



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**

**ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ**

**ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΠΟΦΑΣΕΩΝ**

**Θεωρία Χαρτοφυλακίου και Διαχείριση  
Αβεβαιότητας: Μελέτη Περίπτωσης για  
θέματα κλιματικής πολιτικής**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**Θεόδωρος Α. Μανιάκης**

**Επιβλέπων :** Χάρης Δούκας  
Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούλιος 2017





ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΠΟΦΑΣΕΩΝ

# Θεωρία Χαρτοφυλακίου και Διαχείριση Αβεβαιότητας: Μελέτη Περίπτωσης για Θέματα κλιματικής πολιτικής

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Θεόδωρος Α. Μανιάκης**

**Επιβλέπων :** Χάρης Δούκας  
Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 20<sup>η</sup> Ιουλίου 2017.

.....  
Χάρης Δούκας  
Επ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....  
Ιωάννης Ψαρράς  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

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

Αθήνα, Ιούλιος 2017

.....  
Θεόδωρος Α. Μανιάκης

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

Copyright © Θεόδωρος Α. Μανιάκης, 2017

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.

## Πρόλογος

Η εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας έγινε κατά το ακαδημαϊκό έτος 2016 – 2017 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.

Υπεύθυνος για τη διπλωματική εργασία ήταν ο Επίκουρος Καθηγητής κ. Χάρης Δούκας, τον οποίο θα ήθελα να ευχαριστήσω για την ανάθεση της, καθώς και για την ευκαιρία που μου δόθηκε να ασχοληθώ με ένα τόσο ενδιαφέρον θέμα.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω τον Αλέξανδρο Νίκα, υποψήφιο διδάκτορα του εργαστηρίου Συστημάτων Αποφάσεων, για την άψογη συνεργασία που είχαμε και τη συνεχή του καθοδήγηση καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Ιδιαίτερες ευχαριστίες οφείλω και στον Γεώργιο Τραχανά και την Κατερίνα Φορούλη, για την πολύτιμη βοήθειά τους στα αρχικά στάδια εκπόνησης της διπλωματικής.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου για την πολύπλευρη στήριξη που μου παρείχε σε όλη τη διάρκεια των σπουδών μου.

Αθήνα, Ιούλιος 2017  
Θεόδωρος Α. Μανιάκης



## Περίληψη

Η Θεωρία Χαρτοφυλακίου αποτελεί αναμφισβήτητα έναν από τους πιο σημαντικούς τομείς της Οικονομικής Επιστήμης και συγκεκριμένα στο πεδίο της Υποστήριξης Αποφάσεων. Με τον όρο χαρτοφυλάκιο εννοούμε τη συλλογή περιουσιακών στοιχείων που βρίσκονται στην κυριότητα μιας οικονομικής μονάδας, όπως για παράδειγμα ενός επενδυτή. Η Θεωρία Χαρτοφυλακίου εμπεριέχει την ανάλυση που πρέπει να γίνει, τόσο σε ποσοτικό όσο και σε ποιοτικό επίπεδο, έτσι ώστε να κατασκευαστεί ένα χαρτοφυλάκιο το οποίο θα είναι βέλτιστο ή ένα εύρος υποβέλτιστων χαρτοφυλακίων. Με την έννοια «βέλτιστο χαρτοφυλάκιο», εννοείται εκείνο το μίγμα περιουσιακών στοιχείων που βελτιστοποιεί μία συνάρτηση χρησιμότητας, δηλαδή για παράδειγμα μεγιστοποιεί το κέρδος επενδύσεων, ή ελαχιστοποιεί το κόστος.

Η πιο διαδεδομένη χρήση της Θεωρίας Χαρτοφυλακίου είναι ως εργαλείο υποστήριξης αποφάσεων στο Χρηματιστήριο, δηλαδή όταν τα περιουσιακά στοιχεία που πραγματεύεται είναι χρηματιστηριακές μετοχές, ομόλογα, κλπ. Βασικό πλεονέκτημα χρήσης της μεθόδου αυτής είναι ότι, επενδύοντας σε περισσότερα περιουσιακά στοιχεία σε αντιδιαστολή με την επένδυση σε μεμονωμένες επιλογές—το οποίο ονομάζεται διαφοροποίηση, μειώνεται το ρίσκο αποτυχίας της επένδυσης. Εξαιτίας της ευρείας διάδοσης της μεθόδου, έχει γίνει πλέον αντιληπτό ότι η Θεωρία Χαρτοφυλακίου είναι ουσιαστικά ένα εργαλείο των Χρηματοοικονομικών το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί και σε άλλα επιστημονικά πεδία για την επίλυση προβλημάτων.

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η ανάλυση της εφαρμογής της Θεωρίας Χαρτοφυλακίου στο πλαίσιο αξιοποίησης των κλιματικών πολιτικών. Είναι σαφές ότι, στην εποχή μας, οι κλιματικές πολιτικές βρίσκονται στο προσκήνιο της πολιτικής ζωής αλλά και συνυφασμένες με όλες τις διαστάσεις της ανθρώπινης δραστηριότητας, καθώς όλο και περισσότερα κράτη συμφωνούν σε μέτρα τα οποία πρέπει να εφαρμοστούν για την προστασία του περιβάλλοντος και τον μετριασμό της κλιματικής αλλαγής. Ο τομέας των κλιματικών πολιτικών χαρακτηρίζεται αφενός από περιορισμούς σχετικά με τους προϋπολογισμούς των εταιριών ή των κρατών που εμπλέκονται, και αφετέρου από σημαντικά επίπεδα αβεβαιότητας σχετικά με την επιτυχημένη εφαρμογή τους. Παράγοντες αβεβαιότητας αποτελούν συνήθως η τεχνολογική ανάπτυξη στο μέλλον, όπως για παράδειγμα η βελτίωση αποδοτικότητας και η μείωση του κόστους των τεχνολογιών ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, αλλά και η αβεβαιότητα σχετικά με την εξέλιξη του κλίματος (επίπεδα θερμοκρασίας, συγκέντρωσης αέριων ρύπων, κλπ.), οι οποίες μπορούν να αλλάξουν άρδην τις επιλογές των υπεύθυνων λήψης αποφάσεων όσον αφορά τις κλιματικές πολιτικές.

Ως εκ τούτου, στην παρούσα διπλωματική εργασία πραγματοποιείται ανάλυση των μεθόδων που χρησιμοποιούνται στην Θεωρία Χαρτοφυλακίου με σκοπό την εύρεση του βέλτιστου χαρτοφυλακίου, η οποία ακολουθείται από εκτενή βιβλιογραφική ανασκόπηση των επιστημονικών εφαρμογών που ως αντικείμενο είχαν την αξιοποίηση της Θεωρίας Χαρτοφυλακίου στα πλαίσια κλιματικών πολιτικών. Στο τέλος της εργασίας, παρουσιάζεται μια μελέτη περίπτωσης με βραχυπρόθεσμα έως μεσοπρόθεσμα μέτρα κλιματικής πολιτικής για εξοικονόμηση ενέργειας που αφορούν την Ελλάδα, και στα οποία εφαρμόζονται δύο μέθοδοι με σκοπό την επιλογή του βέλτιστου χαρτοφυλακίου, αντιμετωπίζοντας παράλληλα την αβεβαιότητα που τα περιβάλλει.

**Λέξεις Κλειδιά:** Θεωρία Χαρτοφυλακίου, Markowitz, Κλιματική Πολιτική, Ανάλυση Αβεβαιότητας





## Abstract

Portfolio Theory is undoubtedly one of the most important areas of Economic Science and Decision Support in particular. The term “portfolio” refers to the collection of assets owned by an economic entity, for example an investor. Portfolio Theory incorporates the analysis that needs to be done, from both a quantitative and a qualitative perspective, in order to build an optimal portfolio or a range of sub-optimal portfolios. An “optimal portfolio” is a specific mix of assets that optimises a utility function, which can be for example the maximisation of investment profits, or the minimisation of respective costs.

The most widespread use of Portfolio Theory is as a decision support tool in the stock market, i.e. when the assets assessed are stock market shares, bonds, etc. A key advantage of using this method is that, by investing in more assets instead of individual options—a method called diversification, the risk associated with the investment is reduced. Because of the vast popularity of the Portfolio Analysis approach, it has now become clear that Portfolio Theory is essentially a Decision Support tool that can be used in a range of scientific fields and problem domains.

The aim of this diploma thesis is to analyse the application of Portfolio Theory in the context of selecting climate policy instruments. It is evident that, nowadays, climate policy lies at the forefront of politics as well as is intertwined with all aspects of human everyday activity, as more and more states agree upon measures that must be implemented towards protecting the environment and mitigating climate change. The climate policy domain features restrictions on the budgets of companies or states involved on the one hand, and considerable levels of uncertainty regarding their successful implementation on the other. Factors of uncertainty usually include technological development in the future, e.g. the potential for improving the efficiency or reducing the costs of renewable energy technologies, as well as climate uncertainty (temperature levels, greenhouse gas emissions concentration levels, etc.), which can radically affect the choices of decision-makers in relation to climate policies.

Therefore, this diploma thesis analyses the methods used in Portfolio Theory for the purpose of determining the optimal portfolio, and carries out an extensive literature review of recent Portfolio Theory applications in the context of climate policies. At the end of the thesis, a case study regarding the selection of short- to medium-term climate policy measures for Greece is presented and thoroughly described, and two methods are applied in order to determine the optimal portfolio while at the same time addressing the uncertainty surrounding them.

**Keywords:** Portfolio Theory, Markowitz, Climate Policy, Uncertainty Analysis



## Πίνακας περιεχομένων

<b>1</b>	<b>Εισαγωγή .....</b>	<b>5</b>
1.1	Αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας .....	5
1.2	Δομή της εργασίας .....	7
<b>2</b>	<b>Θεωρητικό υπόβαθρο .....</b>	<b>9</b>
2.1	Μέθοδος Markowitz.....	9
2.1.1	Μαθηματική Θεμελίωση .....	10
2.1.2	Παράδειγμα 1.....	12
2.2	Capital Market Line .....	14
2.3	Υπόδειγμα Αποτίμησης Περιουσιακών Στοιχείων(Capital Asset Pricing Model-CAPM).....	17
2.4	Μειονεκτήματα Markowitz.....	19
2.5	Προτεινόμενες Λύσεις .....	21
2.6	Environmental corporate responsibility for investments evaluation: an alternative multi-objective programming model (Xidonas et al. 2015) .....	23
2.6.1	Μέθοδος ΙΤΑ .....	25
2.6.2	Ανάλυση Ευρωστίας.....	29
<b>3</b>	<b>Βιβλιογραφική Ανασκόπηση Ανάλυσης Χαρτοφυλακίου σε θέματα κλιματικών πολιτικών.....</b>	<b>33</b>
3.1	Βιβλιογραφική Επισκόπηση .....	33
3.2	Ερευνητικό Πεδίο Κλιματικών Πολιτικών .....	35
3.3	Μεθολογικές Προσεγγίσεις.....	37
3.4	Συσχέτιση Αντικειμένου Ερευνών Με Γεωγραφική Περιοχή.....	44
3.4.1	Ανάλυση Κλιματικών Πολιτικών .....	47
3.5	Αντιμετώπιση Αβεβαιότητας .....	50
<b>4</b>	<b>Αβεβαιότητα.....</b>	<b>55</b>
4.1	Εισαγωγή-Αβεβαιότητα .....	55

4.2	Παρουσίαση των μεθόδων Min-Max & Min-Max Regret.....	56
4.2.1	Μαθηματική διατύπωση .....	56
4.2.2	Παράδειγμα.....	58
4.2.3	Παρατηρήσεις-Επεκτάσεις .....	60
<b>5</b>	<b>Μελέτη Περίπτωσης.....</b>	<b>63</b>
5.1	Περιγραφή Προβλήματος .....	63
5.2	Περιγραφή Στόχου και εναλλακτικών μέτρων πολιτικής.....	65
5.3	Μέθοδος .....	66
5.4	Επίλυση με την Μέθοδο Max-Min .....	69
5.5	Επίλυση με την Μέθοδο Min-Max Regret.....	76
<b>6</b>	<b>Αποτελέσματα και Προοπτικές.....</b>	<b>83</b>
6.1	Ανάλυση Επιλεγμένων Κλιματικών Πολιτικών .....	83
6.2	Ερμηνεία Αποτελεσμάτων .....	87
<b>7</b>	<b>Βιβλιογραφία .....</b>	<b>89</b>

## Ευρετήριο Πινάκων

Πίνακας 1- Απεικόνιση των ερευνών σχετικά με την κλιματική πολιτική στην βιβλιογραφία ανάλυσης χαρτοφυλακίου.....	35
Πίνακας 2-Γενική εικόνα των: μεθόδων ανάλυσης χαρτοφυλακίου, στοιχείων του χαρτοφυλακίου, αντικειμενικών συναρτήσεων, περιορισμών και μεθόδων υπολογισμού αβεβαιότητας που χρησιμοποιήθηκαν στις έρευνες σχετιζόμενες με κλιματική πολιτική.....	37
Πίνακας 3-Γενική Εικόνα των ερευνητικών αντικειμένων κάθε εργασίας σε σχέση με την γεωγραφική περιοχή που εφαρμόστηκαν .....	44
Πίνακας 4- Κόστος και Επιστροφή Επενδύσεων υπό διαφορετικά σενάρια.....	59
Πίνακας 5- Βέλτιστες λύσεις για τα 3 σενάρια και τους αλγορίθμους min-max και min-max regret .....	59
Πίνακας 6-Προϋπολογισμός Μέτρων Εξοικονόμησης Ενέργειας .....	65
Πίνακας 7- Μέτρα Κλιματικής Πολιτικής.....	67
Πίνακας 8- Σύνολο Δυνατών Χαρτοφυλακίων Max-Min .....	71
Πίνακας 9- Πίνακας Βέλτιστου Χαρτοφυλακίου Max-Min .....	75
Πίνακας 10-Πίνακας Δυνατών Χαρτοφυλακίων Min-Max Regret .....	77
Πίνακας 11-Πίνακας Βέλτιστου Χαρτοφυλακίου Min-Max Regret .....	81
Πίνακας 12-Επιλεγμένα Μέτρα Πολιτικής.....	83

## Ευρετήριο Εικόνων

Εικόνα 1- Διάγραμμα δυνατών και αποδοτικών λύσεων ( $\mu, \sigma^2$ ) .....	11
Εικόνα 2- Διάγραμμα Μέσης Τιμής-Διακύμανσης .....	13
Εικόνα 3-Διάγραμμα Γραμμής Κεφαλαιαγοράς.....	15
Εικόνα 4 Προτεινόμενες Επεκτάσεις μεθόδου Markowitz.....	22
Εικόνα 5- Διάγραμμα ροής Τριχοτομικής Μεθόδου .....	27
Εικόνα 6- Γράφημα επαναληπτικού αλγορίθμου τριχοτομικής μεθόδου.....	28
Εικόνα 7- Γραφική Παράσταση Δείκτη Ευστάθειας.....	30
Εικόνα 8-Διάγραμμα Επιστροφής-Ρίσκου χαρτοφυλακίου. Φαινόμενο Χαρτοφυλακίου .....	49
Εικόνα 9-Διάγραμμα Ροής αλγορίθμου Max-Min.....	69
Εικόνα 10- Πρόγραμμα Python Max-Min.....	70
Εικόνα 11- Διάγραμμα Ροής Min-Max Regret.....	76
Εικόνα 12- Χρήση Ευφών Συστημάτων Μέτρησης Ενέργειας στην Ευρώπη .....	86

# 1 Εισαγωγή

## 1.1 Αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας

Η Θεωρία Χαρτοφυλακίου αποτελεί έναν από σημαντικούς τομείς της Οικονομικής Επιστήμης και δη των Χρηματοοικονομικών. Οι οικονομολόγοι σημειώνουν ότι το πρόβλημα εύρεσης ενός βέλτιστου χαρτοφυλακίου είναι τόσο παλιό όσο και το ίδιο το χρηματιστήριο. Το χαρτοφυλάκιο είναι η συλλογή περιουσιακών στοιχείων που βρίσκονται στην κυριότητα μιας οικονομικής μονάδας, για παράδειγμα ενός επενδυτή. Τα επενδυτικά στοιχεία αυτά μπορεί να είναι μετοχές, ομόλογα, συμβόλαια δικαιωμάτων προαίρεσης (option contracts), δηλαδή συμβόλαια που δίνουν στον επενδυτή το δικαίωμα να αγοράσει ή να πουλήσει έναν υποκείμενο τίτλο σε μια συγκεκριμένη χρονική στιγμή για μια προκαθορισμένη τιμή. Ένα χαρτοφυλάκιο, μπορεί ακόμα να περιέχει και άλλες επενδύσεις όπως για παράδειγμα τίτλους ιδιοκτησίας. Η ουσία είναι ότι τα παραπάνω περιουσιακά στοιχεία έχουν διαφορετικές αποδόσεις και διαφορετικό κίνδυνο (ρίσκο) το καθένα. Επομένως ο επενδυτής καλείται να πάρει τις σωστές αποφάσεις σχετικά με τις τοποθετήσεις του χαρτοφυλακίου του, με στόχο την αύξηση της επιστροφής (κέρδους) των επενδύσεών του και ταυτόχρονα την μείωση της έκθεσής του στον κίνδυνο.

Συγκεκριμένα, στο πλαίσιο της θεωρίας επενδύσεων χαρτοφυλακίου οι επενδυτές τοποθετούν τον πλούτο 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. Για παράδειγμα πολλοί επενδυτές κατέχουν ένα ή περισσότερα ακίνητα, έχουν επενδύσει σε μετοχές, ομολογίες, σε μερίδια αμοιβαίων κεφαλαίων, τραπεζικές καταθέσεις, εμπορεύματα κλπ. Τα ταμεία συντάξεων επενδύουν για λογαριασμό των επενδυτών τους (εργαζομένων, οι κρατήσεις των οποίων επενδύονται με σκοπό τη δημιουργία κεφαλαίων για μελλοντικές συντάξεις). Τράπεζες, άλλοι θεσμικοί επενδυτές επίσης επενδύουν σε χαρτοφυλάκια μετοχών, ομολογιών και άλλων περιουσιακών στοιχείων. Σε κάθε περίπτωση τα χαρτοφυλάκια

αποτελούνται από περισσότερα του ενός περιουσιακά στοιχεία και όπως θα δούμε στη συνέχεια αυτό ακριβώς είναι και το πλεονέκτημά τους σε σχέση με τις απλές επενδύσεις.

Τα θεμελιώδη στοιχεία που μας ενδιαφέρουν και χαρακτηρίζουν ένα χαρτοφυλάκιο είναι αφενός η απόδοση και αφ' ετέρου ο κίνδυνος. Η προσδοκώμενη απόδοση για ένα χαρτοφυλάκιο επενδυτικών στοιχείων είναι ο σταθμικός μέσος όρος των προσδοκώμενων αποδοτικότητων από τα επί μέρους στοιχεία, που αυτό περιλαμβάνει. Τους συντελεστές σταθμίσεως αποτελούν τα ποσοστά που αντιπροσωπεύουν οι αξίες των στοιχείων στη συνολική αξία του χαρτοφυλακίου. Είναι φανερό ότι η υψηλή απόδοση είναι ένα επιθυμητό χαρακτηριστικό για οποιοδήποτε περιουσιακό στοιχείο γιατί όσο υψηλότερη είναι η απόδοση ενός χαρτοφυλακίου, τόσο μεγαλύτερη κατανάλωση θα μπορεί να απολαμβάνει στο μέλλον ο κάτοχος του.

Από την άλλη πλευρά ο κίνδυνος σχετίζεται με την αβεβαιότητα της απόδοσης που θα αποφέρει. Ένα χαρτοφυλάκιο έχει υψηλό κίνδυνο όταν υπάρχει μεγάλη πιθανότητα η πραγματική του απόδοση να διαφέρει κατά πολύ από την προσδοκώμενη. Επειδή στους περισσότερους επενδυτές δεν αρέσει ο κίνδυνος, κρατούν περιουσιακά στοιχεία με υψηλό κίνδυνο μόνον όταν η προσδοκώμενη απόδοση τους είναι μεγαλύτερη από την προσδοκώμενη απόδοση ενός σχετικά ασφαλούς περιουσιακού στοιχείου, όπως τα κρατικά ομόλογα.

Ένα πολύ σημαντικό πλεονέκτημα της χρησιμοποίησης χαρτοφυλακίου είναι η διαφοροποίηση, η οποία δημιουργεί το λεγόμενο portfolio effect. Καθώς προσθέτουμε επενδυτικά στοιχεία σε ένα χαρτοφυλάκιο ο συνολικός κίνδυνός του μειώνεται. Η διαδικασία αυτή καλείται διαφοροποίηση του χαρτοφυλακίου. Καθώς προσθέτουμε στοιχεία ο κίνδυνος του χαρτοφυλακίου τείνει να προσεγγίζει τον κίνδυνο, που παρουσιάζει το χαρτοφυλάκιο της κεφαλαιαγοράς, δηλαδή εκείνο που περιλαμβάνει όλα τα στοιχεία που προσφέρονται για επενδύσεις κεφαλαίου σε μια δεδομένη περίοδο. Έχει παρατηρηθεί εμπειρικά ότι ο κίνδυνος ενός χαρτοφυλακίου μειώνεται ραγδαία αρχικά όταν προστίθενται στοιχεία ( στα πρώτα πέντε η έξι) ενώ η μείωση μετά γίνεται με πολύ μικρότερο βαθμό.

Καθώς το πρόβλημα ανάλυσης χαρτοφυλακίου είναι μια πολύπλοκη διαδικασία, ιδιαίτερα καθώς αυξάνονται τα περιουσιακά στοιχεία τα οποία αυτό περιέχει, πολλοί ερευνητές έχουν αφιερώσει το ερευνητικό τους έργο στην εύρεση αποδοτικών μεθόδων ελέγχου και διαχείρισης του χαρτοφυλακίου και επιλογή των βέλτιστων επενδύσεων σε μικρό υπολογιστικό χρόνο. Επιπλέον, η ανάλυση χαρτοφυλακίου έχει επεκταθεί σαν μέθοδος και χρησιμοποιείται σε πολλούς κλάδους πέραν των χρηματοοικονομικών όπως αυτού της ανάκτησης πληροφοριών από έγγραφα με αβέβαιη πληροφορία, η ανάλυση ανάπτυξης και μεταβλητότητας του εργατικού δυναμικού, ενώ ακόμα χρησιμοποιήθηκε και στην ψυχολογία για την εκτίμηση των ψυχολογικών εκβάσεων όπως η διάθεση και η αυτοεκτίμηση με βάση την διαφοροποίηση των ιδεών ενός ατόμου.



Παρατηρούμε επομένως ότι η θεωρία χαρτοφυλακίου είναι ουσιαστικά ένα εργαλείο των χρηματοοικονομικών το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί στην επίλυση προβλημάτων και σε άλλους τομείς. Για το λόγο αυτό η παρούσα έρευνα έχει ως στόχο να αξιοποιήσει το εργαλείο που ονομάζεται θεωρία χαρτοφυλακίου, καθώς και το θεωρητικό μαθηματικό υπόβαθρο το οποίο τη συνοδεύει και να την εφαρμόσει στο φλέγον σημερινό ζήτημα που είναι η αξιοποίηση των κλιματικών πολιτικών.

Είναι δεδομένο ότι στην εποχή μας οι κλιματικές πολιτικές βρίσκονται στο προσκήνιο της πολιτικής ζωής καθώς όλο και περισσότερα κράτη συμφωνούν σε διεθνή συνέδρια για την υιοθέτηση μέτρων και πολιτικών με στόχο την προστασία του περιβάλλοντος. Ως εκ τούτου προτείνονται μέτρα τα οποία πρέπει να εφαρμοστούν, όπως για παράδειγμα μείωση εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα, αναπτύσσονται εναλλακτικές μορφές ενέργειας, επιβάλλονται στα κράτη όρια για την παραγωγή διοξειδίου του άνθρακα ετησίως καθώς και άλλες πολιτικές εξοικονόμησης ενέργειας.

Οι συγκεκριμένες πολιτικές που έχουν στη διάθεσή τους να επιλέξουν και στη συνέχεια να εφαρμόσουν τα κράτη, ή οι εταιρίες, έχουν συγκεκριμένο αντίκτυπο στην εξοικονόμηση ή παραγωγή ενέργειας(απόδοση) καθώς και ένα παράγοντα αβεβαιότητας σχετικά με την επιτυχία εφαρμογής τους(κίνδυνος-ρίσκο). Ως εκ τούτου, η παρούσα εργασία, μελετά την περίπτωση χρησιμοποίησης της ανάλυσης χαρτοφυλακίου, με περιουσιακά στοιχεία τις κλιματικές πολιτικές και δίνεται ιδιαίτερη έμφαση στην αντιμετώπιση της αβεβαιότητας. Συγκεκριμένα, έπειτα από θεωρητική ανάλυση της θεωρίας χαρτοφυλακίου και βιβλιογραφική επισκόπηση των ερευνών σχετικά με την χρησιμοποίηση χαρτοφυλακίου στον τομέα αυτό, μελετάται χαρτοφυλάκιο πολιτικών στην Ελλάδα που έχουν ως στόχο την εξοικονόμηση ενέργειας την επόμενη δεκαετία κάτω υπό το καθεστώς αβεβαιότητας όσον αφορά την αποδοτικότητά τους.

## **1.2 Δομή της εργασίας**

Η παρούσα εργασία αποτελείται από 5 κεφάλαια ακολουθούμενα από την βιβλιογραφία. Στην παρούσα ενότητα γίνεται συνοπτική παρουσίαση του περιεχομένου κάθε κεφαλαίου.

Στο παρόν κεφάλαιο, γίνεται μια πρώτη εισαγωγή στο αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας, ενώ περιγράφεται συνοπτικά και το περιεχόμενο κάθε κεφαλαίου της.

Στο Κεφάλαιο 2, πραγματοποιείται η θεωρητική ανάλυση της Θεωρίας Χαρτοφυλακίου. Συγκεκριμένα γίνεται αναφορά στο πώς ξεκίνησε και θεμελιώθηκε σαν μέθοδος το 1952, με μια έρευνα της οποίας εφαρμογές χρησιμοποιούνται ακόμα και σήμερα όπως η Γραμμή της Κεφαλαιαγοράς(Capital Market Line). Επιπλέον, γίνεται επισκόπηση της προόδου που έχει επιτευχθεί στην ανάλυση χαρτοφυλακίου με έμφαση

στην αβεβαιότητα και ευρωστία του χαρτοφυλακίου. Το κεφάλαιο κλείνει με την παρουσίαση μιας έρευνας που απαντά στα παραπάνω προβλήματα προτείνοντας μεθόδους και ταυτόχρονα χρησιμοποιεί χαρτοφυλάκιο που βελτιστοποιείται και με άξονα την εταιρική υπευθυνότητα αποτελώντας έτσι συνδυαστικό κρίκο με το επόμενο κεφάλαιο.

Στο τρίτο κεφάλαιο γίνεται μια λεπτομερής βιβλιογραφική αναφορά της ανάλυσης χαρτοφυλακίου στο πλαίσιο των κλιματικών πολιτικών. Συγκεκριμένα γίνεται ανάλυση ερευνών που χρησιμοποιούν τη θεωρία χαρτοφυλακίου για τη βελτιστοποίηση κλιματικών πολιτικών ή διαχείρισης/παραγωγής ενέργειας. Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα ερευνητικά πεδία των ερευνών αυτών ακολουθούμενα από ανάλυση των μεθοδολογιών που εφαρμόζονται στο καθένα από αυτά και επίσης ανάλυση των κλιματικών πολιτικών στις οποίες αναφέρονται. Στο τέλος του κεφαλαίου δίνεται ιδιαίτερη έμφαση στον τρόπο αντιμετώπισης της αβεβαιότητας στα χαρτοφυλάκια αυτά.

Στο Κεφάλαιο 4 γίνεται παρουσίαση δύο αλγορίθμων που χρησιμοποιούνται με αντικείμενο το χαρτοφυλάκιο για να αντιμετωπίσουν το καθεστώς αβεβαιότητας σχετικά με τις αποδόσεις του. Ο ένας αλγόριθμος απευθύνεται σε έναν επενδυτή ο οποίος αποφεύγει το ρίσκο, είναι δηλαδή συντηρητικός, ενώ ο άλλος απευθύνεται σε έναν επενδυτή που στο πλαίσιο της αύξησης της μέσης απόδοσης του χαρτοφυλακίου του είναι διατεθειμένος να λάβει μεγαλύτερο παράγοντα ρίσκου. Στη συνέχεια οι αλγόριθμοι αυτοί εφαρμόζονται σε μια μελέτη περίπτωσης χαρτοφυλακίου με μέτρα κλιματικής πολιτικής του Εθνικού Σχεδίου Δράσης Ενεργειακής Απόδοσης που πρέπει να εφαρμοστούν στην Ελλάδα την επόμενη δεκαετία. Υπολογίζεται με βάση τους δύο παραπάνω αλγορίθμους και την αβεβαιότητα που παρουσιάζουν οι παραπάνω πολιτικές, το βέλτιστο χαρτοφυλάκιο κλιματικών πολιτικών που πρέπει να εφαρμοστούν για μέγιστη εξοικονόμηση ενέργειας.

Στην τελευταία ενότητα, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της μελέτης περίπτωσης του Κεφαλαίου 4 και εξάγονται συμπεράσματα από την ανάλυση που έχει διενεργηθεί στα προηγούμενα κεφάλαια.

