S., Sepehri, M. M., & Babaei, E. (2015). Multi-objective portfolio optimization considering the depend-ence structure of asset returns. *European Journal of Operational Research*
- Baker, E., & Solak, S. (2011). Climate change and optimal energy technology R&D policy. *European Journal of Operational Research*, 213(2), 442-454.
- Bar-Lev, D., & Katz, S. (1976). A portfolio approach to fossil fuel procurement in the electric utility industry. *The Journal of Finance*, 31(3), 933-947.
- 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.

Chankong, V., Haimes, Y.Y. (1983). *Multiobjective Decision Making: Theory and Methodology*. North-Holland, New York.

Crowe, K. A., & Parker, W. H. (2008). Using portfolio theory to guide reforestation and restoration under climate change scenarios. *Climatic Change*, 89(3), 355-370.

Cucchiella, F., Gastaldi, M., & Trosini, M. (2017). Investments and cleaner energy production: A portfolio analysis in the Italian electricity market. *Journal of Cleaner Production*, 142, 121-132.

Dantzig, G.B. and M. Thapa (1997) *Linear programming*, Volumes 1, 2, 3, Springer-Verlag, New York.

Doukas, H., Mavrotas, G., Xidonas, P., & Psarras, J. (2013). Incorporating energy and environmental corporate responsibility in capital budgeting: A multiobjective approach. In *Proceedings of EURO 2013*, Rome, Italy.

Evans, G.W. (1984). "An overview of techniques for multiobjective mathematical programs", *Management Science* 30, 1268-1282.

Flues, F., Löschel, A., Lutz, B. J., & Schenker, O. (2014). Designing an EU energy and climate policy portfolio for 2030: Implications of overlapping regulation under different levels of electricity demand. *Energy Policy*, 75, 91-99.

Garfinkel, R.S. and G.L. Nemhauser (1972) *Integer programming*, John Wiley, New York.

Hadley, G. (1972) *Linear programming*, Addison-Wesley Publishing Company, Massachusetts.

Hobbs, B. F., & Meier, P. (2000). *Energy decisions and the environment: A guide to the use of multicriteria methods*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers.

Hwang, C.L., Masud, A. (1979). *Multiple Objective Decision Making. Methods and Applications: A state of the art survey*. Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems Vol. 164. Springer-Verlag, Berlin

Ignizio, J.P. (1982). *Linear Programming in Single- & Multiple- Objective Systems*. Englewood Cliffs, Prentice Hall, New Jersey.

Jansen, J. C., Beurskens, L. W. M., & Tilburg, X. (2008). Application of portfolio analysis to the Dutch generating mix. Reference case and two renewables cases. *Analytic Methods for Energy Diversity and Security*. Elsevier.

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.

Lintunen, J., & Uusivuori, J. (2016). On the economics of forests and climate change: Deriving optimal policies. *Journal of Forest Economics*, 24, 130-156.

Luo, C., & Wu, D. (2016). Environment and economic risk: An analysis of carbon emission market and portfolio management. *Environmental research*, 149, 297-301.

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.

Mavrotas, G. Effective implementation of the ϵ -constraint method in Multi-Objective Mathematical Programming problems. *Applied Mathematics and Computation*. 2009, 213, 455-465.

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*, 219, 9652–9669.

Mavrotas, G., Diakoulaki, D., & Kourentzis, A. (2008). Selection among ranked projects under segmentation, policy and logical constraints. *European Journal Operations Research*, 187, 177–192.

McCarl, Bruce A. McCarl GAMS User Guide. Texas, 2008.

Mitter, H., Heumesser, C., & Schmid, E. (2015). Spatial modeling of robust crop production portfolios to assess agricultural vulnerability and adaptation to climate change. *Land Use Policy*, 46, 75-90.

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.

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.

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.

Seo, S. N., & Mendelsohn, R. O. (2007). Climate change adaptation in Africa: a microeconomic analysis of livestock choice.

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.

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.

Steuer, R.E. (1985) *Multiple criteria optimization: Theory, Computation and application*, Wiley, New York.

Vose, D. (1996). *Quantitative risk analysis: A guide to Monte Carlo simulation modelling*. New York: Wiley.

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.

Zhu, L., & Fan, Y. (2010). Optimization of China's generating portfolio and policy implications based on portfolio theory. *Energy*, 35(3), 1391-1402.

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).

Μαυρωτάς, Γ. (2000) Πολυκριτηριακός προγραμματισμός σε συνθήκες αβεβαιότητας, κατασκευή συστήματος υποστήριξης αποφάσεων και εφαρμογή στον ενεργειακό σχεδιασμό, διδακτορική διατριβή, Αθήνα.

Ξηρόκωστας, Δ. (1991) Εφαρμοσμένος γραμμικός προγραμματισμός, Εκδόσεις Συμμετρία, Αθήνα.

Παπαρρίζος, Κ. (2001) Γραμμικός προγραμματισμός, Θεσσαλονίκη.

Σίσκος, Γ. (1998) Γραμμικός προγραμματισμός, Εκδόσεις Νέων Τεχνολογιών, Αθήνα.

ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΧΑΡΤΟΦΥΛΑΚΙΟΥ ΓΙΑ ΤΟΝ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟ ΒΕΛΤΙΣΤΩΝ
ΧΑΡΤΟΦΥΛΑΚΙΩΝ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΩΝ ΥΠΟ ΤΟ ΠΡΙΣΜΑ ΣΤΟΧΑΣΤΙΚΗΣ ΚΑΙ ΝΤΕΤΕΡΜΙΝΙΣΤΙΚΗΣ
ΑΒΕΒΑΙΟΤΗΤΑΣ

Σίσκος, Γ. (2008) Μοντέλα αποφάσεων, Εκδόσεις Νέων Τεχνολογιών, Αθήνα