# 2

## Θεωρητικό υπόβαθρο

### 2.1 Μέθοδος Markowitz

Η θεωρία χαρτοφυλακίου έχει τις ρίζες της στην πρωτοποριακή εργασία του Harry Markowitz το 1952 (Markowitz, 1952). Το πρόβλημα της ανάλυσης χαρτοφυλακίου είναι τόσο παλιό στα οικονομικά όσο είναι και το χρηματιστήριο. Το ερώτημα που τίθεται είναι ποιο χαρτοφυλάκιο είναι το καλύτερο για τον επενδυτή. Αυτό που ο Markowitz έκανε και είναι παγκοσμίως γνωστός είναι η θεμελίωση της μοντέρνας ανάλυσης χαρτοφυλακίου ως μαθηματικό πρόβλημα για πρώτη φορά. Παρακάτω γίνεται μια εισαγωγή στη δουλειά του Markowitz εξηγώντας τον τρόπο με τον οποίο θεμελίωσε το πρόβλημα και την λύση που πρότεινε.

Κατ' αρχάς, με τον όρο χαρτοφυλάκιο εννοούμε την συλλογή περιουσιακών στοιχείων (πχ μετοχές) που βρίσκονται στην κυριότητα μιας οικονομικής μονάδας. Ένα χαρτοφυλάκιο συνήθως αποτελείται από τοποθετήσεις σε πολλά διαφορετικά στοιχεία με διαφορετικές αποδόσεις (returns). Η προσδοκώμενη απόδοση ενός χαρτοφυλακίου (ή μιας επένδυσης γενικότερα-ROI) είναι η ποσοστιαία αύξηση της τιμής του στο χρόνο.

- $$R_t = \frac{T_t}{T_{t-1}} - 1$$

Δηλαδή η απόδοση (return) ορίζεται σαν την μεταβολή της αξίας των περιουσιακών στοιχείων του χαρτοφυλακίου σε ένα διάστημα  $\Delta t$  προς την αξία του χαρτοφυλακίου την χρονική στιγμή έναρξης του διαστήματος αυτού.

Επιπλέον ο κίνδυνος-ρίσκο (risk) ενός χαρτοφυλακίου σχετίζεται με την αβεβαιότητα της απόδοσης που θα αποφέρει. Ένα χαρτοφυλάκιο έχει υψηλό κίνδυνο όταν υπάρχει μεγάλη πιθανότητα η πραγματική του απόδοση να διαφέρει κατά πολύ από την προσδοκώμενη.

Η θεωρία χαρτοφυλακίου του Markowitz παρέχει μια μέθοδο για να αναλύσει πόσο καλό είναι ένα συγκεκριμένο χαρτοφυλάκιο βασιζόμενη μόνο στη μέση τιμή των ενθυλακωμένων περιουσιακών στοιχείων (πχ αξία μετοχών) και τη διακύμανση των αποδόσεων των περιουσιακών στοιχείων (τυπική απόκλιση-standard deviation) που περιέχονται στο χαρτοφυλάκιο. Ο Markowitz θεωρεί πάντοτε ότι ο επενδυτής αποφεύγει τον κίνδυνο (risk averse investor), γι' αυτό θέλει αφενός μεγάλη απόδοση στο χαρτοφυλάκιο του, δηλαδή μεγάλες μέσες τιμές των αξιών των περιουσιακών

στοιχείων σε συνδυασμό με μικρή διακύμανση της απόδοσης, δηλαδή το μικρότερο δυνατό ρίσκο.

Στην συνέχεια δίνουμε το μαθηματικό ορισμό των παραπάνω όρων καθώς και ένα απλό παράδειγμα με ένα χαρτοφυλάκιο τριών περιουσιακών στοιχείων πριν δώσουμε την μαθηματική θεμελίωση της ανάλυσης χαρτοφυλακίου σαν πρόβλημα βελτιστοποίησης.

### 2.1.1 Μαθηματική Θεμελίωση

Ας θεωρήσουμε ένα χαρτοφυλάκιο με  $n$  στοιχεία (assets) καθένα από τα οποία έχει επιστροφή  $R_i$ .

Ας θεωρήσουμε ακόμη ότι για κάθε στοιχείο  $i$  έχει αντίστοιχα μέση τιμή (mean)  $\mu_i$  και διακύμανση (variance)  $\sigma_i^2$ , ενώ ακόμα έστω  $\sigma_{i,j}$  η συνδιακύμανση μεταξύ  $R_i$  και  $R_j$ .

Τέλος έστω  $x_i$  η σχετική ποσότητα (βάρος) της επένδυσης  $i$  στο χαρτοφυλάκιο, δηλαδή το ποσοστό του χαρτοφυλακίου που είναι επενδυμένο στο στοιχείο  $i$ .

Τότε μπορούμε να γράψουμε τις παραπάνω έννοιες ως εξής:

$$\mu = E[R] = \sum_{i=1}^n \mu_i x_i \quad (2)$$

$$\sigma^2 = \text{Var}[R] = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \sigma_{i,j} x_i x_j \quad (3)$$

$$\sum_{i=1}^n x_i = 1 \quad (4)$$

$$x_i \geq 0, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (5)$$

Η σχέση (2) δίνει την μέση τιμή της επιστροφής του χαρτοφυλακίου και η σχέση (3) δίνει την συνολική διακύμανση του χαρτοφυλακίου. Ο επενδυτής του Markowitz θέλει δηλαδή μεγιστοποίηση του  $\mu$  σε συνδυασμό με ελαχιστοποίηση του  $\sigma$ . Επιπλέον η σχέση (4) σημαίνει ότι το άθροισμα των βαρών των επενδύσεων του χαρτοφυλακίου πρέπει να ισούται με την μονάδα (ή 100%).

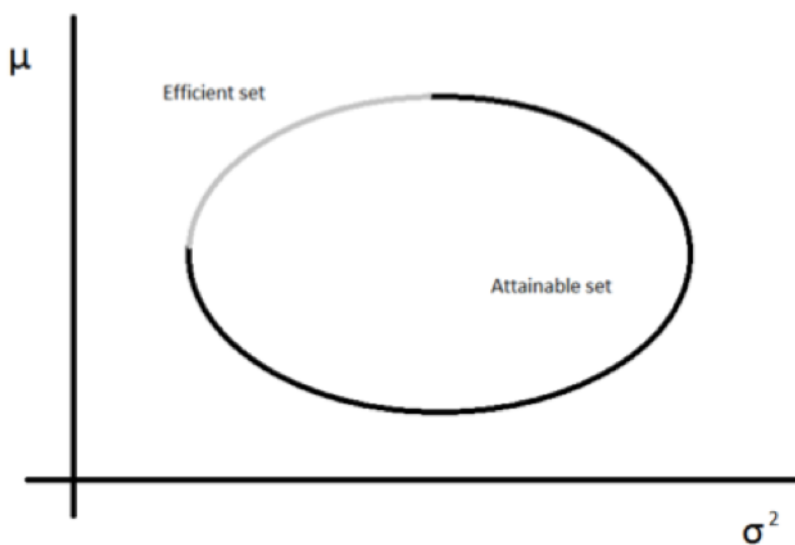
Τέλος η σχέση (5) λέει ότι όλα τα βάρη των επενδύσεων του χαρτοφυλακίου του Markowitz πρέπει να είναι θετικά. Αυτό ουσιαστικά σημαίνει ότι οι επενδύσεις του χαρτοφυλακίου του Markowitz είναι όλες long positions (θέσεις), δηλαδή δεν επιτρέπει shorting μετοχών, το να ποντάρεις δηλαδή ότι η αξία μιας μετοχής θα πέσει. Το short selling μετοχών αντιστοιχεί σε αρνητικό βάρος του αντίστοιχου στοιχείου του χαρτοφυλακίου λόγω του τρόπου με τον οποίο γίνεται. Συγκεκριμένα, αν ένας επενδυτής θεωρεί ότι η αξία μιας μετοχής της εταιρίας ABC θα πέσει στο μέλλον, κάνει

ένα συμβόλαιο με τον χρηματιστή του που έχει μετοχές της ABC στο οποίο: ο χρηματιστής πουλάει την χρονική στιγμή έναρξης του συμβολαίου τις μετοχές αυτές και καταθέτει το ποσό στον επενδυτή. Από την άλλη μεριά ο επενδυτής δεσμεύεται ότι θα αγοράσει τις μετοχές μετά από κάποιο χρονικό διάστημα και θα τις επιστρέψει στον χρηματιστή. Έτσι αν η τιμή της μετοχής πέσει, όπως προέβλεψε, θα τις αγοράσει σε μικρότερη τιμή και θα έχει σαν κέρδος την διαφορά του αρχικού ποσού με την τελική τιμή αγοράς. Επειδή όλο αυτό το διάστημα ο επενδυτής έχει ουσιαστικά δανειστεί την μετοχή αυτό αντικατοπτρίζεται σαν αρνητικό βάρος στο χαρτοφυλάκιο.

Επιστρέφοντας στο πρόβλημα του χαρτοφυλακίου (μεγιστοποίηση μ-ελαχιστοποίηση  $\sigma^2$ ) διαπιστώνουμε ότι ανάλογα με το πώς θα αναθέσουμε τα βάρη στα στοιχεία  $i = 1, 2, \dots, n$  θα λαμβάνουμε αντίστοιχα και διαφορετικούς συνδυασμούς  $(\sigma^2, \mu)$ .

Ορίζουμε σύνολο των δυνατών λύσεων (attainable set) το σύνολο όλων των δυνατών συνδυασμών  $(\sigma^2, \mu)$ . Ορίζουμε ακόμα αποδοτικό σύνολο (efficient set-efficient frontier) το σύνολο των  $(\sigma^2, \mu)$  για τα οποία το  $\sigma^2$  (διακύμανση-ρίσκο) είναι ελάχιστο για δεδομένο  $\mu$  (επιστροφή) και το  $\mu$  είναι μέγιστο για δεδομένο παράγοντα ρίσκου  $\sigma^2$ . Εφόσον ένας επενδυτής θέλει μεγάλο κέρδος σε συνδυασμό με μικρό ρίσκο θα πρέπει να επιλέξει ένα συνδυασμό ο οποίος βρίσκεται στο αποδοτικό σύνολο.

Έστω για παράδειγμα το εξής σχήμα για το σύνολο των δυνατών λύσεων.



**Εικόνα 1-** Διάγραμμα δυνατών και αποδοτικών λύσεων  $(\mu, \sigma^2)$

Είναι φανερό ότι από το σύνολο των δυνατών λύσεων (attainable set) που είναι όλα τα σημεία της έλλειψης, το αποδοτικό σύνολο είναι το πάνω αριστερά κομμάτι της έλλειψης (γκρίζο τμήμα). Αυτό εξηγείται από το γεγονός ότι το πάνω δεξιά τμήμα δίνει ίδια επιστροφή  $\mu$  με το πάνω αριστερά αλλά μεγαλύτερο ρίσκο επομένως δεν είναι

προτιμητέο. Ομοίως το κάτω αριστερά έχει το ίδιο ρίσκο αλλά μικρότερη επιστροφή, ενώ το κάτω δεξιά μικρότερο ρίσκο και μικρότερη επιστροφή.

Με βάση την Θεωρία Χαρτοφυλακίου του Markowitz ένας επενδυτής θα πρέπει να διαλέξει ένα χαρτοφυλάκιο από το αποδοτικό σύνολο με βάση το πόσο θέλει να αποφύγει τον κίνδυνο(ρίσκο- risk averse investor). Λαμβάνουμε λοιπόν το εξής πρόβλημα βελτιστοποίησης:

$$\min(\sigma^2 - A\mu) \quad (6)$$

$$\text{subject to: } \sum_{i=1}^n x_i = 1 \quad (7)$$

$$x_i \geq 0, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (8)$$

Στις παραπάνω εξισώσεις το  $A \in [0, \infty]$  εκφράζει το κατά πόσο ο διαχειριστής του χαρτοφυλακίου θέλει να αποφύγει τον κίνδυνο. Συγκεκριμένα για  $A=0$ , έχουμε ένα πρόβλημα ελαχιστοποίησης στο οποίο η μόνη μας μεταβλητή είναι το ρίσκο. Άρα ο επενδυτής ενδιαφέρεται μόνο για την ελαχιστοποίηση του ρίσκου της επένδυσής του, δηλαδή ο μόνος του σκοπός είναι να αποφύγει τον κίνδυνο(risk averse). Ένας άλλος επενδυτής ο οποίος θα δεχόταν ρίσκο με σκοπό να αυξήσει τα κέρδη του από το χαρτοφυλάκιο θα είχε ένα μεγαλύτερο  $A$ . Υπογραμμίζουμε εδώ ότι πάνω στο αποδοτικό σύνολο(efficient frontier) δεν υπάρχουν σωστές και λάθος επιλογές, απλώς εκεί υπεισέρχεται η βούληση του επενδυτή για το κατά πόσο θα θέλει να αποφύγει τον κίνδυνο.

### 2.1.2 Παράδειγμα 1

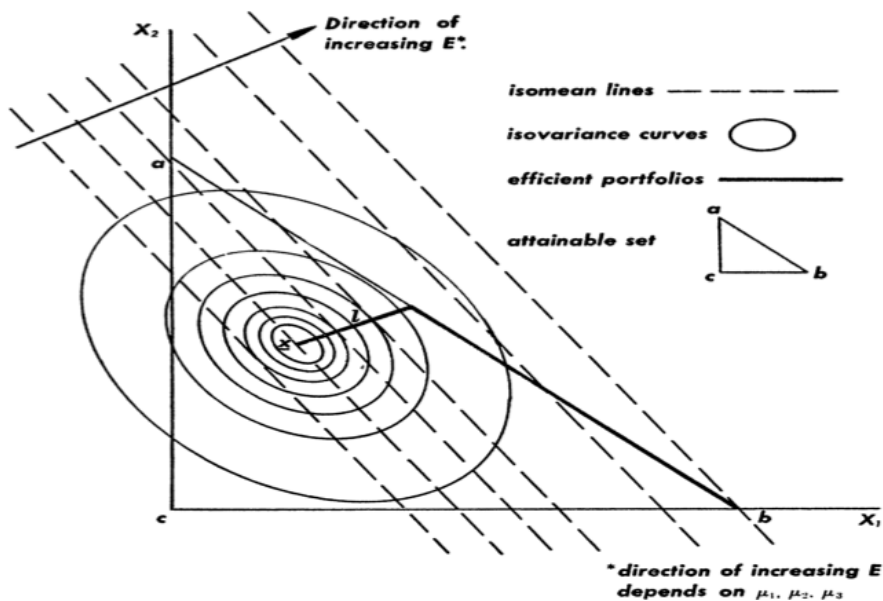
Έστω λοιπόν χαρτοφυλάκιο με assets  $x_1, x_2, x_3$ . Σε ένα τέτοιο απλό παράδειγμα μπορούμε να δούμε την επίλυση και γεωμετρικά. Βρίσκουμε την αναμενόμενη επιστροφή

$$\mu = \sum_{i=1}^3 \mu_i x_i \quad \text{και την διακύμανσή της } \sigma^2 = \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 \sigma_{i,j} x_i x_j \quad \text{με τους περιορισμούς } \sum_{j=1}^3 x_j = 1 \quad \text{και } x_i \geq 0, \quad i = 1, 2, 3 .$$

Με βάση τις παραπάνω σχέσεις γράφουμε το  $x_3$  συναρτήσει των υπολοίπων,  $x_3 = 1 - x_1 - x_2$ , και επομένως έχουμε τώρα ένα πρόβλημα δύο διαστάσεων και τα  $\mu, \sigma$  μπορούν να γραφούν συναρτήσει των  $x_1, x_2$

Γενικότερα αποδεικνύεται μαθηματικά ότι η επιστροφή  $\mu$  μεγιστοποιείται σε παράλληλες γραμμές και η διακύμανση-ρίσκο  $\sigma$  σε ομόκεντρες ελλείψεις.

Σύμφωνα με τα παραπάνω ο Markowitz στην έρευνά του δίνει το ακόλουθο σχήμα για το πρόβλημα(γραμμικού προγραμματισμού ουσιαστικά) :



Εικόνα 2- Διάγραμμα Μέσης Τιμής-Διακύμανσης

Πάνω στις ελλείψεις έχουμε ίση διακύμανση (ρίσκο) ενώ πάνω στις παράλληλες ευθείες έχουμε ίσες επιστροφές(returns) κάθε φορά. Ως εκ τούτου αν θέλαμε να σχεδιάσουμε την γραμμή των βέλτιστων λύσεων(efficient set) τότε ξεκινάμε από το σημείο που βρίσκεται το  $\chi$ , στο κέντρο δηλαδή των ελλείψεων όπου και έχουμε ελάχιστο ρίσκο και κινούμαστε παράλληλα στις ευθείες αύξησης της επιστροφής, μέχρι το σημείο που φθάνουμε στο άκρο του συνόλου των δυνατών λύσεων. Στην συνέχεια κινούμαστε πάνω στο σύνορο αυτό προς την κατεύθυνση αύξησης της επιστροφής μέχρι να φτάσουμε στο σημείο b. Η ευθεία που μόλις σχεδιάσαμε ονομάζεται κρίσιμη ευθεία(critical line) και μας δίνει τα αποδοτικά χαρτοφυλάκια(efficient portfolios).

Ο Markowitz εξηγεί ότι είναι λανθασμένο να βασιζόμαστε μόνο στα αναμενόμενα κέρδη όταν κατασκευάζουμε ένα χαρτοφυλάκιο διότι έτσι δεν λαμβάνουμε υπόψη την ανωτερότητα που έχει η διαφοροποίηση. Αντίθετα η μεθοδός του που βασίζεται στην μέση τιμή-διακύμανση(mean- variance portfolio optimisation) λαμβάνει υπόψη αυτό το γεγονός μέσω του  $\sigma$ . Βέβαια αυτό δεν σημαίνει ότι από τη μεθοδό του δεν μπορεί να προκύψει ως βέλτιστο ένα χαρτοφυλάκιο το οποίο δεν είναι διαφοροποιημένο. Αν μια επένδυση έχει μεγάλη μέση τιμή σε συνδυασμό με μικρή διακύμανση τότε προφανώς θα έχει και μεγαλύτερο βάρος στο χαρτοφυλάκιο έτσι ώστε αυτό να είναι βέλτιστο. Ουσιαστικά όμως για μεγάλο αριθμό ( $\mu_i, \sigma_i$ ) ο κανόνας της μέσης τιμής-διακύμανσης θα βγάζει τις περισσότερες φορές αποτέλεσμα διαφοροποιημένο χαρτοφυλάκιο ως βέλτιστο.

Στο σημείο αυτό αξίζει να τονίσουμε ότι η μέθοδος του Markowitz δεν συνεπάγεται απλώς την διαφοροποίηση, αλλά μάλιστα την «σωστή» διαφοροποίηση. Δηλαδή με τον όρο διαφοροποίηση δεν εννοούμε απλώς το χαρτοφυλάκιο να περιέχει ένα μεγάλο αριθμό στοιχείων. Για παράδειγμα, σημειώνει ο Markowitz, ένα χαρτοφυλάκιο με 60 επενδύσεις σε σιδηροδρομικές εταιρίες, δεν είναι τόσο καλά διαφοροποιημένο όσο ένα

χαρτοφυλάκιο ιδίου μεγέθους αλλά με επενδύσεις σε εταιρίες που δεν ανήκουν στον ίδιο κλάδο πχ σιδηροδρομικές, δημόσιες εταιρίες, χρυσό κλπ. Ο λόγος που συμβαίνει το παραπάνω είναι ότι είναι πολύ πιο πιθανό εταιρίες του ιδίου τομέα να χάσουν κέρδη στο χρηματιστήριο την ίδια χρονική περίοδο, παρά κάποιες που ανήκουν σε διαφορετικό τομέα. Στην μέθοδο του Markowitz τα παραπάνω απεικονίζονται στη συνδιακύμανση των στοιχείων του χαρτοφυλακίου( σχέση [3]). Επενδύσεις οι οποίες ανήκουν στον ίδιο κλάδο θα έχουν μεγαλύτερη συσχέτιση και άρα συνδιακύμανση μεταξύ τους από άλλες που ανήκουν σε διαφορετικούς κλάδους, επομένως στην πρώτη περίπτωση το συνολικό ρίσκο του χαρτοφυλακίου θα είναι μεγαλύτερο. Επομένως, καταλήγει ο Markowitz θα πρέπει να διαλέγουμε επενδύσεις που ανήκουν σε διαφορετικές βιομηχανίες και κλάδους και ειδικότερα κλάδους που έχουν διαφορετικά οικονομικά χαρακτηριστικά.

Η μέθοδος του Markowitz παρότι θεμελιώθηκε το 1952, είναι πολύ σημαντική για την διαχείριση χαρτοφυλακίου και μάλιστα υπάρχουν εφαρμογές της που χρησιμοποιούνται ακόμα και σήμερα. Παρακάτω παρουσιάζουμε μια από αυτές της εφαρμογές: την Γραμμή της Κεφαλαιαγοράς (Capital Market Line).

## 2.2 Capital Market Line

Ας υποθέσουμε την περίπτωση όπου έχουμε τη δυνατότητα να δανείσουμε χρήματα χωρίς ρίσκο. Αυτό μεταφράζεται σαν ένα στοιχείο στο χαρτοφυλάκιο με επιστροφή  $r$  και  $\sigma^2=0$ . Ακόμα ας υποθέσουμε ότι μπορούμε να δανειστούμε χωρίς ρίσκο με το ίδιο επιτόκιο τότε αυτό το στοιχείο(risk-free asset). Διακρίνουμε δύο μέρη για το χαρτοφυλάκιο μας: ένα θα είναι το ασφαλές στοιχείο (risk free) το οποίο αναφέραμε παραπάνω και το οποίο μπορούμε να το έχουμε στη διάθεσή μας ή να το δανειστούμε(short position) και το άλλο μέρος θα αποτελείται από στοιχεία τα οποία έχουν ρίσκο.

Έστω  $x$  το βάρος του χαρτοφυλακίου με τα στοιχεία τα οποία έχουν ρίσκο, με μέση τιμή  $\mu_p$  και διακύμανση  $\sigma_p^2$  και  $(1-x)$  το βάρος που εναποθέτουμε στο ασφαλές στοιχείο, είτε για να το δανείσουμε, είτε για να το δανειστούμε. Επομένως, συνολικά για το χαρτοφυλάκιο:

$$\mu = E[R] = (1 - x)r + x\mu_p = r + x(\mu_p - r) \quad (9)$$

$$\sigma^2 = V[R] = x^2\sigma_p^2 \quad (10)$$

Συνδυάζοντας τις παραπάνω σχέσεις καταλήγουμε στην εξής:



$$\mu = E[R] = r + \frac{\mu_p - r}{\sigma_p} \sigma \quad (11)$$

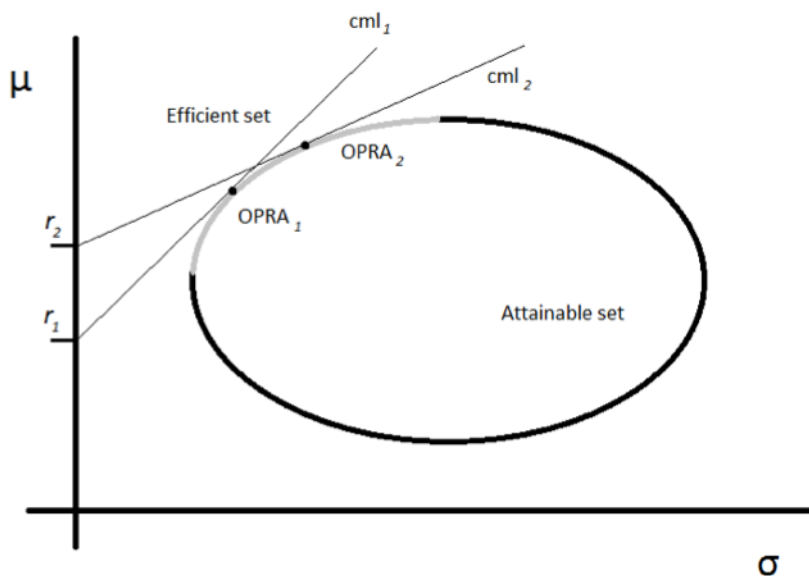
Η σχέση (11) παριστάνει ουσιαστικά μια ευθεία με μεταβλητές την μέση τιμή(άξονας  $y$ ) και διακύμανσης(άξονας  $x$ ). Η ευθεία αυτή περνά από τα σημεία  $(0,r)$  που σημαίνει ότι για ρίσκο  $\sigma=0$  δανείζουμε στο ασφαλές επιτόκιο(αυτό μπορεί να είναι το επιτόκιο που δίνει μια πολύ ασφαλής επένδυση όπως τα treasury bonds των ΗΠΑ). Η ευθεία έχει επίσης κλίση  $(\mu_p - r)/\sigma_p$  και επειδή ο επενδυτής θέλει να μεγιστοποιήσει την επιστροφή για δεδομένο ρίσκο θέλει η κλίση αυτή να είναι η μέγιστη δυνατή. Το χαρτοφυλάκιο το οποίο μεγιστοποιεί την κλίση αυτή ονομάζεται Βέλτιστο Χαρτοφυλάκιο Επενδύσεων Κινδύνου (OPRA- Optimal Portfolio of Risky Assets). Ουσιαστικά δηλαδή το OPRA προκύπτει από το εξής πρόβλημα βελτιστοποίησης:

$$\max \frac{\mu_p - r}{\sigma_p} = E[R] = \sum_{i=1}^n \mu_i x_i \quad (12)$$

$$\text{subject to: } \sigma_p^2 = \text{Var}[R] = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \sigma_{i,j} x_i x_j \quad (13)$$

$$\sum_{i=1}^n x_i = 1 \quad (14)$$

Το παραπάνω πρόβλημα θα βρει την ευθεία με την μεγαλύτερη κλίση η οποία θα περνά από το σημείο  $(0, r)$  και το σύνολο των δυνατών λύσεων(attainable set). Η ευθεία αυτή ονομάζεται Γραμμή της Κεφαλαιαγοράς(Capital Market Line-CML), εφάπτεται στο αποδοτικό σύνολο και φαίνεται παρακάτω:



Εικόνα 3-Διάγραμμα Γραμμής Κεφαλαιαγοράς

Στο σχήμα αυτό φαίνονται δύο CMLs ανάλογα με το επιτόκιο του ασφαλούς στοιχείου του χαρτοφυλακίου. Μια παρατήρηση που μπορεί να γίνει από την σύγκριση των δύο ευθειών είναι ότι συμφέρει να επενδύσουμε σε αυτή με μεγαλύτερο επιτόκιο ασφαλούς επένδυσης (χωρίς ρίσκο) μέχρι το σημείο τομής τους, ενώ από εκεί και πέρα συμφέρει αυτή με το μικρότερο επιτόκιο. Αυτό μπορεί να εξηγηθεί από το γεγονός ότι όταν χρειάζεται δανεισμός για επένδυση (aggressive investor) τότε πλέον έχει λιγότερο κόστος να δανείζεται ο επενδυτής με το μικρότερο επιτόκιο.

Ένας επενδυτής μπορεί να τοποθετηθεί σε οποιοδήποτε σημείο της CML ανάλογα με την επιθυμία του να αποφύγει τον κίνδυνο. Για παράδειγμα ένας επενδυτής που θα τοποθετήσει το χαρτοφυλάκιό του πριν από το σημείο τομής της ευθείας και του αποδοτικού συνόλου χαρακτηρίζεται ως πιο συντηρητικός (conservative investor) εφόσον το μεγαλύτερο μέρος του χαρτοφυλακίου του, αφιερώνεται σε στοιχεία χωρίς κίνδυνο. Επιπλέον, ένας επενδυτής ο οποίος τοποθετεί το χαρτοφυλάκιό του ακριβώς στο σημείο τομής ουσιαστικά τοποθετεί όλα τα χρήματά του στο OPRA. Ουσιαστικά, δηλαδή λέει ότι το ρίσκο που είναι διατεθειμένος να πάρει ισούται με το ρίσκο του OPRA ( $\sigma = \sigma_p$ ). Με αντικατάσταση στην σχέση (11) αυτό δίνει ( $\mu = \mu_p$ ).

Αντίθετα ένας επενδυτής ο οποίος τοποθετείται πάνω από το σημείο τομής της ευθείας με το αποδοτικό σύνολο χαρακτηρίζεται επιθετικός επενδυτής (aggressive investor) επειδή είναι διατεθειμένος να επενδύσει σε στοιχείο το οποίο έχει μεγαλύτερο ρίσκο (και απόδοση) από το OPRA. Στο σημείο αυτό εξηγούμε ότι το OPRA αποδεικνύεται ότι είναι ουσιαστικά το χαρτοφυλάκιο των αγορών (market portfolio), από το Υπόδειγμα Αποτίμησης Περιουσιακών Στοιχείων (Capital Asset Pricing Model - CAPM), το οποίο θα δούμε στη συνέχεια. Επιστρέφοντας στο παράδειγμά μας, ο επιθετικός επενδυτής θέλει να εναποθέσει τα χρήματά του σε μια επένδυση με  $\sigma > \sigma_p$  και αν είναι επιτυχημένη  $\mu > \mu_p$ .

Σημειώνουμε ότι το κεφάλαιο το οποίο χρειάζεται για να επενδύσει σε στοιχεία με κίνδυνο ο επενδυτής το δανείζεται με επιτόκιο  $r$ . Αυτό φαίνεται καλύτερα αν ξανααγράψουμε την σχέση (11):

$$\mu = \mu_p \left( \frac{\sigma}{\sigma_p} \right) - \left( \frac{\sigma}{\sigma_p} - 1 \right) r \quad \text{και αν θέσουμε } \frac{\sigma}{\sigma_p} = b \quad (\text{μεταβλητή}) \text{ λαμβάνουμε:}$$

$$\mu = \mu_p b - (b - 1)r \quad (*) \quad \text{ή ισοδύναμα} \quad \mu = r + b(\mu_p - r) \quad (**)$$

Επομένως ο αφαιρέτης στην παραπάνω σχέση (\*) δείχνει το ποσό που θα δανειστεί (εάν θέλει να ρισκάρει, διότι κάτω από το σημείο τομής είναι  $b < 1$  άρα δανείζει δεν δανείζεται) ο επενδυτής. Συγκεκριμένα για τις περιπτώσεις που είδαμε παραπάνω:

Αν ο επενδυτής τοποθετηθεί ακριβώς στο σημείο τομής, τότε:

$\sigma = \sigma_p \Rightarrow b = 1 \Rightarrow \mu = \mu_p$  και αυτό σημαίνει ότι δεν δανείζεται αλλά ούτε δανείζει. Αντ' αυτού τοποθετεί όλο του το κεφάλαιο στο χαρτοφυλάκιο της αγοράς(OPRA).

Αν ο επενδυτής τοποθετηθεί πάνω από το σημείο τομής τότε:

$\sigma > \sigma_p \Rightarrow b > 1 \Rightarrow \mu > \mu_p$  τότε δανείζεται χρήματα για να τα επενδύσει σε επένδυση με μεγαλύτερο ρίσκο από το OPRA αλλά και με μεγαλύτερα προσδοκώμενα κέρδη.

Εν κατακλείδι, η Ευθεία της Κεφαλαιαγοράς (CML) είναι μια πολύ σημαντική εφαρμογή της Μοντέρνας Θεωρίας Χαρτοφυλακίου του Markowitz διότι σε αντίθεση με αυτούς που επικεντρώνονται αποκλειστικά στο αποδοτικό χαρτοφυλάκιο της αγοράς, η CML εισάγει τον παράγοντα των επενδύσεων που δεν έχουν ρίσκο(risk-free assets) στο χαρτοφυλάκιο επομένως είναι εξ ορισμού πιο ολοκληρωμένη.

Παρακάτω παρουσιάζουμε μια πολύ σημαντική εφαρμογή της ανάλυσης χαρτοφυλακίου η οποία βασίστηκε στην δουλειά του Markowitz και παρουσιάστηκε από τους Jack Treynor (1961, 1962), William F. Sharpe (1964), John Lintner (1965), Jan Mossin (1966). Η εφαρμογή αυτή ονομάζεται Υπόδειγμα Αποτίμησης Περιουσιακών Στοιχείων(Capital Asset Pricing Model-CAPM) και χρησιμοποιείται ακόμα και σήμερα από τους επενδυτές.

## 2.3 Υπόδειγμα Αποτίμησης Περιουσιακών

### Στοιχείων(Capital Asset Pricing Model-CAPM)

Το CAPM είναι ένα μοντέλο το οποίο χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της απόδοσης μιας επένδυσης, έτσι ώστε να αποφασίσουμε αν θέλουμε να την εντάξουμε στο χαρτοφυλάκιο μας. Συγκεκριμένα, δείχνει τον τρόπο με τον οποίο η αγορά αποτιμά τα διάφορα περιουσιακά στοιχεία. Η σημαντικότερη συνέπεια του υποδείγματος είναι ότι συνδέει την αναμενόμενη απόδοση ενός περιουσιακού στοιχείου με ένα μέγεθος κινδύνου του περιουσιακού στοιχείου, το οποίο εκφράζεται σε σχέση με τον κίνδυνο του χαρτοφυλακίου της αγοράς(market portfolio). Ο Sharpe,1964 θεμελίωσε το παραπάνω μοντέλο και για την έρευνά του αυτή του απονεμήθηκε το βραβείο Νόμπελ το 1990.

Η αρχική ιδέα του Sharpe για να φτιάξει το μοντέλο ήταν η εξής. Γενικά μια μεμονωμένη επένδυση περιέχει κινδύνους δύο ειδών:

1. Συστηματικός Κίνδυνος(Systematic Risk): Ο συστηματικός κίνδυνος είναι ο κίνδυνος της αγοράς ο οποίος δεν μπορεί να αντιμετωπιστεί. Παραδείγματα περιλαμβάνουν μια οικονομική κρίση, μια πολεμική κρίση και γενικότερα ό,τι απρόβλεπτο μπορεί να αναστατώσει τις αγορές.
2. Μη συστηματικός κίνδυνος(Non-systematic Risk): Είναι ο κίνδυνος ο οποίος αναφέρεται στην συγκεκριμένη μετοχή, λέγεται και συγκεκριμένος κίνδυνος(specific risk). Ο κίνδυνος αυτός μπορεί να αντιμετωπιστεί κατασκευάζοντας ένα διαφοροποιημένο χαρτοφυλάκιο με πολλές μετοχές από διαφορετικούς κλάδους και θεωρούμε ότι κατ' αυτόν τον τρόπο ουσιαστικά εξαλείφεται.

Θεωρώντας λοιπόν πλέον μόνο τον συστηματικό κίνδυνο υπαρκτό για το χαρτοφυλάκιο μας ο σκοπός είναι να παρουσιάσουμε μια μέθοδο η οποία να μας δίνει την σχέση μεταξύ του κινδύνου αυτού και της επιστροφής που θα έχει η επένδυσή μας.

Είναι δεδομένο λοιπόν ότι η επιστροφή μας για μια επένδυση μπορεί να εκφραστεί από την ακόλουθη έκφραση:

Απαιτούμενη απόδοση = Απόδοση χωρίς κίνδυνο + Ανταμοιβή για τον αναλαμβανόμενο κίνδυνο (15)

Εδώ σημειώνουμε ότι το μοντέλο CAPM ακολουθεί αυτό του Markowitz και επομένως υιοθετεί και τις αντίστοιχες προϋποθέσεις του. Δηλαδή, ο επενδυτής θεωρείται ότι θέλει να ελαχιστοποιήσει τον κίνδυνο, να μεγιστοποιήσει την επιστροφή-απόδοση και έχει στην διάθεσή του πληροφορίες για το σύνολο της αγοράς(μπορεί να επενδύσει σε οποιαδήποτε μετοχή(με κίνδυνο) και τέλος έχει την δυνατότητα να δανείζει ή να δανείζεται κεφάλαιο με επιτόκιο μιας επένδυσης χωρίς κίνδυνο(risk free rate- $r_f$ ) όπως είδαμε στην προηγούμενη ενότητα. Εφόσον λοιπόν όλοι οι επενδυτές χρησιμοποιούν την μέθοδο μέσης τιμής-διακύμανσης του Markowitz για το χαρτοφυλάκιο τους και έχουν στη διάθεσή τους τις ίδιες πληροφορίες για την αγορά, όλοι θα έχουν τα χαρτοφυλάκιά τους πάνω στην Γραμμή της Κεφαλαιαγοράς(Capital Market Line), δηλαδή στο αποδοτικό σύνολο(efficient frontier). Το χαρτοφυλάκιο αυτό θα είναι σύμφωνα πάντα και με τα προηγούμενα μια μίξη ενός στοιχείου χωρίς κίνδυνο(risk free asset) και ενός συγκεκριμένου αποδοτικού συνόλου στοιχείων με ρίσκο(fund of risky assets). Το αποδοτικό αυτό σύνολο στοιχείων με κίνδυνο, που χρησιμοποιούν όλοι οι επενδυτές για να τοποθετήσουν τις επενδύσεις τους δεν είναι άλλο από το χαρτοφυλάκιο της αγοράς(market portfolio) ή ισοδύναμα το OPRA(Optimal Portfolio of Risky Assets) που είδαμε στην Γραμμή της Κεφαλαιαγοράς(CML). Εδώ έγινε η εξής παραδοχή: το χαρτοφυλάκιο της αγοράς δεν προκύπτει χρησιμοποιώντας την μέθοδο του Markowitz, αλλά αντίθετα θεωρούμε ότι η αγορά έχει φτάσει σε σημείο ισορροπίας(equilibrium), με βάση τις κινήσεις των επενδυτών και το νόμο της προσφοράς-ζήτησης(supply and demand). Έτσι, το βάρος- συμμετοχή ενός στοιχείου(πχ. εταιρίας) στο (βέλτιστο-αποδοτικό) χαρτοφυλάκιο της αγοράς είναι η συνολική αξία των μετοχών του στοιχείου αυτού(κεφαλαιοποίηση=αριθμός\_μετοχών\*τιμή\_μετοχής) προς την συνολική αξία

όλων των στοιχείων που ανήκουν στην αγορά. Η γενική ιδέα είναι ότι στοιχεία με μεγάλη ζήτηση θα οδηγήσουν σε μεγαλύτερες τιμές μετοχής, μεγαλύτερη επιστροφή και vice versa. Η συνεχής αγοραπωλησία μετοχών θα οδηγήσει σε την αγορά σε ισορροπία.

Επιστρέφοντας στην μέθοδό μας θέλουμε να ποσοτικοποιήσουμε την έκφραση (15). Αρχικά η απόδοση χωρίς κίνδυνο δίνεται από το επιτόκιο  $r_f$  (US treasury bond). Η ανταμοιβή για τον αναλαμβανόμενο κίνδυνο δίνεται από την έκφραση  $\beta (\mu_p - r_f)$ , όπου το  $(\mu_p - r_f)$  δηλώνει την πριμοδότηση που έχει το χαρτοφυλάκιο της αγοράς σε σχέση με το στοιχείο χωρίς κίνδυνο και ουσιαστικά είναι η διαφορά της απόδοσης του αποδοτικού χαρτοφυλακίου της αγοράς και της απόδοσης του στοιχείου χωρίς κίνδυνο.

Ο τύπος για το CAPM(CAPM Formula) γράφεται λοιπόν:

$$\mu_i = r_f + b_i(\mu_p - r_f), \mu_i : \text{η αναμενόμενη επιστροφή για το χαρτοφυλάκιο μας.}$$

Το  $b_i$ (beta) εκφράζει τον κίνδυνο της επένδυσής μας και είναι ξεχωριστό για την χαρτοφυλάκιο κάθε επενδυτή. Ουσιαστικά είναι ο εκφραστής του συστηματικού κινδύνου που δεν μπορεί να αντιμετωπιστεί με διαφοροποίηση του χαρτοφυλακίου όπως προείπαμε και χρησιμοποιείται κατά κόρον στο χρηματιστήριο σήμερα.

Παρατηρούμε ότι η παραπάνω σχέση για το CAPM είναι ακριβώς η ίδια με την σχέση (\*\*\*) που βρήκαμε από την Γραμμή της Κεφαλαιαγοράς(CML). Μάλιστα η απόδειξη του τύπου του CAPM είναι ακριβώς αυτή που γράψαμε στο κεφάλαιο Γραμμής της Κεφαλαιαγοράς και αυτό είναι απολύτως λογικό. Εφόσον οι επενδυτές θέλουν να κατασκευάσουν ένα βέλτιστο χαρτοφυλάκιο, υπό τις προαναφερθείσες προϋποθέσεις, αυτό θα βρίσκεται πάνω στην CML. Επιπλέον, στην απόδειξη αυτή θέσαμε  $\frac{\sigma}{\sigma_p} = b$

$$\text{στην σχέση } \mu = \mu_p \left( \frac{\sigma}{\sigma_p} \right) - \left( \frac{\sigma}{\sigma_p} - 1 \right) r$$

και η επιλογή μας αυτή δεν ήταν καθόλου τυχαία εφόσον αυτός είναι ο συντελεστής b.

## 2.4 Μειονεκτήματα Markowitz

Παρά το γεγονός ότι η εργασία του Markowitz είναι πραγματικά ρηξικέλευθη και υπάρχουν εφαρμογές που την χρησιμοποιούν ακόμα και σήμερα, έχει κάποια εγγενή μειονεκτήματα. Κατ' αρχάς, η θεωρία του Markowitz λειτουργεί υπό την υπόθεση για ομοιογενείς προσδοκίες(homogeneous expectations). Ο Markowitz δηλαδή υποθέτει ότι όλοι οι επενδυτές στην αγορά θα λαμβάνουν τις ίδιες αποφάσεις για το χαρτοφυλάκιο τους, κάτω από τις ίδιες συνθήκες για επιστροφές(κέρδος) και διακυμάνσεις(ρίσκο). Στην πραγματικότητα όμως, κάποιοι επενδυτές στην αγορά θα είναι πάντα διατεθειμένοι να αναλάβουν μεγαλύτερο μερίδιο ρίσκου με στόχο την αύξηση των κερδών τους. Δηλαδή οι επενδυτές δεν αποστρέφονται πάντα το ρίσκο και

είναι προκατειλημμένοι υπέρ μεγαλύτερων επιστροφών στο χαρτοφυλάκιο τους. Επιπλέον, το κλασικό πλαίσιο μέσης τιμής- διακύμανσης βασίζεται στην τέλεια γνώση των αναμενόμενων αποδόσεων των περιουσιακών στοιχείων καθώς και του πίνακα μεταβλητότητας-συνδιακύμανσης. Ωστόσο, αυτές οι επιστροφές είναι μη παρατηρήσιμες και άγνωστες κατά τη διάρκεια εφαρμογής του μοντέλου, ενώ ακόμα και ο τρόπος να λάβουμε εκτιμήσεις για αυτές είναι πολύ περίπλοκος. Πράγματι, πολλές πιθανές πηγές σφαλμάτων (Π.χ., αδυναμία λήψης επαρκούς αριθμού δειγμάτων δεδομένων, αστάθεια δεδομένων, διαφορετικές προσωπικές απόψεις των υπευθύνων λήψης αποφάσεων σχετικά με τις μελλοντικές επιστροφές κ.λπ.) επηρεάζουν την εκτίμησή τους και οδηγούν σε αυτό που ο Bawa Et al. ονομάζει Κίνδυνο Εκτίμησης κατά την επιλογή χαρτοφυλακίου. Αυτός ο κίνδυνος εκτίμησης έχει αποδειχθεί ότι είναι πηγή πολύ λανθασμένων αποφάσεων, γιατί η σύνθεση του βέλτιστου χαρτοφυλακίου είναι πολύ ευαίσθητη στην μέση τιμή και στον πίνακα συνδιακύμανσης των περιουσιακών στοιχείων και μικρές διαταραχές στις ροπές των τυχαίων τιμών των επιστροφών μπορούν να οδηγήσουν στην κατασκευή πολύ διαφορετικών χαρτοφυλακίων.

Επιπλέον όπως αναφέρουν οι Xidonas et al. η μέθοδος του Markowitz μέσης συχνά επικρίνεται για την εγγενή δυσκολία της εφαρμογής της. Για παράδειγμα, ένα ίδρυμα που ακολουθεί 250 μετοχές θα χρειαστεί 31,125 συντελεστές συσχέτισης για την εφαρμογή του υποκείμενου πλαισίου. Αλλά φαίνεται απίθανο ότι οι αναλυτές θα είναι σε θέση να εκτιμήσουν άμεσα τέτοιες τεράστιες και σύνθετες δομές συσχέτισης μέσα στα εφικτά οργανωτικά όρια ενός παραδοσιακού οίκου διαχείρισης περιουσιακών στοιχείων. Επιπρόσθετα, η υπολογιστική δυσκολία που σχετίζεται με την επίλυση ενός τετραγωνικού προβλήματος προγραμματισμού μεγάλης κλίμακας, με πολύ πυκνή μήτρα συνάφειας σε πραγματικό χρόνο, είναι υψηλή.

Ένας επιπλέον παράγοντας που δυσχεραίνει σημαντικά τη διαδικασία βελτιστοποίησης του χαρτοφυλακίου είναι η ανάγκη ενσωμάτωσης ενός συνόλου εξελιγμένων πραγματικών επενδυτικών περιορισμών στα μοντέλα (Branke et al. 2009). Τέτοιοι περιορισμοί μπορεί να είναι: (α) ο μέγιστος αριθμός τίτλων-χρεογράφων που θα συμπεριληφθούν στο χαρτοφυλάκιο, (β) ορισμένα όρια buy-in, τα οποία απαιτούν κάποιο ελάχιστο αριθμό μετοχών να αποκτηθούν, εάν αυτή η μετοχή περιλαμβάνεται στο χαρτοφυλάκιο Γ) ο όγκος των δαπανών συναλλαγής και δ) συγκεκριμένοι κανονιστικοί κανόνες, όπως ο περιορισμός 5-10-40. Αυτό δηλώνει ότι το πολύ το 10 τοις εκατό του καθαρού ενεργητικού ενός αμοιβαίου κεφαλαίου μπορεί να επενδυθεί σε τίτλους-χρεόγραφα από έναν μόνο εκδότη και ότι οι επενδύσεις άνω του 5 τοις εκατό με έναν μόνο εκδότη δεν μπορούν να αποτελούν περισσότερο από το 40 τοις εκατό του συνολικού χαρτοφυλακίου.

## 2.5 Προτεινόμενες Λύσεις

Στα παραπάνω προβλήματα οι ερευνητές προσπάθησαν να δώσουν λύσεις. Κατ' αρχάς, οι Mitra et al. (2007) και Lejeune and Filomena (2014) θέλοντας να αντιμετωπίσουν την μεγάλη υπολογιστική πολυπλοκότητα της μεθόδου του Markowitz κατάφεραν να μειώσουν τον υπολογιστικό χρόνο του τετραγωνικού προβλήματος προγραμματισμού (Παραλλαγές του μοντέλου βελτιστοποίησης Markowitz) στο ελάχιστο για χαρτοφυλάκια μεγέθους μέχρι και 2500 στοιχείων.

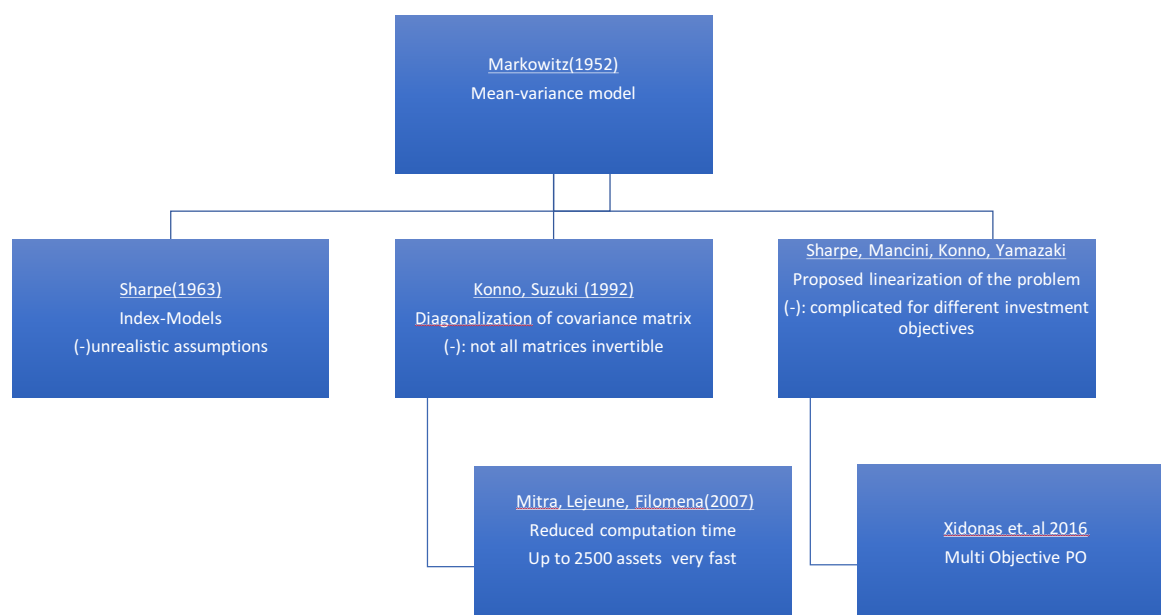
Το προαναφερθέν υπολογιστικό ζήτημα αντιμετωπίστηκε με επιτυχία από αποτελεσματικές τεχνικές που αναπτύχθηκαν από τους Markowitz και Perold (1981), Perold (1984) και DeMiguel et al. (2007, 2009). Για να αποφευχθούν οι χειρισμοί με πολύ πυκνούς πίνακες συνδιακύμανσης, αυτές οι προσεγγίσεις επικεντρώθηκαν σε μεθόδους διαγωνοποίησης του πίνακα συνδιακύμανσης, αλλά με απώλεια πληροφορίας. Οι Konno και Suzuki (1992) πρότειναν μια ακόμη στρατηγική διαγωνοποίησης χωρίς απώλεια πληροφορίας. Ενώ αυτή η μέθοδος, όταν εφαρμόζεται, θα παράγει ένα αποδοτικό σύνολο χαρτοφυλακίων, η δυσκολία είναι ότι οι περισσότεροι μεγάλοι πίνακες συνδιακύμανσης δεν είναι αντιστρέψιμοι (Steuer et al., 2011).

Αντιμετωπίζοντας το ίδιο πρόβλημα αλλά από μια άλλη οπτική γωνία, πολλοί συγγραφείς προσπάθησαν να αντιμετωπίσουν τις σχετικές δυσκολίες χρησιμοποιώντας διάφορα μοντέλα προσέγγισης. Για παράδειγμα, η χρήση μοντέλων δεικτών επιτρέπει να μειωθεί ο υπολογισμός με την εισαγωγή της έννοιας των συγκεκριμένων παραγόντων (δεικτών) που επηρεάζουν τις τιμές των μετοχών (Sharpe 1963). Ο Sharpe σημειώνει ότι η μέθοδός του μειώνει σημαντικά τον υπολογιστικό χρόνο αλλά και τις απαιτήσεις μνήμης του συστήματος επιτρέποντας έτσι την ανάλυση χαρτοφυλακίων μεγέθους έως και 2000 στοιχείων σε αντίθεση με τη μέθοδο του Markowitz που το όριο ήταν τα 250 στοιχεία. Ωστόσο, αυτές οι προσπάθειες είναι συστηματικά υποτιμημένες πλέον λόγω της δημοτικότητας των μοντέλων ισορροπίας, όπως το CAPM και το μοντέλο Εξισορροπητικής Κερδοσκοπίας (Arbitrage Pricing Theory-APT), τα οποία είναι λιγότερο απαιτητικά από υπολογιστικής απόψεως. Σημειώνεται ότι το μοντέλο APT (Ross, 1976) μειώνει την υπολογιστική δυσκολία, διότι υποθέτει γραμμική συσχέτιση της αναμενόμενης επιστροφής ενός στοιχείου (πχ: μετοχής) με μακροοικονομικούς παράγοντες, όπως η ανεργία, ο πληθωρισμός, ή συγκεκριμένες επενδυτικές επιλογές του προμηθευτή. Έτσι ο επενδυτής καταλήγει σε μια αποτίμηση του συγκεκριμένου στοιχείου και προσπαθεί να εκμεταλλευτεί την διαφορά της τιμής αυτής με την τιμή της αγοράς. Ωστόσο, η ιδέα του Markowitz εξακολουθεί να είναι παρούσα, αφού το CAPM βασίζεται σε αυτό το μοντέλο. Επιπλέον, τα μοντέλα ισορροπίας επιβάλλουν αρκετές μη ρεαλιστικές υποθέσεις για να αντλήσουν μια απλή αλλά συνήθως ασταθή σχέση μεταξύ του ποσοστού απόδοσης των μεμονωμένων περιουσιακών στοιχείων και του χαρτοφυλακίου της αγοράς.

Το άλλο πρόβλημα που κλήθηκαν να λύσουν οι ερευνητές ήταν αυτό της ανάγκης ενσωμάτωσης επενδυτικών περιορισμών στα μοντέλα. Τα παραπάνω πρόβλημα μπορούν να διαμορφωθεί σωστά με την εισαγωγή ακέραιων μεταβλητών (Canakgoz και Beasley 2009). Ωστόσο, η επίλυση των προβλημάτων βελτιστοποίησης του χαρτοφυλακίου που περιέχουν μεταβλητές ακέραιων αριθμών θεωρήθηκε ως βαρύ έργο. Ο βασικός λόγος είναι ότι το πρότυπο μοντέλο (Markowitz) χρησιμοποιεί τη διακύμανση (ή την τυπική απόκλιση) ως το μέτρο του κινδύνου. Σε αυτή τη βάση, πολλοί ερευνητές προτείνουν τη γραμμικοποίηση (linearization) του προβλήματος επιλογής χαρτοφυλακίου. Μετά οι προτάσεις των Sharpe (1971), Konno και Yamazaki (1991), Ogryczak (2000) και Mansini et al. (2003) αποτελούν απόπειρες ορόσημο προς αυτήν την κατεύθυνση, δηλαδή εκμετάλλευση της απόλυτης απόκλισης ως εναλλακτικό μέτρο κινδύνου και διατύπωση του προβλήματος επιλογής χαρτοφυλακίου ως γραμμικό. Τα αναφερθέντα πρακτικά προβλήματα βελτιστοποίησης χαρτοφυλακίου μπορούν να επιλυθούν από το συμβατικό λογισμικό γραμμικού προγραμματισμού σε πραγματικό χρόνο.

Στο παρακάτω διάγραμμα συνοψίζεται η πρόοδος που έχει επιτευχθεί από τους ερευνητές μέχρι τώρα:

#### Επισκόπηση Προτεινόμενων Λύσεων



**Εικόνα 4 Προτεινόμενες Επεκτάσεις μεθόδου Markowitz**

Στον πίνακα παρουσιάζεται και μια ακόμα εργασία των Xidonas et al. 2016 οι οποίοι ασχολήθηκαν με την επίλυση ενός προβλήματος ανάλυσης χαρτοφυλακίου το οποίο έχει παραπάνω από ένα επενδυτικούς σκοπούς να βελτιστοποιήσει ταυτόχρονα, διαδικασία η οποία παρουσίαζε προβλήματα με την χρήση της μεθόδου του Markowitz. Στο πλαίσιο αυτό αξίζει να γίνει αναφορά στην εργασία των Xidonas et al. 2015 η οποία



χρησιμοποιεί την Ανάλυση Χαρτοφυλακίου στο πλαίσιο της εταιρικής υπευθυνότητας και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την αξιολόγηση επενδύσεων κλιματικής πολιτικής, κάτι το οποίο μας ενδιαφέρει στην παρούσα εργασία.

## **2.6 Environmental corporate responsibility for investments**

### **evaluation: an alternative multi-objective programming**

#### **model (Xidonas et al. 2015)**

Στην έρευνά τους οι Xidonas et al. 2015 προτείνουν ένα μοντέλο γραμμικού προγραμματισμού δύο αντικειμενικών συναρτήσεων το οποίο εισάγεται για να παρέχει τα βέλτιστα χαρτοφυλάκια (Pareto Optimal set) με βάση την καθαρή παρούσα αξία των έργων και την βαθμολογία EECR(Energy and Environmental Corporate Responsibility) των επιχειρήσεων. Μια συστηματική προσέγγιση λήψης αποφάσεων χρησιμοποιώντας τη προσομοίωση Monte Carlo και τον γραμμικό προγραμματισμό αναπτύσσεται επίσης για να αντιμετωπιστεί η εγγενής αβεβαιότητα των συντελεστών των αντικειμενικών συναρτήσεων. Αναφέρεται επίσης η αξιοπιστία του συνόλου των Pareto βέλτιστων χαρτοφυλακίων(αποδοτικό σύνολο), καθώς και η αξιοπιστία των μεμονωμένων χαρτοφυλακίων του Pareto(individual Pareto Optimal Portfolios). Η προτεινόμενη προσέγγιση διευκολύνει τους τραπεζικούς οργανισμούς και τα ιδρύματα στην επιλογή των επιχειρήσεων που υποβάλλουν αίτηση για οικονομική ενίσχυση και χορήγηση πιστώσεων στο πλαίσιο του EECR.

Ο συνδυαστικός χαρακτήρας του προβλήματος συνεπάγεται τη χρήση μεθόδων βελτιστοποίησης που στοχεύουν στο χαρτοφυλάκιο έργων που ικανοποιούν τους περιορισμούς και επιτυγχάνουν την "βέλτιστη" απόδοση. Ένας συνδυασμός έργων ορίζεται ως χαρτοφυλάκιο έργων. Συνήθως οι "βέλτιστες" επιδόσεις εκφράζονται με έμφαση στα οικονομικά κριτήρια. Τα κριτήρια που σχετίζονται με την προώθηση βιώσιμων πρακτικών, που προωθούν την πράσινη ανάπτυξη, δεν ελήφθησαν υπόψη στα παραδοσιακά μοντέλα (Hobbs and Meier 2000).

Ωστόσο, η τρέχουσα χρηματοπιστωτική και οικονομική κρίση, καθώς και οι αυξανόμενες κοινωνικοοικονομικές και περιβαλλοντικές πιέσεις, συμπεριλαμβανομένης της κλιματικής αλλαγής, θέτουν σοβαρά υπό αμφισβήτηση τα παραδοσιακά πρότυπα ανάπτυξης. Η ανάγκη ανάπτυξης εναλλακτικών μοντέλων ικανών να αντιμετωπίσουν την τρέχουσα οικονομική κατάσταση μέσω της εκμετάλλευσης βιώσιμων μοντέλων είναι ζωτικής σημασίας (Hobbs and Meier 2000, Doukas et al., 2012). Τα παραπάνω αποδεικνύουν τη σημασία της παραπάνω έρευνας. Η καινοτομία της παρούσας μελέτης είναι η ενσωμάτωση της ενεργειακής και

περιβαλλοντικής εταιρικής ευθύνης (EECR) στη λήψη αποφάσεων, υποστηρίζοντας ιδιαίτερα την ανάπτυξη ενός νέου μοντέλου αξιολόγησης των επενδύσεων. Το μοντέλο αυτό μπορεί να βοηθήσει τα χρηματοπιστωτικά ιδρύματα (πράσινα δάνεια) και τους κρατικούς φορείς που χρηματοδοτούν επενδύσεις φιλικές προς το περιβάλλον. Η απόδοση της επιχείρησης από το EECR θεωρείται ως κριτήριο αξιολόγησης του υποβληθέντος σχεδίου.

Σύμφωνα με τα παραπάνω οι μοχλοί της βελτιστοποίησης είναι δύο αντικειμενικές συναρτήσεις:

- (1) Η καθαρή παρούσα αξία (NPV) που αντιπροσωπεύει την οικονομική διάσταση και χαρακτηρίζει κάθε έργο και
- (2) ο δείκτης EECR που αντιπροσωπεύει την περιβαλλοντική εταιρική ευθύνη και χαρακτηρίζει κάθε επιχείρηση που υποβάλλει το έργο.

Με αυτόν τον τρόπο, οι επιχειρήσεις με αυξημένη EECR επιβραβεύονται χωρίς να αγνοούνται οι οικονομικές επιδόσεις των σχετικών έργων. Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι το μοντέλο πολλαπλών αντικειμενικών στόχων (συγκεκριμένα δύο) δεν παρέχει ένα βέλτιστο χαρτοφυλάκιο, αλλά ένα σύνολο από βέλτιστα χαρτοφυλάκια Pareto μεταξύ των οποίων το πιο προτιμώμενο επιλέγεται από τον υπεύθυνο λήψης αποφάσεων (Decision Maker-DM).

Σε γενικές γραμμές, η βελτιστοποίηση πολλαπλών στόχων αυξάνει τους βαθμούς ελευθερίας στη διαδικασία λήψης αποφάσεων παρέχοντας όχι τη βέλτιστη λύση (όπως στη βελτιστοποίηση ενός στόχου) αλλά ένα σύνολο υποψήφιων λύσεων μεταξύ των οποίων επιλέγει ο υπεύθυνος λήψης αποφάσεων. Επομένως, το σύνολο των βέλτιστων λύσεων Pareto (Pareto set) είναι βασικές πληροφορίες σε μια ολοκληρωμένη προσέγγιση λήψης αποφάσεων. Πρέπει να υπογραμμιστεί ότι η έρευνα ασχολείται με μοντέλα πολλαπλών στόχων (Multi-Objective Linear Programming-MOIP) και μπορεί να παραγάγει το ακριβές σύνολο Pareto (δηλαδή όλες τις βέλτιστες λύσεις Pareto).

Το έργο αυτό προχωράει ένα βήμα παραπέρα, λαμβάνοντας επίσης υπόψη την αβεβαιότητα που χαρακτηρίζει βασικές παραμέτρους του μοντέλου, οι οποίοι είναι οι συντελεστές των αντικειμενικών συναρτήσεων, δηλαδή η Καθαρή Παρούσα Αξία(ΚΠΑ) κάθε έργου και η βαθμολογία EECR κάθε επιχείρησης. Δεδομένου ότι αυτές οι τιμές είναι πραγματικά εκτιμήσεις, χρησιμοποιείται μια συστηματική προσέγγιση για την αντιμετώπιση της εγγενούς αβεβαιότητας. Ως εκ τούτου, οι συντελεστές θεωρούνται ότι έχουν στοχαστικό χαρακτήρα, δηλαδή ακολουθούν μια κατανομή πιθανότητας αντί για ένα μεμονωμένες τιμές για τους συντελεστές των αντικειμενικών συναρτήσεων.

Παρακάτω αναφέρουμε τη μέθοδο που χρησιμοποιεί η παραπάνω έρευνα για να βρει το βέλτιστο σύνολο Pareto των χαρτοφυλακίων με την καλύτερη απόδοση. Η παρούσα εργασία εισάγει μια καινοτόμο προσέγγιση που ασχολείται με την αβεβαιότητα των παραμέτρων σε ένα μοντέλο μαθηματικού προγραμματισμού πολλαπλών στόχων (MOIP) και τελικά συγκλίνει στο τελικό σύνολο Pareto. Χρησιμοποιεί την κύρια ιδέα

της επαναληπτικής τριχοτομικής προσέγγισης (Iterative Trichotomic Approach-ITA, Mavrotas and Pechak 2013). Το ITA σχεδιάστηκε αρχικά προβλήματα επιλογής χαρτοφυλακίου έργων ενός στόχου. Παρέχει ακόμα πληροφορίες σχετικά με το βαθμό βεβαιότητας για την συμπερίληψη ή την απόρριψη συγκεκριμένου έργου στο τελικό χαρτοφυλάκιο. Η έκδοση του ITA που περιγράφεται στην παρούσα εργασία ασχολείται με τα προβλήματα επιλογής χαρτοφυλακίου έργων πολλαπλών στόχων και παρέχει πληροφορίες σχετικά με το βαθμό βεβαιότητας για την συμπερίληψη συγκεκριμένου χαρτοφυλακίου στο τελικό σύνολο Pareto, διευρύνοντας έτσι την περιοχή εφαρμογής του από το επίπεδο του έργου στο επίπεδο του χαρτοφυλακίου. Αυτού του είδους οι πληροφορίες είναι ουσιαστικές για τον υπεύθυνο λήψης αποφάσεων ώστε να είναι πιο σίγουρος κατά την επιλογή χαρτοφυλακίων έργων όσον αφορά τη συμμετοχή τους στο βέλτιστο σύνολο Pareto. Από αυτή την άποψη, έχει ένα επαρκές εργαλείο για να μετρήσει την ευρωστία του τελικού συνόλου Pareto καθώς και την ευρωστία συγκεκριμένων χαρτοφυλακίων που εμφανίζονται στο τελικό σύνολο Pareto.

### 2.6.1 Μέθοδος ITA

Η επαναληπτική τριχοτομική προσέγγιση (ITA) όπως προείπαμε χρησιμοποιείται στην έρευνα με στόχο να βρεθεί το βέλτιστο σύνολο από χαρτοφυλάκια τα οποία έχουν την μεγαλύτερη δυνατή καθαρή παρούσα αξία (ΚΠΑ-NPV) αλλά και τον μεγαλύτερο δυνατό δείκτη ECCR που αφορά την εταιρική κοινωνική ευθύνη.

Αρχικά, Ο όρος "τριχοτομική" αναφέρεται στον διαχωρισμό ενός συνόλου σε τρία μέρη. Στο πλαίσιο αυτό, η προτεινόμενη διαδικασία λήψης αποφάσεων ITA βασίζεται στο γεγονός ότι τα έργα κατανέμονται σε μία από τρεις ομάδες βάσει της απόδοσής τους και του τρέχοντος βαθμού αβεβαιότητας. Ο βαθμός αβεβαιότητας ενσωματώνεται χρησιμοποιώντας κατανομές πιθανοτήτων για τους συντελεστές της αντικειμενικής συνάρτησης, οι οποίοι συνήθως εκφράζουν την απόδοση των έργων. Οι επιδόσεις των μεμονωμένων έργων συνοψίζονται στην αντικειμενική συνάρτηση, η οποία είναι ο κινητήριος μοχλός της βελτιστοποίησης. Επιπλέον, εκτελείται προσομοίωση Monte Carlo χρησιμοποιώντας δειγματοληψία από αυτές τις κατανομές. Στη συνέχεια, με τους συντελεστές της αντικειμενικής συνάρτησης που λάβαμε από την δειγματοληψία, επιλύεται το πρόβλημα γραμμικού προγραμματισμού και οδηγεί σε ένα βέλτιστο χαρτοφυλάκιο. Αυτό το ζεύγος δειγματοληψίας και βελτιστοποίησης αποτελεί ουσιαστικά τον πυρήνα των υπολογισμών. Ο αριθμός των προσομοιώσεων Monte Carlo έχει οριστεί σε ένα μεγάλο αριθμό  $T$  (π.χ.  $T = 1000$ ) που σημαίνει ότι ο κύκλος δειγματοληψίας και βελτιστοποίησης εκτελείται  $T$  φορές. Η έξοδος αυτής της διαδικασίας είναι 1000 βέλτιστα χαρτοφυλάκια βασισμένα στη δειγματοληψία των παραμέτρων του μοντέλου (σε αυτή την περίπτωση οι επιδόσεις των έργων).

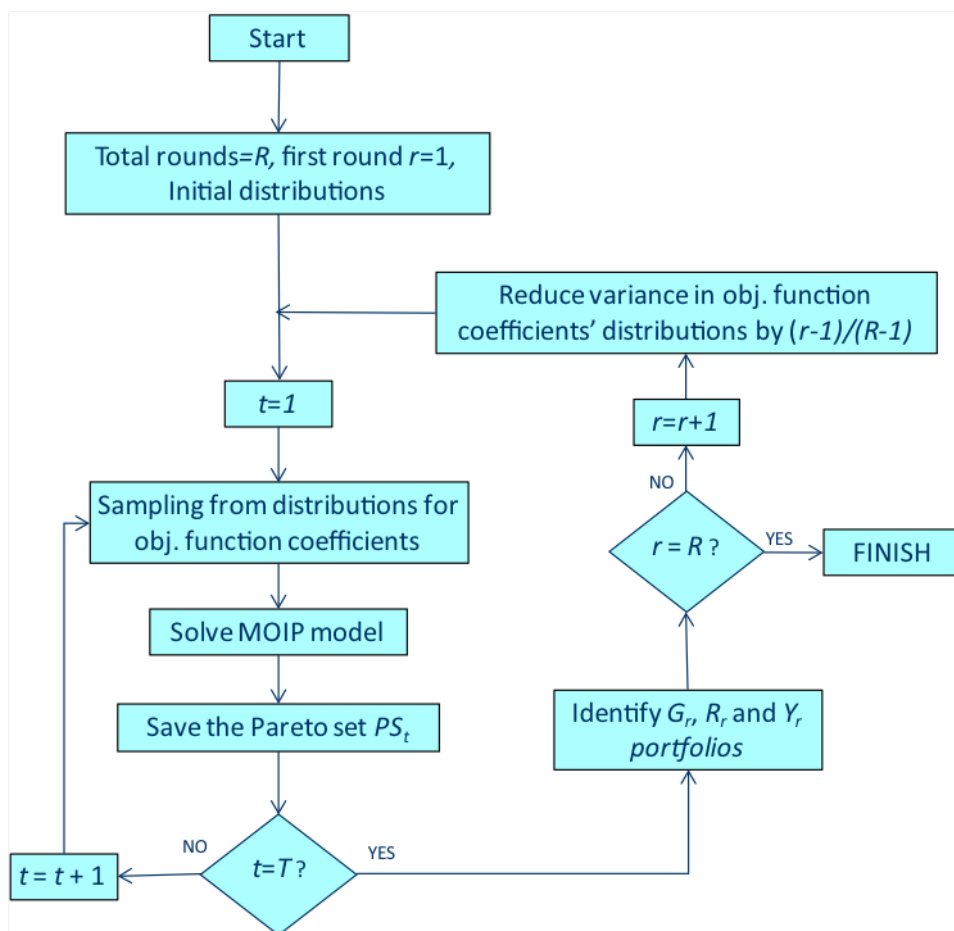
Τελικά, το σύνολο των έργων που έχουν παραχθεί από την παραπάνω διαδικασία χωρίζεται σε τρία υποσύνολα (κατηγορίες): **πράσινα** έργα που υπάρχουν στο τελικό

χαρτοφυλάκιο υπό οποιεσδήποτε συνθήκες (δηλαδή σε όλες τις προσομοιώσεις του Monte Carlo για διάφορα επίπεδα αβεβαιότητας), **κόκκινα** έργα που απουσιάζουν από το τελικό χαρτοφυλάκιο υπό οποιεσδήποτε συνθήκες για αβεβαιότητα και **γκρίζα** έργα που περιλαμβάνονται σε μέρος των τελικών χαρτοφυλακίων.

Η ΙΤΑ λέγεται ακόμα επαναληπτική επειδή η διαδικασία αναπτύσσεται σε μια σειρά υπολογιστικών κύκλων. Ένας προκαθορισμένος αριθμός κύκλων υπολογισμού ορίζεται από την αρχή(T) και κάθε γύρος τροφοδοτεί τις επόμενες μέχρι να επιτευχθεί σύγκλιση προς το τελικό χαρτοφυλάκιο. Από κύκλο σε κύκλο, η αβεβαιότητα μειώνεται για τα γκρίζα έργα και ορισμένα από αυτά αναγκάζονται να γίνουν είτε πράσινα είτε κόκκινα. Η μείωση της αβεβαιότητας μπορεί να πραγματοποιηθεί είτε με τη συγκέντρωση μεγαλύτερης πληροφορίας είτε με αυτόματη ομοιόμορφη μείωση των κατανομών πιθανότητας των γκρίζων έργων.

Η ιδέα πίσω από την τριχοτομική προσέγγιση είναι ότι ένας υπεύθυνος λήψης αποφάσεων μπορεί να επικεντρωθεί σε έργα που διακυβεύονται από αβεβαιότητα. Τα έργα τα οποία είναι σίγουρα στο βέλτιστο σύνολο καθορίζονται από τον αλγόριθμο(πράσινα), όπως επίσης και αυτά τα οποία είναι σίγουρα έξω(κόκκινα) και έτσι η προσοχή μπορεί να μετατοπιστεί σε "διφορούμενα" έργα (γκρίζα). Η μέθοδος παρέχει ποσοτικές και ποιοτικές πληροφορίες που δεν μπορούν να αποκτηθούν χρησιμοποιώντας π.χ. Τις αναμενόμενες τιμές των κατανομών. Ένα σημαντικό πλεονέκτημα είναι το γεγονός ότι ο υπεύθυνος αποφάσεων λαμβάνει στο τέλος του αλγόριθμου ένα σύνολο από βέλτιστα χαρτοφυλάκια και στη συνέχεια κρίνει αυτός ποια θα ακολουθήσει για τις επενδύσεις του. Αυτές οι μέθοδοι ονομάζονται μέθοδοι "a posteriori" στη δημοφιλή ορολογία των Hwang and Masud (1979) για μεθόδους βελτιστοποίησης πολλαπλών στόχων (πρώτα δημιουργείται το σύνολο Pareto, εξετάζεται και στη συνέχεια επιλέγει το προτιμώμενο χαρτοφυλάκιο Pareto).

Στο σημείο αυτό παρουσιάζουμε το διάγραμμα ροής που περιγράφει την μέθοδο:



Εικόνα 5- Διάγραμμα ροής Τριχοτομικής Μεθόδου

Παρακάτω δίνεται συνοπτικά η διαδικασία που ακολουθεί η μέθοδος της παρούσας έρευνας:

- 1) Συγκέντρωση πληροφοριών για τα χαρτοφυλάκια που μας ενδιαφέρουν. Καθορισμός αρχικών κατανομών πιθανοτήτων για τους συντελεστές των αντικειμενικών συναρτήσεων. Καθορισμός αριθμού κύκλων υπολογισμού(αριθμός προσομοιώσεων Monte Carlo, T).
- 2) Εκτέλεση πρώτου υπολογιστικού κύκλου στον οποίο παράγονται T υποψήφια σύνολα Pareto(μέσω του αλγορίθμου AUGMECON2, Mavrotas and Florios 2013) τα οποία μπορούν να είναι στο τελικό βέλτιστο σύνολο . Μετά το τέλος του τα χαρτοφυλάκια των παραπάνω συνόλων Pareto είτε μπαίνουν στο πράσινο σύνολο (green set-G) αν αυτά είναι παρόντα σε όλα τα (T) Pareto Σύνολα που δημιουργήθηκαν, είτε στο γκρι σύνολο(grey set-Y) αν αυτά είναι παρόντα σε μερικά από τα σύνολα που παρήχθησαν.
- 3) Επαναληπτική εκτέλεση του αλγορίθμου, μέχρι το όριο των T υπολογιστικών κύκλων με ταυτόχρονη μείωση της αβεβαιότητας μέσω συρρίκνωσης των κατανομών πιθανοτήτων για τους συντελεστές για να επιτευχθεί η σύγκλιση. Κατ' αυτό τον τρόπο τα χαρτοφυλάκια που ανήκουν στο γκρι σύνολο υποχρεώνονται να μουν είτε στο πράσινο είτε στο κόκκινο σύνολο(μπορούμε

να θέσουμε αριθμό κύκλων τέτοιον ώστε να μην υπάρχουν στο τέλος έργα τα οποία ανήκουν στο γκρι σύνολο). Το κόκκινο σύνολο συμπεραίνεται έμμεσα ως τα αρχικά γκρι χαρτοφυλάκια τα οποία στον συγκεκριμένο κύκλο που βρισκόμαστε δεν ανήκουν σε κανένα σύνολο Pareto. Άρα εάν είμαστε στον  $t$  κύκλο και έχουν σχηματιστεί  $T$  σύνολα Pareto (PS) τότε δίνουμε τα ενδεχόμενα για το ένα χαρτοφυλάκιο  $p$ :

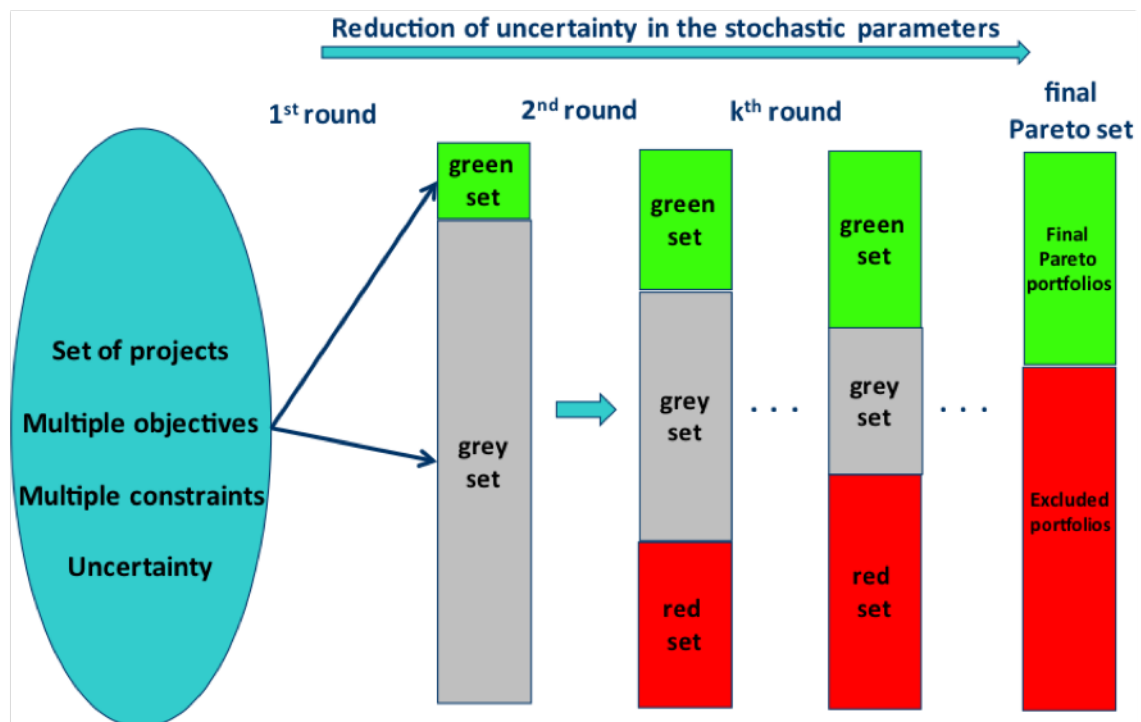
$$p \in G : \forall t \in \{1, \dots, T\}, \quad p \in PS_t$$

$$p \in R : \forall t \in \{1, \dots, T\}, \quad p \notin PS_t$$

$$p \in Y : \exists t \in \{1, \dots, T\}, \quad p \in PS_t$$

- 4) Καθορισμός τελικού συνόλου από βέλτιστα Pareto σύνολα που αποτελούνται μόνο από πράσινα χαρτοφυλάκια.

Παρακάτω δείχνεται και σχηματικά η παραπάνω διαδικασία:



Εικόνα 6- Γράφημα επαναληπτικού αλγορίθμου τριχοτομικής μεθόδου

Σημειώνεται ότι για να έχουμε σύγκλιση της μεθόδου εκτός από τη δυνατότητα να θέσουμε ένα ικανό αριθμό  $T$  για εξάλειψη του γκρι συνόλου μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε και κάποια όρια-κατώφλια(thresholds) για να χαλαρώσουμε τη συμμετοχή στο πράσινο σύνολο. Για παράδειγμα μπορούμε να θέσουμε όριο συμμετοχής στο πράσινο σύνολο 95%, δηλαδή ένα χαρτοφυλάκιο θα ανήκει στο

πράσινο σύνολο αν βρίσκεται στο 95% των παραγόμενων συνόλων Pareto.

### 2.6.2 Ανάλυση Ευρωστίας

Τέλος μπορούμε να δώσουμε μέτρα τα οποία να δείχνουν την ευρωστία της μεθόδου, δηλαδή το κατά πόσο βέβαιοι είμαστε για τη συμμετοχή ενός χαρτοφυλακίου στο τελικό σύνολο Pareto, όσο και για την ευρωστία του συνολικού Pareto.

Όσον αφορά τη βεβαιότητα συμμετοχής ενός συγκεκριμένου χαρτοφυλακίου στο σύνολο Pareto αρκεί να κάνουμε την ακόλουθη σκέψη. Σε κάθε υπολογιστικό κύκλο η αβεβαιότητα ελαττώνεται, αφού περιορίζουμε τις κατανομές πιθανότητας για τους συντελεστές των εξισώσεων. Επομένως, όσο πιο νωρίς μπαίνει ένα χαρτοφυλάκιο στο πράσινο σύνολο, τόσο πιο βέβαιοι είμαστε για τη συμμετοχή του στο τελικό σύνολο Pareto αφού στα αρχικά στάδια η αβεβαιότητα είναι μεγαλύτερη. Ορίζεται λοιπόν ο Βαθμός Ευστάθειας για ένα χαρτοφυλάκιο (Robustness Degree- $RD_p$ ) ως εξής:

$$RD_p = \frac{R - r_p}{R}$$

Όπου  $R$  ο αριθμός των υπολογιστικών κύκλων και  $r_p$  ο υπολογιστικός κύκλος στον οποίο το χαρτοφυλάκιο  $p$  μπήκε στο πράσινο σύνολο.

Όπως φαίνεται από την παραπάνω σχέση ο βαθμός αβεβαιότητας μπορεί να πάρει τιμές από 0 έως 1, ανάλογα με την τιμή του υπολογιστικού κύκλου που το χαρτοφυλάκιο μπήκε στο πράσινο σύνολο. Ο κανόνας είναι ότι όσο πιο νωρίς έχει μπει ένα χαρτοφυλάκιο στο πράσινο σύνολο τόσο θα πλησιάζει ο βαθμός αβεβαιότητας στη μονάδα κάτι που είναι και το θεμιτό. Γενικά δηλαδή όσο πιο κοντά στη μονάδα είναι ο βαθμός τόσο πιο εύρωστο είναι το χαρτοφυλάκιο, διότι ανταποκρίνεται και σε μεγάλους βαθμούς αβεβαιότητας.

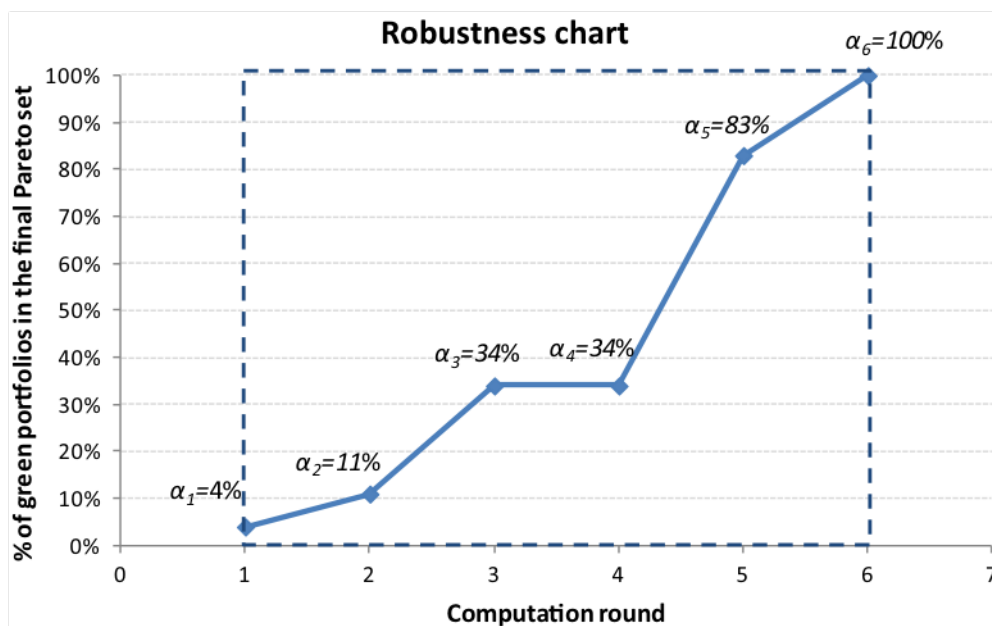
Έχουμε επίσης αναπτύξει ένα μέτρο ευρωστίας για το τελικό σύνολο Pareto σύμφωνα με το πόσο νωρίς στη διαδικασία λήψης αποφάσεων τα Pareto βέλτιστα χαρτοφυλάκιο εισέρχονται στο πράσινο σετ. Όσο περισσότερα πράσινα χαρτοφυλάκια έχουμε από τους πρώτους γύρους (δηλαδή όταν έχουμε μεγαλύτερη αβεβαιότητα), τόσο πιο ισχυρό είναι το τελικό σύνολο Pareto. Αντίθετα, αν η πλειοψηφία των πράσινων χαρτοφυλακίων αναγνωρίζεται στους τελευταίους γύρους, σημαίνει ότι το τελικό σύνολο Pareto δεν είναι τόσο σταθερό.

Για την ευρωστία του τελικού συνόλου Pareto, εισάγουμε τον Δείκτη Ευστάθειας (Robustness Index-RI). Για να υπολογίσουμε το RI, πρέπει να σχεδιάσουμε το λεγόμενο Διάγραμμα Ευστάθειας (Robustness Chart) όπου τα ποσοστά των πράσινων χαρτοφυλακίων του τελικού συνόλου Pareto, που έχουν ήδη εισαχθεί στον  $r$  υπολογιστικό κύκλο (ποσοστό  $a_r$ ) σχεδιάζονται ως συνάρτηση των υπολογιστικών κύκλων.

Είναι φανερό ότι εμείς επιθυμούμε μεγάλο ποσοστό πράσινων χαρτοφυλακίων του τελικού Pareto συνόλου, να είναι ήδη στο πράσινο σύνολο από τους πρώτους υπολογιστικούς κύκλους διότι αυτό σημαίνει ότι περισσότερα χαρτοφυλάκια του τελικού συνόλου λειτουργούν κάτω από μεγάλες τιμές αβεβαιότητας(πρώτοι υπολογιστικοί κύκλοι).

Ο δείκτης ευστάθειας ορίζεται ως το κλάσμα με αριθμητή το εμβαδόν του χωρίου κάτω από τη συνάρτηση του διαγράμματος ευστάθειας και παρονομαστή το εμβαδόν του ορθογωνίου που περικλείεται από διακεκομμένες γραμμές και εκφράζει τη μέγιστη ευρωστία για το σύνολο Pareto (RI=1 ή 100%). Αυτό σημαίνει ότι το 100% των χαρτοφυλακίων του τελικού Pareto συνόλου εισήλθαν στο πράσινο σύνολο τον πρώτο υπολογιστικό κύκλο, το οποίο είναι και το βέλτιστο σενάριο αφού εκεί υπάρχει η μεγαλύτερη αβεβαιότητα.

Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται επακριβώς πώς σχεδιάζεται η καμπύλη ευστάθειας και πώς στη συνέχεια υπολογίζεται ο εν λόγω δείκτης για μια εφαρμογή του αλγορίθμου με R=6 υπολογιστικούς κύκλους.



Εικόνα 7- Γραφική Παράσταση Δείκτη Ευστάθειας

Ο υπολογισμός του Δείκτη Ευστάθειας RI γίνεται ως εξής:



$$RI = \left( \frac{a_1 + a_2}{2} + \frac{a_2 + a_3}{2} + \dots + \frac{a_{R-1} + a_R}{2} \right) / (R - 1)$$

$$RI = \left[ \frac{a_1}{2} + \sum_{r=2}^{R-1} a_r + \frac{a_R}{2} \right] / (R - 1)$$

$$RI = \left[ \frac{a_1}{2} + \sum_{r=2}^{R-1} a_r + \frac{1}{2} \right] / (R - 1)$$

Σημειώνεται ότι η διαίρεση γίνεται με το R-1 και όχι με το R διότι το διάγραμμα ξεκινά από το 0.

Για το συγκεκριμένο σχήμα το αποτέλεσμα που προκύπτει είναι:

$$RI = \left[ \frac{0.04}{2} + 0.11 + 0.34 + 0.34 + 0.83 + \frac{1}{2} \right] / 5 = 42.8 \%$$



# 3

## Βιβλιογραφική Ανασκόπηση Ανάλυσης Χαρτοφυλακίου σε θέματα κλιματικών πολιτικών

### 3.1 Βιβλιογραφική Επισκόπηση

Σύμφωνα με τον Markowitz (1952), η επιλογή του βέλτιστου χαρτοφυλακίου περιλαμβάνει την δημιουργία πιθανοτικών εκτιμήσεων της μελλοντικής συμπεριφοράς των διαθέσιμων επιλογών, στη συνέχεια τον καθορισμό ενός αποδοτικού συνόλου από χαρτοφυλάκια μελετώντας τις παραπάνω εκτιμήσεις και τελικά την επιλογή ενός χαρτοφυλακίου το οποίο ταιριάζει στις προτιμήσεις του επενδυτή. Παρόλο που η ανάλυση χαρτοφυλακίου αντιστοιχεί στο δεύτερο στάδιο της παραπάνω διαδικασίας (Vörös, 1986), η τοποθέτηση ενός προβλήματος κλιματικής πολιτικής στο παραπάνω πλαίσιο απαιτεί συνήθως επιπρόσθετες προσπάθειες και στα 3 στάδια. Ο παραπάνω είναι ένας από τους βασικούς λόγους που η ανάλυση χαρτοφυλακίου, παρόλο που έχει θεμελιωθεί εδώ και πολλά χρόνια, δεν έχει ακόμα χρησιμοποιηθεί ουσιαστικά ως εργαλείο υποστήριξης κλιματικής πολιτικής. Παρόλα αυτά, βρέθηκαν 47 σχετικές βιβλιογραφίες οι οποίες αντιμετωπίζουν προβλήματα στον κλάδο της κλιματικής πολιτικής ή θέματα στενά συνδεδεμένα με την άμβλυνση της κλιματικής αλλαγής και πολιτική προσαρμογής.

Εξαιτίας του γεγονότος ότι οι ενεργειακές επενδύσεις απασχολούσαν την έρευνα πολύ πριν την κλιματική πολιτική, παρατηρούμε ότι η επιλογή ενός επενδυτικού χαρτοφυλακίου για να βελτιστοποιήσουμε το μίγμα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας (π.χ. Bar-Lev and Kratz, 1976, ή Zhu and Fan, 2010) ή το ενεργειακό μίγμα μια χώρας ή περιοχής (π.χ. Pugh et al., 2011) φαίνεται να απορροφά σχεδόν την βιβλιογραφία που αφορά την χρησιμοποίηση χαρτοφυλακίου για θέματα κλιματικής πολιτικής. Από τις παραπάνω μελέτες, κάποιες εστίασαν σε αγορές ηλεκτρικής ενέργειας (π.χ. Zou and Fuss, 2006; Siddiqui et al., 2016; or Cucchiella et al., 2017). Άλλες έρευνες στόχευσαν στην προώθηση και περαιτέρω επέκταση και διαφοροποίηση ηλεκτρικής παραγωγής με χρήση ανανεώσιμων πηγών, όπως για παράδειγμα φωτοβολταϊκών (Albrecht, 2007 και Awerbuch, 2000), αιολικής ενέργειας (Adabi et al., 2016 και Santos-Alamillos et

al., 2017), και ενέργειας βιομάζας (Lintunen and Uusivuori, 2016). Επιπλέον, το επίκεντρο κάποιων εκ των παραπάνω ερευνών δεν ήταν περιορισμένο μόνο στην ηλεκτρική παραγωγή αλλά περιλάμβαναν και την αποτίμηση των επενδύσεων έρευνας και ανάπτυξης (R&D investments) σε τεχνολογίες ενέργειας (π.χ. Baker and Solak, 2011 και Lemoine et al., 2012), εργαλεία πολιτικής σχετικά με αγοραπωλησία εκπομπών (emissions trading) (π.χ. Aresano et al. 2012 και Flues et al., 2014), ή μέτρα και τεχνολογίες σε τομείς άρρηκτα συνδεδεμένους με τον τομέα της ενέργειας, όπως για παράδειγμα η ενεργειακή επάρκεια-αποδοτικότητα κτιρίων (Westner and Madlener, 2010; and Shakouri et al., 2015) ή τα καύσιμα μεταφοράς (Marrero et al., 2015) και αντίστοιχες τεχνολογίες. Αξίζει να σημειωθεί στο σημείο αυτό, ότι υπάρχουν δύο βασικές προσεγγίσεις στην δημιουργία χαρτοφυλακίου στις αναλύσεις γύρω από την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας: χαρτοφυλάκια με βάση την χωρητικότητα και χαρτοφυλάκια ενέργειας βέβαια, όπως σημειώνει ο Jansen et al. (2008), παρόλο που τα πρώτα είναι πιο κοντινά στην έννοια των στοιχείων χαρτοφυλακίου και για το λόγο αυτό φαίνονται διαισθητικά πιο σωστά, στην πραγματικότητα τα δεύτερα είναι πιο ρεαλιστικά αφού η εγκατεστημένη χωρητικότητα-ισχύς τείνει να μεταβάλλεται μεταξύ χαρτοφυλακίων που πρέπει να καλύπτουν συγκεκριμένη ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας σε μια δεδομένη περίοδο, εξαιτίας αποκλινοσών παραμέτρων χωρητικότητας.

Εκτός από τους Lemoine et al. (2012), οι οποίοι εξετάζουν διαφορετικές επιλογές έρευνας και ανάπτυξης (R&D options) και τα αντίστοιχα εργαλεία πολιτικών με σκοπό ένα δυναμικό χαρτοφυλάκιο μείωσης κόστους, τους Luo and Wu (2016), που εξετάζουν την παγκόσμια αγορά εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα και τους Romejko & Nakano (2017), που εστιάζουν σε οχήματα εναλλακτικού καυσίμου, οι μόνες περιοχές εφαρμογών που έχουν αναλυθεί δίχως την εξέταση του ενεργειακού τομέα είναι η περιβαλλοντική διαχείριση (environmental management) καθώς και ο τομέας γεωργίας και δασοκομίας. Πιο συγκεκριμένα, οι Crowe and Parker (2008) χρησιμοποιούν ανάλυση χαρτοφυλακίου με στόχο την επιλογή ενός βέλτιστου συνόλου από πηγές σπόρων έτσι ώστε να αναγεννηθούν δάση. Ακόμη, οι Mitter et al. (2015) προσπαθούν να ποσοτικοποιήσουν τις συνέπειες της κλιματικής αλλαγής στην γεωργική ευπάθεια (vulnerability) και να δημιουργήσουν έπειτα ευσταθή χαρτοφυλάκια γεωργικής παραγωγής αναλύοντας την επίδραση των πολιτικών γεωργικής προσαρμογής. Οι Seo and Mendelsohn (2007) παρακολουθούν τον τρόπο με τον οποίο οι αγρότες επιλέγουν τα ζώα τους με βάση τον τόπο που βρίσκονται σε διαφορετικές περιοχές της Αφρικής· οι Lintunen and Uusivuori (2016) επίσης ψάχνουν το βέλτιστο χαρτοφυλάκιο πολιτικής μείωσης κόστους για ρύθμιση των ροών άνθρακα των δασών ενώ παράλληλα εξετάζουν την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από βιομάζα. Είναι αξιοπρόσεχτο το γεγονός ότι όλες οι εφαρμογές της ανάλυσης χαρτοφυλακίου στο περιβάλλον εστίαζαν την προσοχή τους στο θέμα του νερού (Marinon et al., 2011; and Buurman & Babovic, 2016) καθώς και στον σχεδιασμό υπόγειων υδάτων, απασχολούμενοι αποκλειστικά με τις συνέπειες προσαρμογής της κλιματικής πολιτικής.

Ανεξαρτήτως περιοχής εφαρμογής, είκοσι από τις παραπάνω έρευνες αναφέρονταν αποκλειστικά στον περιορισμό της κλιματικής αλλαγής με άμεσο τρόπο, στα πλαίσια του πεδίου εφαρμογής τους, χρησιμοποιώντας μια συνάρτηση χρησιμότητας η οποία περιλάμβανε τις εκπομπές ή διαφορετικά αποτιμώντας εργαλεία κλιματικής πολιτικής, μέτρα και επενδύσεις. Οι υπόλοιπες έρευνες εξέταζαν έμμεσα την κλιματική πολιτική περιλαμβάνοντας περιορισμούς τόσο περιβαλλοντικούς όσο και σε σχέση με το κλίμα. Μια διαφορετική αντιμετώπιση ήρθε από τους Pugh et al. (2011) οι οποίοι υιοθέτησαν μια τακτική που λειτουργούσε πάνω σε πολλούς διαφορετικούς τομείς. Συγκεκριμένα έψαξαν ένα βέλτιστο χαρτοφυλάκιο επενδύσεων πάνω στις συγκοινωνίες, τον τομέα των κτιρίων, τη βιομηχανία και τον τομέα της ενέργειας, συμπεριλαμβανομένης της ανανεώσιμης ενέργειας, πυρηνικής ενέργειας και τέλος στην δέσμευση και αποθήκευση άνθρακα.

### 3.2 Ερευνητικό Πεδίο Κλιματικών Πολιτικών

Ο πίνακας 1 παρέχει μια σφαιρική εικόνα των ερευνών πάνω στις κλιματικές πολιτικές στα πλαίσια της βιβλιογραφίας της ανάλυσης χαρτοφυλακίου, δείχνοντας την περιοχή των εφαρμογών τους καθώς και αν αναφέρονται στον μετριασμό της κλιματικής αλλαγής ή προσαρμογής της.

Πίνακας 1- Απεικόνιση των ερευνών σχετικά με την κλιματική πολιτική στην βιβλιογραφία ανάλυσης χαρτοφυλακίου

Συνεισφέροντες	Πεδίο Εφαρμογής								Σχετικά με Την Κλιματική Πολιτική
	Αναβάθμιση Κτιρίων	Σχεδιασμός ηλ. Ενέργειας	Εμπορία Εκπομπών	Ενεργ. E&A	Καθαρή Βιομηχ.	Γεωργία & Δασοκομία	Πράσινες Μεταφορές	Σχεδιασμ. Νερού	
(Adabi et al., 2016)		✓							
(Albrecht, 2007)		✓							
(Allan et al., 2011)		✓							
(Arnesano et al., 2012)		✓	✓						
(Awerbuch & Berger, 2003)		✓							
(Awerbuch et al., 2006)		✓							
(Awerbuch, 2000)		✓							
(Awerbuch, 2006)		✓							
(Baker & Solak, 2011)		✓		✓					Μετριασμός
(Bar-Lev & Kratz, 1976)		✓							
(Barron et al., 2014)		✓		✓					Μετριασμός

Συνεισφέροντες	Πεδίο Εφαρμογής								Σχετικά με Την Κλιματική Πολιτική
	Αναβάθμιση Κτιρίων	Σχεδια- σμός ηλ. Ενέργειας	Εμπορία Εκπομπών	Ενεργ. E&A	Καθαρή Βιομηχ.	Γεωργία & Δασοκομία	Πράσινες Μεταφορές	Σχεδιασμ. Νερού	
(Bhattacharya & Kojima, 2012)		✓							
(Buurman & Babovic, 2016)								✓	Μετριασμός
(Chalvatzis & Rubel, 2015)		✓							
(Crowe & Parker, 2008)						✓			Προσαρμογή
(Cucchiella et al., 2017)		✓							
(Delarue et al., 2011)		✓							
(Flues et al., 2014)		✓	✓						Μετριασμός
(Fuss et al., 2012)		✓							Μετριασμός
(Hua et al., 2015)								✓	Προσαρμογή
(Jansen et al., 2008)		✓							
(Laurikka & Springer, 2003)	✓	✓	✓	✓					Μετριασμός
(Lemoine et al., 2012)				✓					Μετριασμός
(Lintunen & Uusivuori, 2016)		✓				✓			Μετριασμός
(Liu & Wu, 2007)		✓							
(Luo & Wu, 2016)			✓						Μετριασμός
(Marinon et al., 2011)								✓	Προσαρμογή
(Marrero et al., 2015)		✓					✓		
(McLohglin & Bazilian, 2006)		✓							
(Mitter et al., 2015)						✓			Προσαρμογή
(Nazari et al., 2015)		✓							Προσαρμογή
(Pugh et al., 2011)	✓	✓		✓	✓		✓		Μετριασμός
(Romejko & Nakano, 2017)							✓		Μετριασμός
(Roques et al., 2008)		✓							
(Santos-Alamillos et al., 2017)		✓							
(Seo & Mendelsohn, 2007)						✓			Προσαρμογή
(Shakouri et al., 2015)	✓	✓							
(Siddiqui et al., 2016)		✓							
(Springer, 2003)		✓							Μετριασμός

Συνεισφέροντες	Πεδίο Εφαρμογής								Σχετικά με Την Κλιματική Πολιτική
	Αναβάθμιση Κτιρίων	Σχεδια- σμός ηλ. Ενέργειας	Εμπορία Εκπομπών	Ενεργ. E&A	Καθαρή Βιομηχ.	Γεωργία & Δασοκομία	Πράσινες Μεταφορές	Σχεδιασμ. Νερού	
(van Asseldonk & Langeveld, 2007)						✓			Προσαρμογή
(Westner & Madlener, 2010)	✓	✓							
(White, 2007)		✓							
(Zhu & Fan, 2010)		✓							
(Ziegler et al., 2012)		✓							
(Zon & Fuss, 2006)		✓							Μετριάσιμος
Huang & Wu, 2008)		✓							
Muñoz et al., 2009)		✓							

### 3.3 Μεθολογικές Προσεγγίσεις

Παρακάτω παραθέτουμε και τον Πίνακα 2 ο οποίος συγκεντρώνει τις μεθοδολογικές προσεγγίσεις στην ανάλυση χαρτοφυλακίου που χρησιμοποιήθηκαν στην βιβλιογραφία των κλιματικών πολιτικών, καθώς και την φύση των περιοριστικών στοιχείων που μοντελοποιήθηκαν, τις συναρτήσεις χρησιμότητας, τον τύπο των περιορισμών που αυτές οι συναρτήσεις είχαν και τέλος τον τρόπο ποσοτικοποίησης της αβεβαιότητας.

**Πίνακας 2-Γενική εικόνα των: μεθόδων ανάλυσης χαρτοφυλακίου, στοιχείων του χαρτοφυλακίου, αντικειμενικών συναρτήσεων, περιορισμών και μεθόδων υπολογισμού αβεβαιότητας που χρησιμοποιήθηκαν στις έρευνες σχετιζόμενες με κλιματική πολιτική**

Προσεγγίσεις Μοντέλα	Ερευνητές	Περιο- σιακά στοιχεία <sup>1</sup>	Συνάρτηση Χρησιμότητας	Περιορισμοί <sup>2</sup>							Αβεβαιό- τητα
				ECO	ENV	GEO	POL	REG	TECH	TIME	
Black- Litterman Model	(Arnesano et al., 2012)	P	Ελαχιστοποί- ηση κόστους	✓							

<sup>1</sup> F = Οικονομικά Κίνητρα (Financial Incentives), I = Επενδύσεις(Investments), P = Πολιτικές(Policies),

T = Φόροι(Taxes), O = Άλλα(Other)

<sup>2</sup> ECO = Οικονομικοί(Economic), ENV = Περιβαλλοντικοί(Environmental Climate), GEO = Γεωγραφικοί(Geographical),  
POL = Πολιτικοί(Political), REG = Ρυθμιστικοί(Regulatory),

TECH = Τεχνολογικοί(Technological), TIME = Χρονικοί(Time-related)

Προσεγγίσεις Μοντέλα	Ερευνητές	Περιουσιακά στοιχεία <sup>1</sup>	Συνάρτηση Χρησιμότητας	Περιορισμοί <sup>2</sup>						Αβεβαιότητα	
				ECO	ENV	GEO	POL	REG	TECH		TIME
Capital Asset Pricing Model	(Albrecht, 2007)	I	Ελαχιστοποίηση ρίσκου								
	(Marrero et al., 2015)	I; P	Ελαχιστοποίηση κόστους, Ελαχιστοποίηση ρίσκου						✓		
Clay-Clay-Vintage Model	(Zon & Fuss, 2006)	I	Ελαχιστοποίηση κόστους, Ελαχιστοποίηση ρίσκου		✓			✓	✓		
Linear programming	(Lemoine et al., 2012)	P	Ελαχιστοποίηση κόστους		✓						Σενάρια
	(Lintunen & Uusivuori, 2016)	T	Ελαχιστοποίηση κόστους	✓	✓						
	(Romejko & Nakano, 2017)	I	Ελαχιστοποίηση κόστους						✓		
	(Siddiqui et al., 2016)	P	Ελαχιστ. Κοιν. Κόστους	✓				✓			Σενάρια
	(Muñoz et al., 2009)	I	Μεγιστοποίηση Κέρδους; Ελαχιστοποίηση ρίσκου	✓							
Modern Portfolio Theory	(Allan et al., 2011)	I	Ελαχιστοποίηση κόστους, Ελαχιστοποίηση ρίσκου						✓		Σενάρια
	(Awerbuch & Berger, 2003)	P	Ελαχιστοποίηση κόστους	✓				✓			Σενάρια
	(Awerbuch et al., 2006)	I	Μεγιστοποίηση ισχύος; Μεγιστοποίηση Διαφοροποίησης; Ελαχιστοποίηση ρίσκου	✓							
	(Awerbuch, 2006)	P	Ελαχιστοποίηση κόστους				✓	✓	✓		
	(Bar-Lev & Kratz, 1976)	I	Ελαχιστοποίηση κόστους, Ελαχιστοποίηση ρίσκου	✓	✓	✓	✓	✓			
	(Bhattacharya & Kojima, 2012)	F; I	Ελαχιστοποίηση ρίσκου					✓			
	(Chalvatzis & Rubel, 2015)	I	Ελαχιστοποίηση ρίσκου						✓		



Προσεγγίσεις Μοντέλα	Ερευνητές	Περιουσιακά στοιχεία <sup>1</sup>	Συνάρτηση Χρησιμότητας	Περιορισμοί <sup>2</sup>						Αβεβαιότητα	
				ECO	ENV	GEO	POL	REG	TECH		TIME
	(Crowe & Parker, 2008)	O	Ελαχιστοποίηση ρίσκου	✓	✓						
	(Cucchiella et al., 2017)	I	Μεγιστοποίηση Κέρδους; Ελαχιστοποίηση ρίσκου	✓				✓			
	(Delarue et al., 2011)	I	Ελαχιστοποίηση κόστους					✓		✓	
	(Hua et al., 2015)	I	Ελαχιστοποίηση ρίσκου	✓							Σενάρια
	(Jansen et al., 2008)	I	Ελαχιστοποίηση κόστους	✓	✓						
	(Liu & Wu, 2007)	I	Ελαχιστοποίηση ρίσκου								
	(Luo & Wu, 2016)	I; P	Μεγιστοποίηση Κέρδους; Ελαχιστοποίηση ρίσκου	✓							Σενάρια; CVaR
	(Marinon et al., 2011)	O	Ελαχιστοποίηση κόστους	✓							Σενάρια
	(Marrero et al., 2015)	I; P	Ελαχιστοποίηση κόστους, Ελαχιστοποίηση ρίσκου						✓		
	(McLohglin & Bazilian, 2006)	P	Ελαχιστοποίηση κόστους						✓		
	(Mitter et al., 2015)	P	Μεγιστοποίηση Κέρδους			✓					Σενάρια
	(Nazari et al., 2015)	I; P	Ελαχιστοποίηση κόστους						✓		CVaR
	(Roques et al., 2008)	F; I	Μεγιστοποίηση Κέρδους								Monte Carlo
	(Santos-Alamillos et al., 2017)	I	Ελαχιστοποίηση ρίσκου						✓	✓	Σενάρια
	(Shakouri et al., 2015)	I	Μεγιστοποίηση ισχύος; Μεγιστοποίηση Κέρδους; Ελαχιστοποίηση ρίσκου			✓					
	(van Asseldonk & Langeveld, 2007)	O	Μεγιστοποίηση Παραγωγής		✓	✓					Σενάρια
	(Westner & Madlener, 2010)	I; P	Μεγιστοποίηση Κέρδους, Ελαχιστοποίηση ρίσκου					✓	✓		Monte Carlo
	(White, 2007)	I	Ελαχιστοποίηση κόστους, Ελαχιστοποίηση ρίσκου		✓				✓		

Προσεγγίσεις Μοντέλα	Ερευνητές	Περιουσιακά στοιχεία <sup>1</sup>	Συνάρτηση Χρησιμότητας	Περιορισμοί <sup>2</sup>						Αβεβαιότητα	
				ECO	ENV	GEO	POL	REG	TECH		TIME
	(Zhu & Fan, 2010)	I; T	Ελαχιστοποίηση κόστους		✓						Σενάρια
	Huang & Wu, 2008)	I	Ελαχιστοποίηση κόστους, Ελαχιστοποίηση ρίσκου					✓	✓		
Modified Artificial Bee Colony	(Adabi et al., 2016)	I	Ελαχιστοποίηση ρίσκου					✓			
Multi-Criteria Diversity Analysis	(Awerbuch, 2006)	P	Ελαχιστοποίηση κόστους				✓	✓	✓		
Multinomial Logit Model	(Seo & Mendelsohn, 2007)	I	Μεγιστοποίηση Κέρδους	✓	✓						Σενάρια
Quadratic programming	(Bar-Lev & Kratz, 1976)	I	Ελαχιστοποίηση κόστους, Ελαχιστοποίηση ρίσκου	✓	✓	✓	✓	✓			
	(Liu & Wu, 2007)	I	Μεγιστοποίηση Κέρδους; Ελαχιστοποίηση ρίσκου								
Random Walk Theory	(Ziegler et al., 2012)	I	Μεγιστοποίηση Κέρδους; Ελαχιστοποίηση ρίσκου						✓		Cholesky decomposition
Real Options Analysis	(Buurman & Babovic, 2016)	I; P	Ελαχιστοποίηση κόστους	✓							
	(Fuss et al., 2012)	I	Ελαχιστοποίηση κόστους							✓	Σενάρια; Monte Carlo; CVaR
	(Nazari et al., 2015)	I; P	Ελαχιστοποίηση ρίσκου						✓		CVaR
			Ελαχιστοποίηση κόστους								
Stochastic programming	(Baker & Solak, 2011)	I	Ελαχιστοποίηση κόστους	✓							
	(Flues et al., 2014)	I	Ελαχιστοποίηση κόστους					✓			Πιθανότητες
Other	(Awerbuch, 2000)	I; T	Μεγιστοποίηση Κέρδους	✓							

Προσεγγίσεις Μοντέλα	Ερευνητές	Περιο-σιακά στοιχεία <sup>1</sup>	Συνάρτηση Χρησιμότητας	Περιορισμοί <sup>2</sup>							Αβεβαιότητα	
				ECO	ENV	GEO	POL	REG	TECH	TIME		
	(Barron et al., 2014)	I	Ελαχιστ. Κοιν. Κόστους; Βελτιστοποίηση Προϋπολογισμού	✓			✓					
	(Laurikka & Springer, 2003)	I	Ελαχιστοποίηση Εκπομπών	✓								
	(Pugh et al., 2011)	I	Ελαχιστοποίηση κόστους	✓	✓						✓	Σενάρια; Monte Carlo

Όπως παρατηρούμε από τον Πίνακα 2, οι περισσότερες έρευνες ενστερνίζονται την θεωρία χαρτοφυλακίου όπως αυτή διατυπώθηκε αρχικά από τον Markowitz: Σύγχρονη Θεωρία Χαρτοφυλακίου (Modern Portfolio Theory) ή καλύτερα Ανάλυση Μέσης Τιμής-Διακύμανσης (Markowitz, 1952). Οι μελέτες οι οποίες δεν ακολουθούν την πεπατημένη όσον αφορά τις προσεγγίσεις της ανάλυσης χαρτοφυλακίου σε θέματα κλιματικής πολιτικής χρησιμοποιούν: το μοντέλο Black-Litterman για βελτιστοποίηση χαρτοφυλακίου σε παγκόσμια κλίμακα (Black and Litterman, 1992), το Clay-Clay Vintage Model (Den Hartog and Tjan, 1980), το Real Options Analysis Framework (Mun, 2002), την θεωρία Τυχαίου Περιπάτου- Random Walk Theory (Cootner, 1964) καθώς και το Capital Asset Pricing Model (CAPM) (Sharpe, 1964; and Lintner, 1965). Στις παραπάνω έρευνες πολλοί ερευνητές χρησιμοποίησαν ένα απλοϊκό μοντέλο γραμμικού προγραμματισμού, όπως για παράδειγμα οι Muñoz et al. (2009) οι οποίοι δημιούργησαν ένα γραμμικό σύστημα εξισώσεων και αποτίμησαν την βασιζόμενη σε ανακυκλώσιμα παραγωγή ενέργειας των επενδυτικών χαρτοφυλακίων σύμφωνα με την εσωτερική απόδοση (Internal Rate of Return-IRR) αλλά και τον δείκτη του Sharpe ώστε να υπολογίσουν τις αντίστοιχες επιδόσεις μαζί με το αντίστοιχο ρίσκο· άλλοι ερευνητές χρησιμοποίησαν μη γραμμικό τετραγωνικό προγραμματισμό (Liu and Wu, 2007). Βέβαια εκτός από τις πλέον διαδεδομένες μεθοδολογίες για βελτιστοποίηση χαρτοφυλακίου, ορισμένοι ερευνητές χρησιμοποίησαν διαφορετικές προσεγγίσεις στην κατανομή των στοιχείων ενεργητικού τους σε βέλτιστα χαρτοφυλάκια. Για παράδειγμα, οι Barron et al. (2014) σύγκριναν ένα μοντέλο με περιορισμό στο budget το οποίο χρησιμοποιείται για την ελαχιστοποίηση του κοινωνικού κόστους και δημιουργεί ένα βέλτιστο R&D χαρτοφυλάκιο, με ένα άλλο μοντέλο δύο σταδίων το οποίο όχι μόνο διανέμει το budget βέλτιστα, αλλά επιπλέον με βάση την χωρητικότητα καθορίζει το απαραίτητο ύψος του R&D budget που είναι απαραίτητο. Τέλος οι Shakouri et al. (2015), πρότειναν ένα επενδυτικό μοντέλο που αφορά την κοινωνία, βασισμένο στην ανάλυση χαρτοφυλακίου, για να μπορέσουν συστηματικά να υπολογίσουν και να διαχειριστούν την ωριαία μεταβλητότητα της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας (hourly volatility in electricity output).

Μια πολύ σημαντική διάσταση της ανάλυσης χαρτοφυλακίου, που πιθανώς εμποδίζει την περαιτέρω διάδοσή της στον τομέα του προβλήματος της κλιματικής πολιτικής, είναι ο εκ των προτέρων προσδιορισμός των περιουσιακών στοιχείων. Όπως σημειώνει ο Liu (1999), τα περιουσιακά στοιχεία (assets) είναι τυχαίες μεταβλητές με κατανομή πιθανότητας πάνω στις πιθανές αποδόσεις τους, ένας γραμμικός συνδυασμός των οποίων δημιουργεί ένα χαρτοφυλάκιο. Εξαιτίας της περιορισμένης δυνατότητας να χαρακτηριστεί ένα εργαλείο κλιματικής πολιτικής περιουσιακό στοιχείο, οι περισσότερες εφαρμογές ανάλυσης χαρτοφυλακίου στον τομέα υποστήριξης της κλιματικής πολιτικής αναμένεται να επικεντρωθούν στην αξιολόγηση των επενδύσεων αντί άλλων μέτρων που σχετίζονται με την πολιτική. Έτσι καταλαβαίνουμε για ποιο λόγο τα προβλήματα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας συνθέτουν τη συντριπτική πλειονότητα αυτών εφαρμογών. Εντούτοις, μερικές μελέτες επικεντρώθηκαν επίσης σε μη επενδυτικά περιουσιακά στοιχεία (όπως οι σταθμοί ηλεκτροπαραγωγής και τεχνολογίες), όπως τα οικονομικά κίνητρα (π.χ. κυβερνητικές συμβάσεις στο Roques et al., 2008 και επιδοτήσεις στο Bhattacharya και Kojima, 2012), φόροι εκπομπών άνθρακα (Awerbuch, 2000; Zhu and Fan, 2010; and Lintunen & Uusivuori, 2016), τα πρότυπα ανανεώσιμων χαρτοφυλακίων καθώς και τα συστήματα cap-and-trade. Τέλος άλλοι ερευνητές στόχευσαν στην βελτιστοποίηση πηγών σπόρων και καλλιεργητικών αποδόσεων στις γεωργικές και δασοκομικές μελέτες (Parker, 2008 ή van Asseldonk & Langeveld, 2007).

Παρόλα αυτά το πιο κεντρικό κομμάτι της ανάλυσης χαρτοφυλακίου δεν είναι άλλο από το δεύτερο στάδιο της επιλογής χαρτοφυλακίου δηλαδή την μοντελοποίηση του προβλήματος. Το στάδιο αυτό περιλαμβάνει την εύρεση της αντικειμενικής συνάρτησης (ή συνάρτησης χρησιμότητας), δηλαδή της συνάρτησης που πρέπει να βελτιστοποιήσουμε (μεγιστοποίηση ή ελαχιστοποίηση) έτσι ώστε να μπορέσουμε να βρούμε το σύνολο βέλτιστων χαρτοφυλακίων καθώς και τους περιορισμούς στους οποίους η συνάρτηση αυτή υπόκειται. Η συντριπτική πλειοψηφία των ερευνών της βιβλιογραφίας που εξετάστηκαν κάνουν χρήση μεθοδολογικών προσεγγίσεων που χρησιμοποιούν είτε συνάρτηση ελαχιστοποίησης του κόστους είτε συνάρτηση ελαχιστοποίησης ρίσκου, αν και ένας μεγάλος αριθμός από αυτούς χρησιμοποιεί περισσότερες από μία συναρτήσεις χρησιμότητας σε διαφορετικά στάδια της μεθοδολογίας τους. Λιγότερες εφαρμογές στοχεύουν στη μεγιστοποίηση του κέρδους αντί της ελαχιστοποίησης του κόστους. Μερικοί ερευνητές υποδεικνύουν ότι η μεγιστοποίηση της κέρδους είναι η ίδια με την αντίστροφη διαδικασία της ελαχιστοποίησης του κόστους (π.χ. Awerbuch και Berger, 2003), ενώ άλλοι προσδιορίζουν αυτά τα δύο ανόμοια αν καθοριστούν διεξοδικά (Jansen et al., 2006). Οι εξαιρέσεις σε αυτές τις συναρτήσεις χρησιμότητας μπορούν να βρεθούν στη μεγιστοποίηση της ικανότητας (π.χ. Shakouri et al., 2015) σε συνδυασμό με τη μεγιστοποίηση της διαφοροποίησης (Awerbuch et al., 2006), βελτιστοποίηση του προϋπολογισμού (στο συνολικό μοντέλο βελτιστοποίησης, Barron et al., 2014), η άμεση ελαχιστοποίηση των εκπομπών (Laurikka & Springer, 2003) ή ακόμη και η μεγιστοποίηση της γεωργικής καλλιέργειας (van Asseldonk & Langeveld, 2007). Όσον αφορά τους περιορισμούς, αν και εντοπίστηκαν επτά διαφορετικές κατηγορίες

περιορισμών (δηλαδή οικονομικοί ή οικονομικοί, περιβαλλοντικοί ή κλιματολογικοί, γεωγραφικοί, πολιτικοί, ρυθμιστικοί ή πολιτικοί, τεχνολογικοί και χρονικοί), φαινόταν να διαφέρουν αρκετά. Οι συνηθέστερες περιλάμβαναν περιορισμούς του προϋπολογισμού ή της αγοράς (market constraints), ανώτερα όρια των τεχνολογικών μεριδίων σε ενεργειακά μείγματα, περιορισμούς εκπομπών, περιορισμοί που αντλούνται από τις οδηγίες της ΕΕ και τις εθνικές πολιτικές, χρονικούς ορίζοντες και περιορισμούς απόστασης.

Τέλος, ένα σημαντικό χαρακτηριστικό της ανάλυσης χαρτοφυλακίου - και ίσως εκείνο με τις υψηλότερες επιπτώσεις για την κλιματική αλλαγή και τη χάραξη πολιτικής - συνδέεται με την εγγενή ικανότητά της να αντιμετωπίζει κινδύνους και αβεβαιότητες. Από την θεμελίωσή της από τον Markowitz και έπειτα, η ελαχιστοποίηση του ρίσκου είναι εγγενής στον αλγόριθμο βελτιστοποίησης, καθώς το ρίσκο τουλάχιστον μερικώς μεταφράζεται ως διακύμανση. Εκτός από την τυπική ενσωμάτωση του ρίσκου στην προσέγγιση της Μέσης Τιμής-Διακύμανσης, πολλοί ερευνητές επιχείρησαν να ελαχιστοποιήσουν το ρίσκο ως μέρος των αντικειμενικών τους συναρτήσεων ή μέσω της υπό όρους αξίας σε κίνδυνο ή CVaR(Conditional Value at Risk) (π.χ., Nazari et al., 2015). Η πιο επικρατούσα μέθοδος αξιολόγησης αβεβαιότητας στην ανάλυση χαρτοφυλακίων είναι η χρήση διαφορετικών σεναρίων που οδηγούν στη διαδικασία μοντελοποίησης. Για παράδειγμα, οι Fuss κ.ά. (2012) έκαναν χρήση των κοινών κοινωνικο-οικονομικών σεναρίων, ενώ ο Marinon et al. (2011) και Hua et al. (2015) ανέλαβαν διαφορετικά σενάρια κλιματικής αλλαγής για τις αναλύσεις χαρτοφυλακίων πολιτικής προσαρμογής (adaptation policy). Μια γενικά μάλλον ευρέως διαδεδομένη προσέγγιση στην αξιολόγηση της αβεβαιότητας που διαπιστώθηκε επίσης σε αυτή τη βιβλιογραφία είναι η μέθοδος Monte Carlo (π.χ., στο Westner και Madlener, 2010), η οποία - αντίθετα με την ανάλυση ξεχωριστών σεναρίων - παίρνει δειγματοληψίες από κατανομές πιθανοτήτων για πολλαπλές μεταβλητές, παράγοντας έτσι πολλούς διαφορετικούς συνδυασμούς έναντι των οποίων το μοντέλο δοκιμάζεται για την επίτευξη του βέλτιστου συνόλου χαρτοφυλακίων (Pareto Set). Το βασικό συμπέρασμα που προκύπτει από την βιβλιογραφία είναι ότι οι ερευνητές θέλουν να μειώσουν το ρίσκο και σε βάθος χρόνου το κόστος των επενδύσεων του χαρτοφυλακίου μέσω της διαφοροποίησης. Εφόσον στον Markowitz το ρίσκο αποτυπώνεται στην διακύμανση, αποδεικνύεται μαθηματικά ότι όσο πιο διαφοροποιημένο (diversified) είναι το χαρτοφυλάκιο τόσο μειώνεται η συσχέτιση μεταξύ των επενδύσεων και άρα τόσο μειώνεται το ρίσκο (hedge).

Εκτός από τυχόν μεθοδολογικές συμπληρώσεις σχετικά με την ανάλυση χαρτοφυλακίου, μόνο ένας μικρός αριθμός μελετών ολοκλήρωσε αυτήν την προσέγγιση με άλλα πλαίσια. Συγκεκριμένα, οι αναλύσεις στις γεωργικές και δασοκομικές εφαρμογές χρησιμοποιούσαν διαφορετικά πλαίσια μοντελοποίησης, συμπεριλαμβανομένου ενός μοντέλου αντίκτυπου κλίμακας ειδών (species-range impact model) (Crowe and Parker, 2008), μοντέλο εναλλαγής καλλιεργειών (crop-rotation model-Mitter et al., 2015) και μοντέλο προσομοίωσης καλλιέργειας WOFOST Asseldonk and Langeveld, 2007). Τέλος, ο Luo και ο Wu (2016) χρησιμοποιούν το

ορθογώνιο μοντέλο GARCH για να εξετάσουν τις χρονικά μεταβαλλόμενες συσχετίσεις όσον αφορά τα δικαιώματα εκπομπών άνθρακα στην Ευρώπη, το αργό πετρέλαιο και τις χρηματιστηριακές αγορές στην Ευρώπη, την Κίνα και τις ΗΠΑ. Ενώ οι Marinoni et al. (2011) χρησιμοποιούν τη λήψη αποφάσεων πολλαπλών κριτηρίων (Multiple-Criteria Decision Making) και τη συνδυαστική βελτιστοποίηση για τον προσδιορισμό ενός χαρτοφυλακίου που αποδίδει τα μέγιστα οφέλη που υπόκεινται σε περιορισμούς προϋπολογισμού (budget constraints).

### 3.4 Συσχέτιση Αντικειμένου Ερευνών Με Γεωγραφική

#### Περιοχή

Παρακάτω παραθέτουμε και τον Πίνακα 3 ο οποίος δείχνει την γεωγραφική περιοχή που εφαρμόζεται το case study κάθε εργασίας καθώς και το ερευνητικό αντικείμενο με το οποίο ασχολείται.

Πίνακας 3-Γενική Εικόνα των ερευνητικών αντικειμένων κάθε εργασίας σε σχέση με την γεωγραφική περιοχή που εφαρμόστηκαν

Πεδίο Εφαρμογής	Περιοχή της Μελέτης Περίπτωσης						
	Africa	N. America	C. & S. America	Asia	Europe	Oceania	Global
<b>Αναβάθμιση Κτιρίων</b>		(Laurikka & Springer, 2003) (Pugh et al., 2011) (Shakouri et al., 2015)			(Westner & Madlener, 2010)		
<b>Σχεδιασμός Ηλεκτρικής Ενέργειας</b>		(Awerbuch et al., 2006) (Awerbuch, 2000) (Awerbuch, 2006) (Bar-Lev & Kratz, 1976) (Barron et al., 2014) (Laurikka & Springer, 2003) (Liu & Wu, 2007) (Marrero et	(Awerbuch, 2006) (Bar-Lev & Kratz, 1976) (Zhu & Fan, 2010)	(Adabi et al., 2016) (Bhattacharya & Kojima, 2012) (Chalvatzis & Rubel, 2015) (Huang & Wu, 2008)	(Albrecht, 2007) (Allan et al., 2011) (Arnesano et al., 2012) (Awerbuch & Berger, 2003) (Awerbuch, 2006) (Baker & Solak, 2011) (Cucchiella et al., 2017)	(Nazari et al., 2015)	(Fuss et al., 2012) (Siddiqui et al., 2016)

		al., 2015) (Pugh et al., 2011) (Shakouri et al., 2015) (White, 2007)		(Delarue et al., 2011) (Flues et al., 2014) (Jansen et al., 2008) (Lintunen & Uusivuori, 2016) (McLoughlin & Bazilian, 2006) (Roques et al., 2008) (Santos-Alamillos et al., 2017) (Westner & Madlener, 2010) (Ziegler et al., 2012) (Zon & Fuss, 2006) (Muñoz et al., 2009)	
<b>Εμπορία Εκπομπών</b>		(Laurikka & Springer, 2003) (Luo & Wu, 2016)	(Luo & Wu, 2016)	(Arnesano et al., 2012) (Flues et al., 2014) (Luo & Wu, 2016)	
<b>Ενεργειακή Έρευνα και Ανάπτυξη</b>		(Barron et al., 2014) (Laurikka & Springer, 2003) (Pugh et al., 2011)		(Baker & Solak, 2011)	(Lemoine et al., 2012)
<b>Καθαρή Βιομηχανία</b>		(Pugh et al., 2011)			
<b>Γεωργία &amp; Δασοκομία</b>	(Seo & Mendelsohn, 2007)	(Crowe & Parker, 2008)		(Lintunen & Uusivuori, 2016) (Mitter et al., 2015) (van Asseldonk & Langeveld, 2007)	
<b>Πράσινες Μεταφορές</b>		(Marrero et al., 2015) (Pugh et al., 2011)		(Romejko & Nakano, 2017)	

Από τον Πίνακα 3 παρατηρούμε ότι η συντριπτική πλειονότητα των εργασιών της βιβλιογραφίας ασχολείται με το electricity planning και μάλιστα στις περιοχές της Β. Αμερικής και της Ευρώπης. Για παράδειγμα οι Awerbuch & Berger, 2003 ερευνούν την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας (electricity planning) στην Ευρώπη και συγκεκριμένα στην Ε.Ε. Πιο συγκεκριμένα, με χρήση της Θεωρίας Χαρτοφυλακίου έχουν ως στόχο την δημιουργία βέλτιστων χαρτοφυλακίων με ενεργειακές επενδύσεις τα οποία να εναρμονίζονται με τις κλιματικές πολιτικές της Ε.Ε. και να ελαχιστοποιούν το κόστος μέσω της διαφοροποίησης. Από την άλλη πλευρά του Ατλαντικού οι Awerbuch et al., 2006 μελετούν την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας στις Ηνωμένες Πολιτείες και έχουν στόχο την παραγωγή βέλτιστου χαρτοφυλακίου, τόσο από την σκοπιά του κόστους, η οποία μεταφράζεται σε μεγιστοποίηση αποδοτικότητας του χαρτοφυλακίου (KWh/\$) όσο και από την σκοπιά του ρίσκου και της αβεβαιότητας. Για τον λόγο αυτό συνδυάζουν δύο μεθόδους, την Θεωρία Χαρτοφυλακίου για μεγιστοποίηση αποδοτικότητας (efficiency) και την Πολυκριτηριακή Ανάλυση Διαφοροποίησης (Multi-Criteria Diversity Analysis) για να αυξήσουν την διαφοροποίηση και να μειώσουν την αβεβαιότητα και το ρίσκο.

Ερευνητικό ενδιαφέρον παρατηρείται και στον τομέα της Αγοραπωλησίας Εκπομπών (Emissions Trading) το οποίο βρίσκεται και αυτό συγκεντρωμένο σε περιοχές της Β. Αμερικής και της Ευρώπης. Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι των Flues et al., 2014 οι οποίοι μελετούν την αγορά της Ε.Ε και θέλουν να δημιουργήσουν ένα βέλτιστο χαρτοφυλάκιο ενέργειας και κλιματικής πολιτικής της Ε.Ε για το 2030 λαμβάνοντας υπόψη διαφορετικά σενάρια για τις κλιματικές πολιτικές της Ε.Ε. Συγκεκριμένα, μελετούν την αντίδραση της καμπύλης ζήτησης σε διαφορετικές κλιματικές πολιτικές με μικροοικονομική ανάλυση, έχοντας ως στόχο την δημιουργία βέλτιστου χαρτοφυλακίου όσον αφορά το κόστος για την μείωση εκπομπών άνθρακα υπό το καθεστώς των cap-and-trade schemes που αναφέρθηκαν παραπάνω. Η αγοραπωλησία εκπομπών έγκειται στο cap-and-trade scheme εφόσον κάθε μεγάλη εταιρία που υπόκειται στις πολιτικές αυτές πρέπει να έχει ένα ελάχιστο ποσοστό από ανανεώσιμα (cap) στο χαρτοφυλάκιο της. Έτσι όσες έχουν μεγαλύτερο ποσοστό από το απαιτούμενο θα μπορούν να το ανταλλάσσουν με άλλες εταιρίες (trade).

Επιπλέον ερευνητικό ενδιαφέρον συγκεντρώνεται και στην περιοχή της Έρευνας και Ανάπτυξης (Energy R&D) καθώς και της Γεωργίας και Δασοκομίας. Παραδείγματα στις περιοχές της Β. Αμερικής είναι οι έρευνες των Barron et al., 2014 και Laurikka & Springer, 2003 όσον αφορά την Έρευνα και Ανάπτυξη ενώ στην Γεωργία και Δασοκομία το ενδιαφέρον εστιάζεται στην Ευρώπη με τις τρεις έρευνες των Lintunen & Uusivuori, 2016, Mitter et al., 2015 και van Asseldonk & Langeveld, 2007.



Εκτός από τις δύο παραπάνω γεωγραφικές περιοχές, στην Ασία συγκεντρώνεται επιστημονικό ενδιαφέρον τόσο για σχεδιασμό παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας (electricity planning) με σχετικά παραδείγματα τους Adabi et al., 2016, Bhattacharya & Kojima, 2012, Chalvatzis & Rubel, 2015, αλλά και για έναν ακόμα τομέα, αυτόν του σχεδιασμό ύδρευσης (water planning). Στην Κίνα, οι Hua et al., 2015 χρησιμοποιούν την Θεωρία Χαρτοφυλακίου με στόχο την αποκατάσταση μολυσμένων υδάτων με το μικρότερο δυνατό κόστος αλλά και με το μικρότερο δυνατό ρίσκο για το μέλλον. Η Θεωρία Χαρτοφυλακίου βρίσκει εφαρμογή στον συγκεκριμένο τομέα καθώς υπάρχουν διαφορετικές επενδύσεις (διαφορετικά κόστη, ρίσκα) οι οποίες στοχεύουν στην διόρθωση του συγκεκριμένου προβλήματος και αυτό σε συνδυασμό με το γεγονός ότι υπάρχουν και συγκεκριμένες πολιτικές στην Κίνα που λειτουργούν ως περιορισμοί κάνει ακόμα πιο σημαντική τη συνεισφορά της εν λόγω θεωρίας.

Τέλος λιγότερες είναι οι πηγές της βιβλιογραφίας οι οποίες ασχολούνται με Πράσινες Μεταφορές (Green Transport) και Ενεργειακή Αναβάθμιση Κτιρίων (Upgrade of Buildings). Βιβλιογραφικά παραδείγματα στην Β. Αμερική αποτελούν οι Marrero et al., 2015 και Pugh et al., 2011 ενώ στην Ευρώπη ξεχωρίζει η μελέτη των Westner & Madlener, 2010.

### **3.4.1 Ανάλυση Κλιματικών Πολιτικών**

Ένα πολύ σημαντικό μέρος της βιβλιογραφικής ανάλυσης είναι η κλιματική πολιτική ή πολιτικές στις οποίες αναφέρεται κάθε μέρος της βιβλιογραφίας. Κατ' αρχάς, οι Adabi et al., 2016 αναφέρονται στο Πρωτόκολλο του Κιότο, το οποίο αποτελεί έναν «οδικό χάρτη», στον οποίο περιλαμβάνονται τα απαραίτητα βήματα για τη μακροπρόθεσμη αντιμετώπιση της κλιματικής αλλαγής που προκαλείται λόγω της αύξησης των ανθρωπογενών εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου. Σύμφωνα με αυτό, τα κράτη που το έχουν συνυπογράψει δεσμεύονται να ελαττώσουν τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου την πρώτη περίοδο ανάληψης υποχρεώσεων (2008-2012) κατά ένα συγκεκριμένο στόχο σε σχέση με τις εκπομπές του 1990 (ή του 1995 για ορισμένα αέρια). Η έρευνα, η οποία εξετάζει την επένδυση σε φωτοβολταϊκά, υπογραμμίζει ότι σύμφωνα με την Ευρωπαϊκή Κομισιόν και την ομάδα Παγκόσμιες προοπτικές για την ενεργειακή, τεχνολογική και κλιματική πολιτική (World Energy, Technology and Climate Policy Outlook 2030) τα φωτοβολταϊκά δεν θα είναι ανταγωνιστικά σε σχέση με άλλες επενδύσεις μέχρι το 2030. Σε συνέχεια αυτού, αναφέρονται και στο γεγονός ότι ελάχιστες χώρες που ανήκουν στον Οργανισμό Οικονομικής Συνεργασίας και Ανάπτυξης (Ο.Ο.Σ.Α.) έχουν θεσμοθετήσει κλιματική πολιτική η οποία να υποστηρίζει την αγορά των φωτοβολταϊκών. Ακόμα προτείνουν νέα κλιματική πολιτική για τα κράτη μέλη του Πρωτόκολλου του Κιότο με την οποία θα εισάγεται ποινή για την παραγωγή αερίων που συμβάλλουν στο Φαινόμενο του Θερμοκηπίου η οποία θα

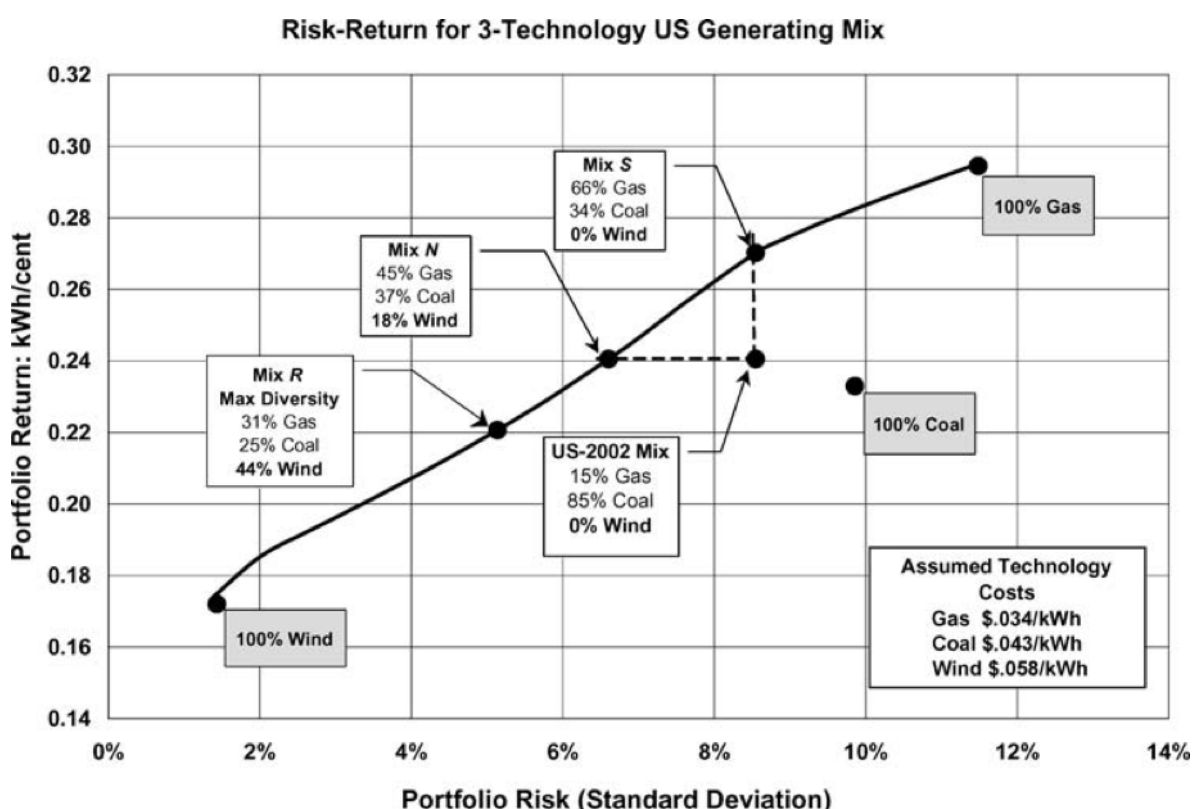
συνεισφέρει στην επιπλέον μείωση των παραγόμενων αερίων κάθε χώρας. Όσον αφορά τις κλιματικές πολιτικές των ΗΠΑ, η έρευνα αναφέρει ότι έχουν συνάψει συμφωνίες με την Κίνα και την Ινδία για μείωση του χρησιμοποιήσεως άνθρακα στα εργοστάσια. Τέλος, η έρευνα εξετάζει και το ενδεχόμενο επιβολής μεγαλύτερου φόρου στις κιλοβατώρες που παράγονται από άνθρακα από αυτές που παράγονται από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας(πχ: αέριο).

Μια ακόμα κλιματική πολιτική που εντοπίζεται στην βιβλιογραφία και καταγράφηκε παραπάνω είναι τα συστήματα cap-and-trade (Flues et al., 2014, Siddiqui et al., 2016). Τα συστήματα αυτά προτάθηκαν από τον Barrack Obama το 2009 με στόχο την μείωση των εκπομπών άνθρακα ιδιωτικών εταιριών. Ο τρόπος που δουλεύουν είναι ο εξής: η κυβέρνηση θέτει ένα ετήσιο συνολικό όριο στην εκπομπή άνθρακα (cap) το οποίο μάλιστα θα ελαττώνεται με την πάροδο των ετών. Το όριο αυτό διανέμεται μεταξύ εταιριών από την κυβέρνηση και αυτές που ξεπερνούν το προσωπικό τους όριο θα έχουν επιπλέον φόρους. Το πλάνο αφήνει στις εταιρίες την δυνατότητα να πωλούν το «πλεόνασμα» από το όριο αυτό σε άλλες εταιρίες. Αυτό είναι το trade.

Συμπληρωματικά στο προηγούμενο παράδειγμα, η έρευνα των Arnesano et al., 2012 αναφέρεται στο Σύστημα Εμπορίας Εκπομπών της ΕΕ (EU Emissions Trading System) το ακρογωνιαίος λίθος της πολιτικής της ΕΕ για την καταπολέμηση της κλιματικής αλλαγής και το βασικό της εργαλείο για τη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου με οικονομικά αποδοτικό τρόπο. Η συνάρτησή του με το προηγούμενο παράδειγμα έγκειται στο γεγονός ότι το EU ETS δουλεύει σύμφωνα με τις αρχές του cap-and-trade συστήματος. Μέσα στο ανώτατο όριο για τις εκπομπές αερίων που συμβάλλουν στο φαινόμενο του θερμοκηπίου, οι εταιρείες λαμβάνουν ή αγοράζουν δικαιώματα εκπομπής, τα οποία μπορούν να ανταλλάσσουν μεταξύ τους ανάλογα με τις ανάγκες. Μπορούν επίσης να αγοράζουν περιορισμένα ποσά διεθνών πιστώσεων από έργα εξοικονόμησης εκπομπών ανά τον κόσμο. Το όριο του συνολικού αριθμού των διαθέσιμων δικαιωμάτων διασφαλίζει ότι έχουν αξία. Μετά από κάθε έτος, μια εταιρεία πρέπει να παραδώσει αρκετά δικαιώματα για να καλύψει όλες τις εκπομπές της, διαφορετικά επιβάλλονται μεγάλα πρόστιμα. Εάν μια εταιρεία μειώσει τις εκπομπές της, μπορεί να διατηρήσει τα επιπλέον διαθέσιμα για να καλύψει τις μελλοντικές της ανάγκες ή να τα πουλήσει σε άλλη εταιρεία που δεν έχει δικαιώματα.

Ακόμη, ο Awerbuch, 2006 αναφέρεται στην μελέτη του σε κλιματικές πολιτικές που στοχεύουν στην επένδυση σε ανανεώσιμες πηγές ενέργειας εξηγώντας γιατί μάλιστα η τακτική αυτή είναι λιγότερο επώδυνη οικονομικά μακροπρόθεσμα, παρότι τα ανανεώσιμα έχουν εν γένει μεγαλύτερες τιμές. Συγκεκριμένα αναφέρει τους οργανισμούς Renewable Energy and Energy Efficiency Partnership (REEEP) και Johannesburg Renewable Energy Coalition (JREC) οι οποίοι προωθούν την υιοθέτηση κλιματικών πολιτικών και μάλιστα έχουν συνεργαστεί με έθνη για την αντιμετώπιση του κλιματικού προβλήματος μέσω της ικανοποίησης των όρων του Πρωτοκόλλου του Κιότο. Στο ίδιο κείμενο υπογραμμίζεται ακόμα μια κλιματική πολιτική που έχουν υιοθετήσει οι ΗΠΑ, η οποία στοχεύει στην αύξηση εκμετάλλευσης του φυσικού

αερίου. Εξαιτίας όμως αυτής της πολιτικής οι προβλέψεις για τις τιμές του φυσικού αερίου(gas) στο μέλλον παρουσιάζονται αυξημένες διότι, για λόγους ενεργειακής ασφάλειας (energy security) οι policymakers δεν θα θέλουν να επενδύσουν σε λύσεις χαμηλού κόστους-υψηλού ρίσκου όπως αυτή του αερίου. Ήδη στα case studies της βιβλιογραφίας φαίνεται η αύξηση σε μεγάλο βαθμό του επικείμενου ρίσκου του χαρτοφυλακίου (με χρησιμοποίηση περισσότερου φυσικού αερίου) δίχως ανάλογη μείωση του κόστους, η οποία από πολλούς θεωρείται δεδομένη εφόσον η τιμή του φυσικού αερίου είναι σαφώς μικρότερη από άλλες εναλλακτικές μορφές ενέργειας όπως η αιολική. Παρακάτω στον πίνακα από τους Awerbuch et al. (2005) φαίνεται ακριβώς αυτό το φαινόμενο το οποίο ονομάζεται επίδραση του χαρτοφυλακίου(portfolio effect).



**Εικόνα 8-Διάγραμμα Επιστροφής-Ρίσκου χαρτοφυλακίου. Φαινόμενο Χαρτοφυλακίου**

Συγκεκριμένα το χαρτοφυλάκιο N με 18% αιολική ενέργεια έχει και μικρότερο ρίσκο και μικρότερο κόστος από το χαρτοφυλάκιο «US-2002» το οποίο δεν έχει αιολική ενέργεια αλλά φυσικό αέριο το οποίο κοστίζει 70% λιγότερο.

Στην έρευνά τους για την αγορά της Ιαπωνίας οι Bhattacharya & Kojima, 2012 υπογραμμίζουν το γεγονός ότι οι επενδυτές γενικότερα δεν δίνουν έμφαση στην ελαχιστοποίηση του ρίσκου του χαρτοφυλακίου αλλά ασχολούνται αποκλειστικά με την ελαχιστοποίηση του κόστους. Ως αποτέλεσμα επηρεάζονται σημαντικά οι επενδύσεις τους από την διακύμανση των τιμών (fluctuation of input costs) των επενδύσεων, δηλαδή προωθούν τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας μόνο όταν οι τιμές των ορυκτών καυσίμων αυξάνονται σημαντικά. Όμως, τελικά, εξαιτίας της μεγάλης

αβεβαιότητας των αγορών, είναι πιο σημαντικό να κατασκευάσουμε ένα χαρτοφυλάκιο που να μην επηρεάζεται από την διακύμανση των τιμών, δηλαδή να έχει χαμηλό παράγοντα ρίσκου. Αναγκαστικά δηλαδή ένα τέτοιο χαρτοφυλάκιο πρέπει να περιέχει σημαντικό ποσοστό ανανεώσιμων πηγών και επιπλέον για να αποφευχθεί η ευαισθησία του στην διακύμανση των τιμών πρέπει να υπάρξει σωστή κλιματική πολιτική, η οποία για παράδειγμα σημαίνει την κρατική παρέμβαση σε περιόδους που οι τιμές των πηγών ενέργειας μεταβάλλονται. Το παραπάνω αποτελεί και την πρόταση κλιματικής πολιτικής από τους ερευνητές.

Επιπλέον, οι Cucchiella et al., 2017, στην έρευνά τους για την ενεργειακή αγορά της Ιταλίας αναφέρονται στην κλιματική πολιτική της Ε.Ε “climate-energy 20-20-20” η οποία έχει τους εξής στόχους από το 2009: 20% μείωση των εκπομπών σε σχέση με το 1990, αύξηση του ανανεώσιμου μεριδίου ενέργειας στο 20% σε σύγκριση με την ακαθάριστη τελική κατανάλωση και τη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης κατά την τελική χρήση κατά 20%. Ακόμα σε κάθε χώρα της Ε.Ε έχει οριστεί ένας στόχος μέχρι το 2020 και συγκεκριμένα για την Ιταλία: μείωση των αερίων του θερμοκηπίου κατά 14% σε σχέση με το 2005 και αύξηση των ανανεώσιμων πηγών στο 17% ενώ το 2005 ήταν στο 5.2% της ακαθάριστης τελικής κατανάλωσης. Αυτά τα όρια έγιναν πιο αυστηρά έκτοτε μετά από συνέδριο του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου τον Οκτώβριο του 2014.

Οι Lemoine et al., 2012 κάνουν λόγο για Negative Emission Technologies (NETs). Μια αρνητική εκπομπή διοξειδίου του άνθρακα ή αρνητική εκπομπή δίνει μια μόνιμη αφαίρεση του διοξειδίου του άνθρακα του αερίου του θερμοκηπίου από την ατμόσφαιρα της Γης. Θεωρείται η άμεση αντίθεση της εκπομπής διοξειδίου του άνθρακα, εξ ου και το όνομά του. Είναι αποτέλεσμα των τεχνολογιών απομάκρυνσης του διοξειδίου του άνθρακα, όπως η βιοενέργεια με δέσμευση και αποθήκευση διοξειδίου του άνθρακα, βιοσυσσωρευτές και η άμεση δέσμευση αέρα. Οι αρνητικές εκπομπές διαφέρουν από τη μείωση των εκπομπών, καθώς οι πρώτες παράγουν διοξείδιο του άνθρακα από τη γήινη ατμόσφαιρα, ενώ η τελευταία μειώνει την εισροή διοξειδίου του άνθρακα στην ατμόσφαιρα. Και οι δύο έχουν την ίδια στιγμιαία επίδραση, αλλά για να επιτευχθούν επίπεδα συγκέντρωσης διοξειδίου του άνθρακα κάτω από τα σημερινά επίπεδα, όπως τα 350 ppm, οι αρνητικές εκπομπές είναι κρίσιμες.

### **3.5 Αντιμετώπιση Αβεβαιότητας**

Ένας πολύ σημαντικός παράγοντας για την βιβλιογραφία είναι ο τρόπος με τον οποίο κάθε μελέτη αντιμετωπίζει την αβεβαιότητα στην επιλογή των βέλτιστων χαρτοφυλακίων. Πιο συγκεκριμένα μας ενδιαφέρει να εξετάσουμε τον τρόπο με τον οποίο οι ερευνητές κάνουν προβλέψεις για τις μελλοντικές τιμές των μεταβλητών που τους ενδιαφέρουν, για παράδειγμα τις τιμές παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, το ποσοστό επένδυσης σε κλιματικές πολιτικές για κάθε χώρο ή το ύψος των κυρώσεων για εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα.

Στο σημείο αυτό είναι καλό να ορίσουμε καλύτερα τις έννοιες αβεβαιότητα και ρίσκο προς αποφυγή παρεξηγήσεων. Στην έρευνά του ο Stirling (1994) ορίζει ως ρίσκο(risk) μια συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας μπορεί να καθοριστεί με νόημα για ένα εύρος τιμών πιθανών αποτελεσμάτων. Επιπλέον, για την αβεβαιότητα(uncertainty) εξηγεί ότι δεν υπάρχει βάση για την εκχώρηση τιμών στις πιθανότητες. Τέλος, για την αδιαφορία(ignorance) γράφει ότι δεν υπάρχει βάση για την εκχώρηση πιθανοτήτων στα αποτελέσματα, ούτε γνώση για πολλά από τα πιθανά αποτελέσματα. Ασκήει μάλιστα κριτική στην εφαρμογή της ανάλυσης χαρτοφυλακίου με την μέθοδο μέσης τιμής-διακύμανσης, διότι υποστηρίζει ότι οι κινήσεις των τιμών των καυσίμων δεν ακολουθούν κανένα μοτίβο και έτσι η αδιαφορία και όχι το ρίσκο κυβερνά τις αποφάσεις για επενδύσεις ηλεκτρικής ενέργειας. Παρόλα αυτά όπως υπογραμμίζουν οι Awerbuch & Berger, 2003 το ρίσκο στο χαρτοφυλάκιο είναι ουσιαστικά το συνολικό ρίσκο το οποίο εμπεριέχει το άθροισμα τόσο των διακυμάνσεων των τιμών λόγω της αβεβαιότητας στον κλάδο(unsystematic uncertainty) το οποίο λύνεται με διαφοροποίηση του χαρτοφυλακίου, όσο και των τυχαίων διακυμάνσεων λόγω της αγοράς(systematic uncertainty) οι οποίες φαίνονται από ιστορικά δεδομένα. Το τυχαίο ρίσκο(random risk-systematic uncertainty of market as a whole) μπορεί να είναι η πτώχευση της Enron, μια ιδιαίτερη τεχνολογική αποτυχία, κακά νέα σχετικά με ένα νέο φάρμακο, η παραίτηση του Διευθύνοντος Συμβούλου μιας εταιρείας ή η εκδήλωση αναταραχής σε χώρες παραγωγής πετρελαίου. Παρόλο που κανένα συγκεκριμένο τυχαίο συμβάν δεν μπορεί ποτέ να αντιγραφεί με ακρίβεια, εντούτοις, στην περίπτωση των χρηματιστηριακών μετοχών, η ιστορική μεταβλητότητα θεωρείται ευρέως ως ένας χρήσιμος δείκτης της μελλοντικής μεταβλητότητας. Ο τρόπος περιορισμού του τυχαίου ρίσκου είναι η αντιστάθμιση (hedging). Το συνολικό ρίσκο λοιπόν, μπορεί να θεωρηθεί ως το σύνολο των επιπτώσεων όλων των ιστορικών γεγονότων, συμπεριλαμβανομένων αμέτρητων ιστορικών εκπλήξεων.

Μια μέθοδος που χρησιμοποιείται κατά κόρον από τους ερευνητές είναι η δημιουργία διαφορετικών σεναρίων για ανάθεση τιμών σε μεταβλητές που αφορούν μελλοντικές προβλέψεις. Οι Lemoine et al., 2012, που κάνουν λόγο για Αρνητικές Εκπομπές Διοξειδίου του Άνθρακα(Negative Carbon Emissions), χρησιμοποιούν 15 διαφορετικά σενάρια για το κόστος που θα έχουν οι τεχνολογίες Έρευνας και Ανάπτυξης για τις αρνητικές εκπομπές, έτσι ώστε να κατασκευάσουν το βέλτιστο χαρτοφυλάκιο κλιματικών πολιτικών για άμβλυνση της κλιματικής αλλαγής. Συγκεκριμένα, εκτός του βασικού σεναρίου(base case-business as usual) χρησιμοποιούν ακόμα 14 διαφορετικά σενάρια τα οποία αντανάκλουν διαφορετικές πεποιθήσεις σχετικά με την τεχνολογική αλλαγή, τις συναρτήσεις κόστους(cost functions) και το κόστος κεφαλαίου ή προεξοφλητικό επιτόκιο(discount) στις επενδύσεις. Οι 14 διαφορετικές παραμετροποιήσεις γίνονται σε σύγκριση με το βασικό σενάριο το οποίο επιλέγεται ώστε να αντιπροσωπεύει αξίες που συμφωνούν με τη διαίσθηση, για παράδειγμα επενδύσεις με μεγαλύτερες εκπομπές άνθρακα να έχουν αυξανόμενο κόστος στο μέλλον σε σχέση με τις επενδύσεις σε αρνητικές εκπομπές. Οι ερευνητές σημειώνουν ότι αν τα διαφορετικά σενάρια δώσουν παρόμοια αποτελέσματα(χαρτοφυλάκια) τότε

υπάρχει μεγαλύτερη αισιοδοξία σχετικά με την ορθότητα των χαρτοφυλακίων αυτών. Επιπλέον, Lemoine et al., 2012 για να αντιμετωπίσουν την αβεβαιότητα της τεχνολογικής αλλαγής στο μέλλον, χρησιμοποιούν στοχαστική ανάλυση, δηλαδή κάνουν την τεχνολογική αλλαγή μια τυχαία μεταβλητή, με κατανομή πιθανότητας. Συμπληρωματικά σε αυτό διακρίνουν δύο τύπους τεχνολογικής αλλαγής: μια που θα αφορά χαρτοφυλάκια σε ενδεχόμενη μικρή μείωση του κόστους(lower levels of abatement) και μια που θα είναι χρησιμότερη σε μεγάλη μείωση του κόστους.

Οι Allan et al., 2011 στην εργασία τους που αφορά την ηλεκτρική παραγωγή ενέργειας στην Σκωτία για το 2020 λαμβάνουν και αυτοί διαφορετικά σενάρια με προβλέψεις για το ενεργειακό μίγμα του 2020. Τα διαφορετικά σενάρια αναφέρονται στο αν συγκεκριμένοι στόχοι για το ποσοστό της ηλεκτρικής παραγωγής από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας θα έχουν επιτευχθεί μέχρι μια συγκεκριμένη ημερομηνία ή όχι. Επιπλέον, τα σενάρια λαμβάνουν διαφορετικές τιμές για το κόστος παραγωγής ενέργειας των διαφόρων πηγών ενέργειας, ώστε να αντιμετωπιστεί η αβεβαιότητα λόγω διακύμανσης των τιμών(market uncertainty).

Μια ακόμα χρήση σεναρίων για την αντιμετώπιση της αβεβαιότητας όσον αφορά τους κοινωνικοοικονομικούς παράγοντες και την τεχνολογική πρόοδο γίνεται από τους Fuss et al., 2012 στο κείμενό τους για ενεργειακά χαρτοφυλάκια ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Συγκεκριμένα λαμβάνουν σενάρια από την βάση δεδομένων «Πρωτοβουλία για τα αέρια του θερμοκηπίου» (Greenhouse Gas Initiative-GGI) η οποία είναι μια ηλεκτρονική βάση δεδομένων που παρουσιάζει γραφήματα προβλέψεων για την αγορά και ζήτηση ενέργειας, τις εκπομπές αερίων, την χρησιμοποίηση διαφορετικών πηγών ενέργειας, κάτω από διαφορετικά σενάρια για την τεχνολογική πρόοδο και την αγορά ενέργειας σε διάφορες γεωγραφικές περιοχές. Επιπλέον, οι Marinon et al., 2011 στην εργασία τους για την κατασκευή βέλτιστου χαρτοφυλακίου πολιτικών για βελτίωση της ποιότητας του νερού στην Αυστραλία, αναγνωρίζουν την ύπαρξη αβεβαιότητας σχετικά με την κλιματική αλλαγή και την βροχόπτωση στην Αυστραλία και για το λόγο αυτό διακρίνουν σενάρια για το κλίμα και την βροχόπτωση τα οποία επηρεάζουν και τις επιστροφές των αντίστοιχων χαρτοφυλακίων. Διαφορετικά κλιματικά σενάρια διακρίνουν στην έρευνά τους και οι Mitter et al., 2015 οι οποίοι μελετούν την επίδραση της κλιματικής αλλαγής στην αγροτική παραγωγή της Αυστρίας. Στο ίδιο μήκος κύματος κινούνται και οι Marrero et al., 2015 οι οποίοι χρησιμοποιούν διαφορετικά σενάρια για τις τιμές των διαφόρων πηγών ενέργειας για να αντιμετωπίσουν την αβεβαιότητα της αγοράς(market uncertainty), με σκοπό την βελτιστοποίηση χαρτοφυλακίου κλιματικών πολιτικών αλλά και την ελαχιστοποίηση του ρίσκου σε ένα χαρτοφυλάκιο μεταφορικών καυσίμων(transport fuel portfolio).

Οι Pugh et al., 2011 στην έρευνά τους πάνω στην ανάλυση χαρτοφυλακίου με πολιτικές Έρευνας και Ανάπτυξης(R&D Investments) για μείωση εκπομπών, εκτός των πιο διαδεδομένων επιλογών (πυρηνικής ενέργειας, αιολικής, ηλιακής) εξετάζουν και την Γεωλογική αποθήκευση διοξειδίου του άνθρακα(Carbon Capture and Storage-CCS) η οποία είναι μια τεχνολογία σχετικά νέα η οποία εφαρμόστηκε για πρώτη φορά στη

Γερμανία το 2009 και είναι ένα βασικό τμήμα της τεχνολογίας της δέσμευσης και αποθήκευσης του άνθρακα με σκοπό να βοηθήσει στο θέμα του φαινομένου του θερμοκηπίου. Επειδή όμως ακόμα υπάρχει αβεβαιότητα σχετικά με το κατά πόσο θα γίνουν ανάλογες επενδύσεις στην τεχνολογία αυτή στο μέλλον οι ερευνητές διακρίνουν σενάρια. Εξαιτίας όμως της τεχνολογικής και ρυθμιστικής αβεβαιότητας που συνδέεται με τη CCS οι ερευνητές έκριναν πως ήταν χρήσιμο να διερευνηθούν σενάρια στα οποία η τεχνολογία αυτή δεν είναι διαθέσιμη για ανάπτυξη αλλά και σενάρια στα οποία η τεχνολογία αυτή αναπτύσσεται και ανταγωνίζεται τις ήδη υπάρχουσες (high technology state scenario).

Οι Adabi et al., 2016 προτείνουν μια νέα μέθοδο στην έρευνά τους για την αντιμετώπιση της αβεβαιότητας στα πλαίσια της βελτιστοποίησης χαρτοφυλακίου ενεργειακού μίγματος με ανανεώσιμες και μη πηγές ενέργειας. Η μεθοδός τους κάνει σαφή διάκριση μεταξύ της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, της εγκατεστημένης ισχύος (capacity) και της στιγμιαίας παροχής ισχύος (power delivery). Κατ' αυτόν τον τρόπο οι αβεβαιότητες της αιολικής ενέργειας και των περιορισμών της χρησιμοποίησης παραδοσιακών σταθμών ηλεκτροπαραγωγής συμπεριλαμβάνονται σωστά στο επενδυτικό κόστος.

Ακόμα, οι Baker & Solak, 2011 μελετούν την αβεβαιότητα σχετικά με την κλιματική αλλαγή παραμετρικά και όχι στοχαστικά. Αυτό σημαίνει ότι υποθέτουν ότι υπάρχει μια μοναδική τιμή που αντιπροσωπεύει τη σχέση μεταξύ των εκπομπών στην ατμόσφαιρα και των ζημιών που κάνει η ανθρωπότητα στο περιβάλλον, αλλά ότι αυτή η τιμή είναι άγνωστη αυτή τη στιγμή. Στη συνέχεια της μεθόδου η τιμή γίνεται γνωστή λαμβάνοντας 3 διαφορετικά σενάρια: στο πρώτο δεν υπάρχει καθόλου ρίσκο, στο δεύτερο υποθέτουν μεγάλο ρίσκο και στο τελευταίο μια ενδιάμεση τιμή για τις ζημιές στο περιβάλλον. Εξηγούν μάλιστα ότι αυτή η τεχνική είναι συνεπής με την βιβλιογραφία και είναι προτιμότερη από την χρησιμοποίηση στοχαστικής μεταβλητής, δηλαδή μιας μεταβλητής για τις περιβαλλοντικές ζημιές που μεταβάλλεται με το χρόνο.

Αντίθετα οι (Barron et al., 2014) χρησιμοποιούν μια τυχαία στοχαστική μεταβλητή για να περιγράψουν την αβεβαιότητα σχετικά με την δριμύτητα των καταστροφών του περιβάλλοντος. Η μεταβλητή αυτή η οποία προκύπτει από κατανομές πιθανότητας χρησιμοποιείται ως πολλαπλασιαστής-συντελεστής στο κόστος των ζημιών. Αξίζει να σημειωθεί ότι τα σενάρια είναι απαραίτητα και σε αυτή την περίπτωση αφού οι κατανομές της τυχαίας μεταβλητής προκύπτουν λαμβάνοντας σενάρια για το μέγεθος των ζημιών, για μικρό, μεσαίο και μεγάλο ποσοστό ρίσκου.

Οι Bhattacharya & Kojima, 2012 αντί σεναρίων χρησιμοποιούν τη μέθοδο Monte Carlo για αντιμετώπιση της αβεβαιότητας σχετικά με τη χρησιμοποίηση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στο μέλλον. Η μέθοδος Monte Carlo λειτουργεί ως μια προσομοίωση που παράγει επαναλαμβανόμενα τιμές για μια τυχαία μεταβλητή και ως εκ τούτου παράγεται μια κατανομή για τα αποτελέσματα της προσομοίωσης. Για να είναι αποτελεσματική η μέθοδος χρειάζεται να επαναληφθεί πολλές φορές έτσι ώστε να

προκύψουν όσο το δυνατόν περισσότερα αποτελέσματα. Γίνεται αντιληπτό ότι όσο περισσότερα διαφορετικά αποτελέσματα παράγονται για τις τιμές της τυχαίας μεταβλητής τόσο περισσότερο εξαιλείφεται η αβεβαιότητα. Στη συγκεκριμένη έρευνα η μέθοδος Monte Carlo χρησιμοποιείται για να προβλέψει το εύρος του ποσοστού ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στο βέλτιστο χαρτοφυλάκιο κάτω από τις δεδομένες συνθήκες κόστους και ρίσκου.

Οι Roques et al., 2008 κάνουν και αυτοί χρήση της μεθόδου Monte Carlo στην έρευνά τους για κατασκευή βέλτιστου χαρτοφυλακίου με επενδύσεις στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας φυσικού αερίου, άνθρακα και πυρηνικών εγκαταστάσεων. Συγκεκριμένα, Οι αποδόσεις, οι κίνδυνοι και οι συσχετίσεις (correlations) από τις προσομοιώσεις Monte Carlo χρησιμοποιούνται ως εισροές για τον εντοπισμό των βέλτιστων χαρτοφυλακίων των τριών τεχνολογιών βασικού φορτίου, χρησιμοποιώντας την Θεωρία χαρτοφυλακίου Μέσης Τιμής-Απόκλισης (MVP). Ακόμη μια χρήση της μεθόδου Monte Carlo γίνεται από τους Westner & Madlener, 2010 οι οποίοι μελετούν την συμπαραγωγή θερμότητας και ηλεκτρικής ενέργειας (Combined Heat and Power-CHP) η οποία προωθείται ως πολιτική μεταξύ των κρατών της Ευρωπαϊκής Ένωσης. Θέλοντας να κατασκευάσουν το βέλτιστο ευρωπαϊκό χαρτοφυλάκιο θερμότητας και ηλεκτρικής ενέργειας υπάρχει αβεβαιότητα στην αγορά σχετικά με τις μελλοντικές τιμές παραγωγής ενέργειας στη Γερμανία, την Ιταλία, τη Γαλλία και το Ηνωμένο Βασίλειο που είναι οι χώρες οι οποίες συμμετέχουν στο χαρτοφυλάκιο. Για το λόγο αυτό γίνεται η χρήση της Monte Carlo ώστε να προσομοιωθούν οι παραπάνω μελλοντικές τιμές με βάση την ιστορική εξέλιξη των τιμών στις αντίστοιχες αγορές και στη συνέχεια να γίνει η βελτιστοποίηση του χαρτοφυλακίου και να βρεθεί το ποσοστό παραγωγής της κάθε χώρας στο βέλτιστο χαρτοφυλάκιο σχετικά με το κόστος και το ρίσκο.



# 4

## Αβεβαιότητα

Στο κεφάλαιο αυτό θα αναφερθούμε σε δύο αλγορίθμους οι οποίοι χρησιμοποιούνται σε προβλήματα βελτιστοποίησης με αβεβαιότητα, μεταξύ των οποίων και η βελτιστοποίηση χαρτοφυλακίων.

### 4.1 Εισαγωγή-Αβεβαιότητα

Ο ορισμός του στιγμιότυπου ενός συνδυαστικού προβλήματος βελτιστοποίησης απαιτεί τον καθορισμό παραμέτρων, ιδιαίτερα συντελεστών της αντικειμενικής συνάρτησης, οι οποίοι μπορεί να είναι αβέβαιοι ή ασαφείς όπως προείπαμε στα προηγούμενα κεφάλαια. Η αβεβαιότητα/ανακρίβεια μπορεί να θεμελιωθεί μέσω της του σεναρίου που αντιστοιχεί σε μια ανάθεση εύλογων τιμών στις παραμέτρους του μοντέλου. Υπάρχουν δύο φυσικοί τρόποι περιγραφής του φάσματος όλων των πιθανών σεναρίων. Στην περίπτωση διακριτών σεναρίων, το σύνολο των σεναρίων περιγράφεται ρητά, δηλαδή οι συντελεστές λαμβάνουν συγκεκριμένες τιμές. Στην περίπτωση σεναρίων διαστημάτων, κάθε παράμετρος μπορεί να πάρει οποιαδήποτε τιμή μεταξύ κατώτερου και άνω ορίου. Τα κριτήρια min-max και min-max regret, τα οποία απορρέουν από τη θεωρία αποφάσεων, συχνά χρησιμοποιούνται για την επίτευξη λύσεων αντιστάθμισης/προστασίας (hedging) έναντι διακυμάνσεων των παραμέτρων. Το κριτήριο min-max στοχεύει στην κατασκευή λύσεων με τις καλύτερες δυνατές επιδόσεις στη χειρότερη περίπτωση, δηλαδή απευθύνεται και χρησιμοποιείται κυρίως από συντηρητικούς επενδυτές. Το κριτήριο min-max regret, λιγότερο συντηρητικό, στοχεύει στην εξεύρεση λύσης που ελαχιστοποιεί τη μεγαλύτερη απόκλιση (regret), σε όλα τα πιθανά σενάρια, μεταξύ της αξίας της λύσης μας και της βέλτιστης τιμής του αντίστοιχου σεναρίου.

Η μελέτη των παραπάνω αλγορίθμων γίνεται όταν έχουμε ένα πρόβλημα στο οποίο η πρόβλεψη της χειρότερης περίπτωσης είναι κρίσιμη. Για να δώσουμε ένα πρακτικό παράδειγμα, ας εξετάσουμε το πρόβλημα τοποθέτησης αισθητήρων κατά το σχεδιασμό συστημάτων προειδοποίησης ρύπων για δίκτυα διανομής νερού. Το βασικό ζήτημα αφορά το πού πρέπει να τοποθετηθούν οι αισθητήρες προκειμένου να μεγιστοποιηθεί το επίπεδο προστασίας. Η ποσοτικοποίηση του επιπέδου προστασίας χρησιμοποιώντας την αναμενόμενη τιμή της επίδρασης ενός συμβάντος μόλυνσης δεν είναι απολύτως ικανοποιητική, καθώς εφόσον χρησιμοποιείται στατιστική μέθοδος δεν δίνεται έμφαση στον τρόπο με τον οποίο μπορεί να προφυλαχθεί η επιχείρηση από πιθανά γεγονότα μεγάλης μόλυνσης τα οποία έχουν χαμηλή πιθανότητα να συμβούν.

Επομένως, τυποποιημένες προσεγγίσεις, όπως οι αιτιοκρατικές ή στοχαστικές προσεγγίσεις, δεν θα προστατεύσουν από έκτακτα γεγονότα με μεγάλο αντίκτυπο (σεισμοί, τυφώνες, επιθέσεις τύπου 9/11). Εκτός αυτού, η αξιόπιστη εκτίμηση των πιθανοτήτων συμβάντων μόλυνσης είναι εξαιρετικά δύσκολη. Τα κριτήρια Min-max και Min-max Regret απ' την άλλη πλευρά είναι κατάλληλα σε αυτό το πλαίσιο εστιάζοντας σε ένα υποσύνολο συμβάντων μόλυνσεως μεγάλων επιπτώσεων και τοποθετώντας αισθητήρες έτσι ώστε να ελαχιστοποιηθεί ο αντίκτυπος τέτοιων συμβάντων. Αντίστοιχα μπορούμε να λειτουργήσουμε και στην περίπτωση που το πρόβλημά μας είναι η βελτιστοποίηση χαρτοφυλακίου και θέλουμε να προστατευτούμε από τον κίνδυνους οι οποίοι δεν συγκεντρώνουν μεγάλη πιθανότητα να συμβούν, αλλά μπορεί να αποδειχθούν καταστροφικοί για το χαρτοφυλάκιό μας. Εκτός αυτού όπως έχει προαναφερθεί υπάρχει μεγάλη δυσκολία στον καθορισμό των τιμών των επιστροφών των επενδύσεων και του πίνακα διακυμάνσεων έτσι ώστε να εφαρμοστεί με επιτυχία η μέθοδος μέσης τιμής-διακύμανσης του Markowitz και οι παραπάνω αλγόριθμοι έρχονται να δώσουν λύση σε αυτό το πρόβλημα.

## 4.2 Παρουσίαση των μεθόδων Min-Max & Min-Max Regret

### 4.2.1 Μαθηματική διατύπωση

Υποθέτουμε ότι έχουμε ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης με την εξής αντικειμενική συνάρτηση:

$$\begin{cases} \min(\text{or max}) \sum_{i=1}^n c_i x_i & c_i \in \mathbb{N} \\ x \in X \subset \{0, 1\}^n. \end{cases}$$

Η βελτιστοποίηση μπορεί να αφορά είτε ελαχιστοποίηση, είτε μεγιστοποίηση παρακάτω χωρίς βλάβη της γενικότητας θα υποθέτουμε ότι θέλουμε να ελαχιστοποιήσουμε την αντικειμενική συνάρτηση. Επίσης, τα παραπάνω προβλήματα γραμμικού προγραμματισμού, τα οποία είναι πολύ διαδεδομένα, λέγονται και προβλήματα 0-1 (zero-one problems) ακριβώς επειδή οι μεταβλητές  $x_i$  μπορούν να πάρουν ως τιμή είτε το 0 είτε το 1. Για παράδειγμα θα μπορούσε το  $x_i$  να συμβολίζει μετοχές, ή γενικότερα στοιχεία ενός χαρτοφυλακίου τα οποία είτε θα επιλέγονται να βρίσκονται στο χαρτοφυλάκιο (τιμή 1) είτε δεν θα βρίσκονται στο χαρτοφυλάκιο (τιμή 0). Οι συντελεστές  $c_i$  αποτελούν και το βασικό μας πρόβλημα διότι εμπεριέχουν την αβεβαιότητα την οποία καλούμαστε να αντιμετωπίσουμε.

Στην περίπτωση των διακριτών σεναρίων οι μέθοδοι Min-Max και Min-Max Regret λαμβάνουν ως είσοδο ένα πεπερασμένο σύνολο  $S$  από σενάρια όπου κάθε σενάριο  $s \in S$  απεικονίζεται από ένα διάνυσμα συντελεστών  $c^s = (c_1^s, c_2^s, \dots, c_n^s)$ . Οι συντελεστές  $c_i^s$  υποθέτουμε ότι είναι φυσικοί αριθμοί.

Στην περίπτωση σεναρίων διαστημάτων κάθε συντελεστής  $c_i$  κυμαίνεται σε ένα διάστημα

$$[\underline{c}_i, \bar{c}_i], \text{ where } 0 \leq \underline{c}_i \leq \bar{c}_i$$

Στην παραπάνω περίπτωση το σύνολο  $S$  των σεναρίων προκύπτει από το Καρτεσιανό Γινόμενο των διαστημάτων  $[\underline{c}_i, \bar{c}_i], i = 1, \dots, n$ .

Επιπλέον ορίζουμε ως ακραίο σενάριο την περίπτωση που ο συντελεστής  $C_i$  ισούται είτε με το πάνω είτε με το κάτω όριο του διαστήματος.

Ακόμα ορίζουμε,

$$\text{val}(x, s) = \sum_{i=1}^n c_i^s x_i \text{ την λύση της εξίσωσης } x \text{ για το σενάριο } s$$

και

$$\text{val}_s^* = \text{val}(x_s^*, s) \text{ την βέλτιστη λύση για το αντίστοιχο σενάριο.}$$

Συμβολίζουμε  $x_s^*$  το διάνυσμα της βέλτιστης λύσης.

Όσον αφορά τον αλγόριθμο Min-Max αυτός βρίσκει τη λύση η οποία έχει την καλύτερη τιμή για την χειρότερη περίπτωση υπό όλα τα δυνατά σεναρία. Αυτή μπορεί να γραφτεί ως εξής:

$$\min_{x \in X} \max_{s \in S} \text{val}(x, s).$$

Σκοπός μας είναι η επιλογή μιας πολιτικής  $x = (x_1, \dots, x_n)$  η οποία μεγιστοποιεί την αντικειμενική συνάρτηση  $\text{val}(x, s)$ , δεδομένου ότι ικανοποιούνται ορισμένοι περιορισμοί (π.χ. ανισότητες τύπου budget-constraint). Αυτό σημαίνει ότι αναζητούμε τη βέλτιστη λύση  $x$  μέσα σε ένα υποσύνολο του συνόλου όλων των δυνατών  $n$ -άδων με στοιχεία 0-1 (δυναμοσύνολο), δηλ.  $x \in X \subseteq \{0, 1\}^n$ .

Παρακάτω δίνουμε τον αντίστοιχο ορισμό για τον αλγόριθμο Min-Max Regret: Δεδομένης μιας λύσης  $x \in X$ , υπό το σενάριο  $s \in S$ , ορίζουμε θλίψη ή δυσαρέσκεια(Regret):

$$R(x, s) = \text{val}(x, s) - \text{val}_s^*.$$

Τότε η μέγιστη θλίψη της λύσης αυτής είναι:

$$R_{\max}(x) = \max_{s \in S} R(x, s)$$

Εφόσον στόχος του αλγορίθμου είναι η ελαχιστοποίηση της μέγιστης διαφοράς μεταξύ της λύσης μας και της βέλτιστης λύσης, για όλα τα πιθανά σεναρία αυτό μπορεί να γραφτεί ως:

$$\min_{x \in X} R_{\max}(x) = \min_{x \in X} \max_{s \in S} (\text{val}(x, s) - \text{val}_s^*).$$

Στη συνέχεια δίνουμε ένα παράδειγμα (Aissi et al. 2009) για κατανόηση των παραπάνω αλγορίθμων και της χρησιμότητάς τους.

#### 4.2.2 Παράδειγμα

Προκειμένου να επεξηγήσουμε τους προηγούμενους ορισμούς και να δείξουμε το ενδιαφέρον να χρησιμοποιήσουμε τα Min-Max και Min-Max Regret, θεωρούμε ένα πρόβλημα προϋπολογισμού κεφαλαίου με αβεβαιότητα για τα αναμενόμενα κέρδη. Ας υποθέσουμε ότι θέλουμε να επενδύσουμε ένα κεφάλαιο  $b$  και έχουμε εντοπίσει  $n$  επενδυτικές ευκαιρίες. Η επένδυση απαιτεί ταμειακή εκροή  $w_i$  προς το παρόν και παράγει ένα αναμενόμενο κέρδος  $r_i$  κάποια χρονική στιγμή  $i = 1, 2, \dots, N$ . Λόγω διαφόρων εξωγενών παραγόντων (εξέλιξη της αγοράς, συνθήκες πληθωρισμού), το κέρδος υπολογίζεται με αβεβαιότητα. Σημειώνεται ότι εφόσον εδώ θέλουμε να μεγιστοποιήσουμε το κέρδος θα χρησιμοποιήσουμε τον Max-Min και όχι τον Min-Max. Δηλαδή θέλουμε την βέλτιστη λύση από τα μικρότερα δυνατά κέρδη. Είναι προφανές ότι ο Min-Max Regret δεν αλλάζει ανάλογα με την κατάσταση όπως ο Min-Max(Max-Min) εφόσον η θλίψη(δυσαρέσκεια-Regret) είναι κάτι το οποίο θέλουμε πάντα να το ελαχιστοποιήσουμε.

Ουσιαστικά το παραπάνω πρόβλημα είναι ένα πρόβλημα σακιδίου(Knapsack Problem) στο οποίο ψάχνουμε ένα υποσύνολο  $I \subseteq \{1, 2, \dots, n\}$  από στοιχεία έτσι ώστε να μεγιστοποιήσουμε το κέρδος, υπό τον περιορισμό ότι δεν μπορούμε να ξεπεράσουμε το μέγεθος  $b$  του σακιδίου.

Ανάλογα με τον τύπο της αβεβαιότητας, χρησιμοποιούμε είτε διακριτά σενάρια είτε σενάρια με διαστήματα. Όταν τα κέρδη των επενδύσεων επηρεάζονται από την εμφάνιση σαφώς προσδιορισμένων μελλοντικών γεγονότων (π.χ. διαφορετικά επίπεδα αντιδράσεων στην αγορά, δημόσιες αποφάσεις κατασκευής ή όχι μιας εγκατάστασης που θα επηρέαζε τα επενδυτικά έργα), είναι φυσικό να καθοριστούν διακριτά σενάρια που αντιστοιχούν σε κάθε συμβάν. Όταν η αξιολόγηση του κέρδους είναι απλώς ανακριβής, ένας ορισμός που χρησιμοποιεί σενάρια διαστημάτων είναι πιο κατάλληλος.

Στο παράδειγμά μας, εξετάζουμε ένα πρόβλημα προϋπολογισμού κεφαλαίου μικρού μεγέθους όπου η αβεβαιότητα κέρδους διαμορφώνεται με τρία διαφορετικά σενάρια ή με σενάρια διαστημάτων. Στον παρακάτω πίνακα δίνονται οι τιμές των ταμειακών εκροών και τα πιθανά κέρδη υπό 3 διαφορετικά σενάρια. Υποθέτουμε ότι έχουμε 12 μονάδες κεφαλαίου προς επένδυση και  $n=6$  διαφορετικές επενδύσεις.

**Πίνακας 4- Κόστος και Επιστροφή Επενδύσεων υπό διαφορετικά σενάρια**

$i$	$w_i$	$p_i^1$	$p_i^2$	$p_i^3$	$\underline{p}_i$	$\bar{p}_i$
1	3	4	3	3	3	5
2	5	8	4	6	2	6
3	2	5	3	3	2	5
4	4	3	2	4	2	3
5	5	2	8	2	3	9
6	3	4	6	2	1	7

Επιλύοντας το πρόβλημα βελτιστοποίησης για κάθε σενάριο, όσο και το Min-Max και Min-Max Regret στον επόμενο πίνακα φαίνονται όλα τα αποτελέσματα(για τα διακριτά σενάρια).

**Πίνακας 5- Βέλτιστες λύσεις για τα 3 σενάρια και τους αλγορίθμους min-max και min-max regret**

<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>Βέλτιστη Λύση</b>
17	10	12	Σενάριο 1:( 1,1,1,0,0,0)
11	17	7	Σενάριο 2:( 0,0,1,0,1,1)
16	9	13	Σενάριο 3:( 0,1,1,1,0,0)
15	12	12	Max-Min: (0,1,0,1,0,1)
15	15	11	Min-Max regret: (0,1,1,0,1,0)

Στην περίπτωση του διακριτών σεναρίων, παρατηρούμε στον Πίνακα 2 ότι οι βέλτιστες λύσεις δεν είναι εντελώς ικανοποιητικές, δεδομένου ότι σε περίπτωση που δεν έρθει το επιθυμητό σενάριο τα κέρδη είναι χαμηλά για το δεδομένο χαρτοφυλάκιο. Για παράδειγμα το βέλτιστο χαρτοφυλάκιο για το σενάριο 1, δηλαδή το (1,1,1,0,0,0) δίνει τιμή κέρδους ίση με 17, αλλά αν τελικά συμβεί το σενάριο 2 θα δώσει τιμή 10. Μια κατάλληλη λύση θα πρέπει να συμπεριφέρεται καλά υπό οποιαδήποτε διαφοροποίηση των μελλοντικών κερδών. Αντ' αυτού, οι βέλτιστες λύσεις για τις μεθόδους Max-Min και Min-Max Regret είναι πιο αποδεκτές λύσεις, καθώς οι επιδόσεις τους είναι σταθερότερες. Ένας υπεύθυνος λήψης αποφάσεων ο οποίος αποστρέφεται τον κίνδυνο θα προτιμούσε τη λύση που θα εγγυάται τουλάχιστον 12 σε όλα τα σενάρια, δηλαδή την τιμή που προκύπτει από το Max-Min. Από την άλλη πλευρά αν ο υπεύθυνος λήψης αποφάσεων είναι πρόθυμος να δεχτεί μια μικρή υποβάθμιση της απόδοσης του χαρτοφυλακίου στο χειρότερο σενάριο με αύξηση της μέσης απόδοσης σε όλα τα σενάρια, τότε η βέλτιστη λύση της έκδοσης Min-Max regret είναι πιο κατάλληλη για αυτόν σε σχέση με τη βέλτιστη λύση της έκδοσης Max-Min.

Αν τώρα θέλουμε να εξετάσουμε το πρόβλημα με χρήση διαστημάτων για την αβεβαιότητα τότε επικεντρώνουμε την προσοχή μας μόνο στα κατώτερα όρια των

τιμών κέρδους για κάθε σενάριο, δηλαδή στην προτελευταία στήλη του Πίνακα 1 και συγκεκριμένα στις τιμές

$$\underline{p} = (p_1, \dots, p_6)$$

Το βέλτιστο χαρτοφυλάκιο λοιπόν για το Max-Min θα είναι το (1,0,1,0,1,0) και στην χειρότερη περίπτωση θα αποδίδει 8 μονάδες κέρδους. Ακόμη, το βέλτιστο βέλτιστο χαρτοφυλάκιο όπως αυτό προκύπτει από το Min-Max Regret θα είναι το (1,0,0,0,1,1) και θα δίνει κέρδος στην χειρότερη περίπτωση 7. Μια παρατήρηση που μπορούμε να κάνουμε είναι ότι αντίθετο με το κριτήριο Max-Min, η βέλτιστη λύση Min-Max regret εξαρτάται από τις τιμές τόσο των κατώτατων όσο και των ανώτερων ορίων των διαστημάτων. Συγκεκριμένα, όταν αυξάνεται το ανώτερο όριο διαστήματος κατά μια μονάδα, η μέγιστη λύπη-δυσαρέσκεια (regret) κάθε εφικτής λύσης είτε αυξάνει κατά 1 είτε παραμένει σταθερή. Προφανώς, αυτό μπορεί να επηρεάσει την προκύπτουσα βέλτιστη λύση, δηλαδή το βέλτιστο χαρτοφυλάκιο να αλλάξει. Για παράδειγμα αν αλλάξουμε την μεγαλύτερη τιμή του διαστήματος κέρδους της επένδυσης 3 από 5 σε 8 τότε ο αλγόριθμος Min-Max Regret θα δώσει βέλτιστο χαρτοφυλάκιο το (0,0,1,0,1,1). Παρατηρούμε εδώ ότι η αύξηση αυτή έχει ως αποτέλεσμα τη συμπερίληψη της 3<sup>ης</sup> επένδυσης στο χαρτοφυλάκιο ενώ πριν ήταν απύσχα.

#### 4.2.3 Παρατηρήσεις-Επεκτάσεις

Όταν η αβεβαιότητα σχετικά με τις τιμές παραμέτρων των μοντέλων υποβοήθησης λήψης αποφάσεων είναι ένα κρίσιμο ζήτημα, οι υπεύθυνοι λήψης αποφάσεων μπορεί να μην αισθάνονται σίγουροι χρησιμοποιώντας αποτελέσματα που προέρχονται από παραμέτρους που λαμβάνουν ακριβείς τιμές. Η ανάλυση ευρωστίας είναι ένα θεωρητικό πλαίσιο που επιτρέπει στον υπεύθυνο λήψης αποφάσεων να λαμβάνει υπόψη την αβεβαιότητα προκειμένου να παράγει αποφάσεις που θα συμπεριφέρονται λογικά κάτω από πιθανά δεδομένα εισόδου. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν διαφορετικά κριτήρια για την επιλογή εύρωστων αποφάσεων. Τα κριτήρια Min-Max και Min-Max Regret χρησιμοποιούνται συχνά για τη λήψη συντηρητικών αποφάσεων για την αντιστάθμιση (hedging) των παραλλαγών των δεδομένων εισόδου. Εξετάζουμε εν συντομία καταστάσεις όπου το κάθε κριτήριο είναι κατάλληλο.

Το κριτήριο Min-Max είναι κατάλληλο για μη επαναλαμβανόμενες αποφάσεις (κατασκευή γραμμής υψηλής τάσης, αυτοκινητόδρομων) και για καταστάσεις αποφάσεων όπου απαιτούνται προληπτικά μέτρα (πυρηνικά ατυχήματα, δημόσια υγεία). Σε τέτοιες περιπτώσεις, οι κλασσικές προσεγγίσεις όπως η ντετερμινιστική ή η στοχαστική βελτιστοποίηση δεν είναι χρήσιμες. Αυτό το κριτήριο είναι επίσης κατάλληλο σε καταστάσεις ανταγωνισμού ή όταν ο υπεύθυνος λήψης αποφάσεων πρέπει να επιτύχει έναν προκαθορισμένο στόχο (πωλήσεις, απογραφή) υπό οποιαδήποτε παραλλαγή των δεδομένων εισόδου.

Απ' την άλλη πλευρά το κριτήριο Min-Max Regret είναι κατάλληλο σε καταστάσεις όπου ο υπεύθυνος λήψης αποφάσεων μπορεί να αισθανθεί δυσαρέσκεια εάν πάρει λάθος απόφαση. Κατά συνέπεια, λαμβάνει υπόψη αυτή την αναμενόμενη δυσαρέσκεια κατά τη διαδικασία λήψης της απόφασης. Για παράδειγμα, στον χρηματοοικονομικό τομέα ένας επενδυτής μπορεί να παρατηρεί όχι μόνο την απόδοση του χαρτοφυλακίου του, αλλά και τις αποδόσεις άλλων μετοχών ή χαρτοφυλακίων στα οποία ήταν σε θέση να επενδύσει, αλλά αποφάσισε να μην το κάνει (Dodonova et al, 2005). Επομένως, φαίνεται πολύ φυσικό να υποθέσουμε ότι ο επενδυτής μπορεί να αισθάνεται χαρά ή αντίστοιχα απογοήτευση εάν το δικό του χαρτοφυλάκιο ξεπεράσει ή δεν έχει ξεπεράσει κάποιο χαρτοφυλάκιο ή χαρτοφυλάκια αναφοράς. Το κριτήριο Min-Max regret αντικατοπτρίζει μια τέτοια συμπεριφορά και είναι λιγότερο συντηρητικό από το κριτήριο Min-Max, αφού συνυπολογίζει τις χαμένες ευκαιρίες. Έχει επίσης αποδειχθεί ότι, παρουσία αβεβαιότητας ως προς τις τιμές και τις αποδόσεις, η συμπεριφορά ορισμένων ατόμων (αγροτών) θα μπορούσε μερικές φορές να προβλεφθεί καλύτερα με κριτήριο Min-Max Regret, παρά με ένα κριτήριο κλασικής μεγιστοποίησης του κέρδους (Kazaksi et al. 2007).

Η μέγιστη δυσαρέσκεια μπορεί επίσης να χρησιμεύσει ως δείκτης για το πόσο μπορεί να βελτιωθεί η απόδοση μιας απόφασης αν επιλυθούν όλες οι αβεβαιότητες / ασάφειες (Kouvelis, Yu, 1997). Το κριτήριο Min-Max Regret είναι σημαντικό σε καταστάσεις όπου ο υπεύθυνος λήψης αποφάσεων αξιολογείται εκ των υστέρων.

Ένας άλλος λόγος τρόπος του κριτηρίου Min-Max Regret είναι ο ακόλουθος. Σε αβέβια / ασαφή πλαίσια αποφάσεων, ένας εύλογος στόχος είναι να βρεθεί μια λύση με επιδόσεις όσο το δυνατόν πλησιέστερες στις βέλτιστες τιμές κάτω από όλα τα δυνατά σενάρια. Αυτό ισοδυναμεί με τον καθορισμό ενός κατωφλίου  $\varepsilon$  και στη συνέχεια αναζήτηση λύσης  $x \in X$  ούτως ώστε:

$$val(x, s) - val_s^* \leq \varepsilon, \forall s \in S \Rightarrow R_{\max(x)} \leq \varepsilon$$

Κατ' αυτό τον τρόπο ψάχνοντας για λύση η οποία θα δίνει το ελάχιστο δυνατό  $\varepsilon$ , είναι ισοδύναμο με την εφαρμογή του αλγορίθμου Min-Max Regret.

Τα Min-Max και τα Min-Max Regret είναι πολύ απλά για εφαρμογή, καθώς δεν απαιτούν πρόσθετες πληροφορίες σε αντίθεση με άλλες προσεγγίσεις που βασίζονται στην θεωρία των πιθανοτήτων ή ασαφών συνόλων (fuzzy set theory). Επιπλέον, συχνά θεωρούνται ως κριτήρια αναφοράς και ως ένα σημείο εκκίνησης στην ανάλυση ευρωστίας. Εντούτοις, τα κριτήρια είναι ενίοτε ακατάλληλα. Σε ορισμένες περιπτώσεις, τα κριτήρια αυτά είναι πολύ απαισιόδοξα για τους υπεύθυνους λήψης αποφάσεων που είναι διατεθειμένοι να δεχτούν κάποιο βαθμό κινδύνου-ρίσκου. Επιπλέον, αποδίδουν μεγάλη σημασία στα σενάρια χειρότερης περίπτωσης, τα οποία ορισμένες φορές είναι πρακτικά απίθανο να παρουσιαστούν. Στην περίπτωση των διακριτών σεναρίων, αυτή

η δυσκολία θα μπορούσε να αντιμετωπιστεί, στο στάδιο της μοντελοποίησης, συμπεριλαμβάνοντας μόνο τα σενάρια που συγκεντρώνουν τη μεγαλύτερη πιθανότητα να εμφανιστούν. Στην περίπτωση των σεναρίων διαστημάτων, τα Min-Max και Min-Max Regret αποκομίζουν βέλτιστες λύσεις για ακραία ενδεχόμενα. Είναι προφανές ότι δεν είναι πιθανό όλα αυτά τα σενάρια να συμβούν και αυτό περιορίζει την εφαρμογή αυτών των κριτηρίων. Αυτή η δυσκολία γίνεται όλο και πιο σημαντική όσο τα διαστήματα μεγαλώνουν.

Ορισμένες προσεγγίσεις έχουν διατυπωθεί έτσι ώστε να μειωθούν αυτά τα μειονεκτήματα. Στην περίπτωση διακριτών σεναρίων, οι Daskin et al. 1997 προτείνουν ένα μοντέλο που ονομάζεται  $\alpha$ -αξιοπιστο μοντέλο Min-Max Regret το οποίο προσδιορίζει μια λύση που ελαχιστοποιεί τη μέγιστη λύπη/δυσαρέσκεια σε σχέση με ένα επιλεγμένο υποσύνολο σεναρίων των οποίων η πιθανότητα εμφάνισης είναι τουλάχιστον κάποια ορισμένη από τον χρήστη τιμή  $\alpha$ . Οι Kalai et al ,2005 προτείνουν μια άλλη προσέγγιση που λέγεται λεξικογραφική  $\alpha$ -ευρωστία (lexicographic  $\alpha$ -robustness), η οποία, αντί να επικεντρώνεται στη χειρότερη περίπτωση, θεωρεί όλα τα σενάρια σε λεξικογραφική σειρά, από το χειρότερο ως το καλύτερο, και περιλαμβάνει επίσης ένα όριο ανοχής  $\alpha$  ώστε να μην διακρίνει μεταξύ λύσεων παρόμοια αποτελέσματα. Στην περίπτωση σεναρίων διαστημάτων, οι Bertsimas and Sim 2003 προτείνουν ένα μοντέλο ευρωστίας με ένα σύνολο σεναρίων που περιορίζεται σε σενάρια όπου ο αριθμός των παραμέτρων που ωθούνται στα ανώτερα όριά τους περιορίζεται από μια παράμετρο που δίνεται από τον χρήστη. Η εύρωστη έκδοση που χρησιμοποιήθηκε με αυτό το μοντέλο έχει την ίδια πολυπλοκότητα με την κλασσική έκδοση. Αυτό είναι ένα σαφές πλεονέκτημα έναντι των κλασικών κριτηρίων ευρωστίας, δεδομένου ότι ο δικός τους αλγόριθμος ανάλυσης ευρωστίας είναι γενικά NP-Hard πρόβλημα. Ωστόσο, η κύρια δυσκολία στην προτεινόμενη μέθοδο είναι ο σωστός ορισμός αυτής της τεχνικής παραμέτρου, η τιμή της οποίας μπορεί να έχει αντίκτυπο στην προκύπτουσα λύση.



# 5

## Μελέτη Περίπτωσης

Στην ενότητα αυτή θα παρουσιάσουμε μια εφαρμογή των μεθόδων Min-Max και Min-Max Regret στην βελτιστοποίηση χαρτοφυλακίου με κλιματικές-ενεργειακές πολιτικές. Η εφαρμογή βασίζεται στο Εθνικό Σχέδιο Δράσης Ενεργειακής Απόδοσης(Αθήνα, 2014) το οποίο περιλαμβάνει μέτρα στην Ελλάδα για εξοικονόμηση ενέργειας. Παρακάτω ακολουθεί μια περιγραφή του σχεδίου, πριν παρουσιάσουμε την υλοποίηση της μεθόδου και τα αποτελέσματα.

### 5.1 Περιγραφή Προβλήματος

Ο κύριος άξονας αναφοράς της Ευρωπαϊκής Ενεργειακής πολιτικής είναι η σταθερή προσήλωση για την ανάγκη αύξησης της ενεργειακής απόδοσης. Βασικός στόχος αποτελεί η εξοικονόμηση πρωτογενούς ενέργειας σε ποσοστό 20% έως το 2020, σε σύγκριση με τις προβλέψεις του σεναρίου διατήρησης της υφιστάμενης κατάστασης συνέχισης των δρομολογημένων πολιτικών(business as usual-BAU).

Στο πλαίσιο αυτό η στρατηγική «Ευρώπη 2020» περιλαμβάνει την ενεργειακή απόδοση στους πρωταρχικούς της στόχους, διασφαλίζοντας και δημιουργώντας θέσεις απασχόλησης και εξασφαλίζοντας την έξυπνη, βιώσιμη και χωρίς αποκλεισμούς ανάπτυξη. Η ενεργειακή απόδοση βρίσκεται ψηλά στις προτεραιότητες της Ευρωπαϊκής Ένωσης και δύναται να συμβάλει στην αντιμετώπιση της τριπλής πρόκλησης, η οποία συνίσταται από την τρέχουσα οικονομική ύφεση, την ενεργειακή εξάρτηση και την κλιματική αλλαγή.

Κατά την παρακολούθηση της πορείας επίτευξης αυτού του κεντρικού στόχου εντοπίστηκαν ουσιαστικές αποκλίσεις και κρίθηκε σκόπιμο να υπάρξει επικαιροποίηση τόσο των δεσμεύσεων όσο και των μηχανισμών που θα πρέπει να τεθούν σε εφαρμογή. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα τον Οκτώβριο του 2012, η Ευρωπαϊκή Επιτροπή να θεσπίσει τη νέα Οδηγία 2012/27/ΕΕ για την ενεργειακή απόδοση με σαφή προσανατολισμό στην επίτευξη του συνολικού στόχου ενεργειακής απόδοσης για τη μείωση κατά 20% της κατανάλωσης πρωτογενούς ενέργειας έως το 2020. Η απαίτηση για την τροποποίηση της οδηγίας 2006/32/ΕΚ για τις ενεργειακές υπηρεσίες και η υιοθέτηση της νέας οδηγίας 2012/27/ΕΕ για την ενεργειακή απόδοση προήλθε ως αποτέλεσμα των ενδείξεων απόκλισης της επίτευξης του στόχου της Οδηγίας 2006/32/ΕΚ, σύμφωνα με τα ήδη υποβληθέντα εθνικά Σχέδια Δράσης Ενεργειακής Απόδοσης(ΣΔΕΑ I & II) από τα κράτη μέλη, καθώς και της ανάγκης επικαιροποίησης του νομικού πλαισίου για την ενεργειακή απόδοση στην ΕΕ.

Το κείμενο του Εθνικού Σχεδίου Δράσης Ενεργειακής Απόδοσης καταγράφει την πρόοδο που έχει επιτευχθεί στην βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης με την εφαρμογή μέτρων, πολιτικών, μηχανισμών της αγοράς, καθώς και δράσεων έρευνα και ανάπτυξης (Research & Development). Στο πλαίσιο αυτό διαμορφώνεται η στρατηγική, η εφαρμογή της οποίας οδηγεί στην επίτευξη του εθνικού στόχου για εξοικονόμηση ενέργειας μέχρι το 2020.

Η βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης θα συμβάλλει σημαντικά στην επίτευξη των στόχων που τίθενται σε εθνικό επίπεδο και αναφέρεται σε μέτρα και επενδύσεις ενεργειακής απόδοσης στον κτιριακό τομέα, τη βιομηχανία και τις μεταφορές. Τα μέτρα αυτά στο σύνολό τους επιτυγχάνουν συγκριτικά την πιο γρήγορη απόσβεση σε σχέση με τα άλλα μέτρα μείωσης της ενεργειακής κατανάλωσης και εμφανίζουν τον καλύτερο δείκτη που εκφράζει την επιτευχθείσα εξοικονόμηση ενέργειας ανά μονάδα επένδυσης, λαμβάνοντας υπόψη και το συνολικό κόστος κύκλου ζωής των παρεμβάσεων.

Σημαντικό πλεονέκτημα αυτών των τεχνολογικών παρεμβάσεων αποτελεί και το γεγονός ότι μια ενδεχόμενη μελλοντική αύξηση του κόστους των συμβατικών καυσίμων απορροφάται από τη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης και επομένως δεν έχει αντίκτυπο στον προϋπολογισμό του τελικού χρήστη. Από την άλλη πλευρά, η εφαρμογή επιτυχημένων μέτρων εξοικονόμησης ενέργειας σε επίπεδο τελικής χρήσης μειώνει συνολικά και τη ζήτηση ενέργειας, με πολλαπλασιαστικά οφέλη σε τοπικό και εθνικό επίπεδο.

Ταυτόχρονα, η αγορά των τεχνολογιών εξοικονόμησης ενέργειας και βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης, αναμένεται να παρουσιάσει υψηλό ρυθμό ανάπτυξης μέχρι το 2020, καθώς προβλέπεται η θέσπιση μέτρων και υποχρεώσεων για τις κτιριακές εγκαταστάσεις του δημόσιου και ιδιωτικού τομέα. Παράλληλα, η ενεργοποίηση νέων μηχανισμών της αγοράς όπως συμβάσεις ενεργειακής απόδοσης μέσω επιχειρήσεων ενεργειακών υπηρεσιών και εθελοντικές συμφωνίες, θα διαμορφώσουν ένα νέο επιχειρηματικό τομέα δραστηριοποίησης ικανό να αντισταθμίσει τις επιπτώσεις της υφιστάμενης ύφεσης και την πτώση της οικοδομικής δραστηριότητας.

Επιπλέον κάθε ΕΣΔΕΑ αποτελεί ένα χρήσιμο εργαλείο πολιτικής για τη χώρα το οποίο θέτει στο επίκεντρο τη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης που συντελεί στην οικονομική ανάπτυξη και στη διασφάλιση θέσεων εργασίας. Αποτελεί ένα εργαλείο ενεργειακής πολιτικής για την Ευρωπαϊκή Ένωση, συμβάλλοντας στην εξαγωγή συγκεντρωτικών και συγκριτικών αποτελεσμάτων στη χάραξη κοινής και αποτελεσματικής Ευρωπαϊκής Ενεργειακής Πολιτικής.

## 5.2 Περιγραφή Στόχου και εναλλακτικών μέτρων πολιτικής

Για την εκπλήρωση του στόχου εξοικονόμησης ενέργειας επιλέχθηκε, σύμφωνα με το Εθνικό Σχέδιο Δράσης, αποκλειστικά η υιοθέτηση κατά κατάλληλων ισοδύναμων μέτρων πολιτικής για την εξασφάλιση εξοικονόμησης ενέργειας στους τελικούς καταναλωτές χωρίς την θέσπιση καθεστώτος επιβολής υποχρέωσης ενεργειακής απόδοσης σε υπόχρεα μέρη(εταιρείες λιανικής πώλησης ενέργειας και διανομείς ενέργειας).

Τα μέτρα πολιτικής για την εξασφάλιση εξοικονόμησης ενέργειας στους τελικούς καταναλωτές υλοποιούνται από τις αρμόδιες δημόσιες αρχές, ενώ οι τελικοί αποδέκτες αυτών, είναι ο στενός και ευρύτερος δημόσιες αρχές, ενώ οι τελικοί αποδέκτες αυτών, είναι ο στενός και ευρύτερος δημόσιος τομέας, οι επιχειρήσεις του δημόσιου και ιδιωτικού τομέα, καθώς και οι τελικοί καταναλωτές.

Τα μέτρα πολιτικής που επιλέχθηκαν καλύπτουν στο σύνολό τους όλους τους τομείς τελικής κατανάλωσης ενέργειας περιλαμβανομένου του οικιακού, του τριτογενούς τομέα, των μεταφορών, καθώς επίσης και τον βιομηχανιών που εμπίπτουν στην οδηγία 2003/87/ΕΚ. Η οδηγία αυτή σχετίζεται με τη θέσπιση συστήματος εμπορίας δικαιωμάτων εκπομπής αερίων θερμοκηπίου εντός της Κοινότητας και την τροποποίηση της Οδηγίας 1996/61/ΕΚ του Συμβουλίου.

Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται τα επιλεγμένα εναλλακτικά μέτρα πολιτικής:

Πίνακας 6-Προϋπολογισμός Μέτρων Εξοικονόμησης Ενέργειας

NO	ΚΛΙΜΑΤΙΚΕΣ ΠΟΛΙΤΙΚΕΣ ΓΙΑ ΕΞΟΙΚΟΝΟΜΗΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ	ΧΡΟΝΙΚΗ ΔΙΑΡΚΕΙΑ	ΜΕΣΗ ΕΞΟΙΚΟΝ. ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ (ΣΕ ΚΤΟΕ)	ΠΡΟΫΠΟΛ. ΣΕ ΕΚΑΤ.€
1	Πρόγραμμα “Εξοικονόμησης Κατ’Οίκον”	2011-2015	83.8	356
2	Πρόγραμμα “Εξοικονομώ” στην Τοπική Αυτοδιοίκηση	2011-2015	3.7	86
3	Ενεργειακή Αναβάθμιση Κατοικιών	2015-2020	239.5	342
4	Ενεργειακή Αναβάθμιση Δημοσίων Κτιρίων	2015-2020	12.8	99
5	Ενεργειακή Αναβάθμιση σε κτίρια Επαγγελματικής Χρήσης	2015-2020	31.6	108
6	Εφαρμογή Συστήματος ενεργειακής διαχείρισης με βάση το πρότυπο ISO 50001 σε φορείς του δημοσίου	2015-2020	28.1	95
7	Ενεργειακή Αναβάθμιση σε κτίρια επαγγελματικής χρήσης μέσω Επιχειρήσεων Ενεργ. Υπηρεσιών	2015-2020	50.8	162

8	Δράσεις Εκπαίδευσης και Επιμόρφωσης σε στελέχη τριτογενούς τομέα	2011-2015	76.8	72
9	Ανάπτυξη Ευφύων Συστημάτων Μέτρησης Ενέργειας	2014-2020	96.8	170
10	Δράσεις ΕΠΠΕΡΑΑ	2011-2015	14.2	192
11	Συμψηφισμός Προστίμων αυθαιρέτων με ενεργειακή αναβάθμιση κτιρίων	2014-2020	107.8	4.5
12	Ενεργειακοί υπεύθυνοι σε κτίρια του δημόσιου τομέα	2014-2020	52.6	32
13	Αντικατάσταση παλαιών ελαφριών φορτηγών δημοσίου και ιδιωτικού τομέα	2015-2020	11.3	78
14	Αντικατάσταση παλαιών επιβατηγών	2011-2015	22.7	108
15	Πρώθηση αεριοκίνησης-υγραεριοκίνησης επιβατικών οχημάτων ιδιωτικού τομέα	2015-2020	10.4	135
16	Ανάπτυξη Μετρό Θεσσαλονίκης	2017-2020	21.4	426
17	Επέκταση Αθηναϊκού Μετρό	2013-2020	29.3	358
		Total		2823.5

Ο Πίνακας 6 παρουσιάζει 18 εναλλακτικά μέτρα για την εξοικονόμηση ενέργειας, καθώς και πληροφορίες σχετικά με τον αριθμό παρεμβάσεων, την διάρκεια υλοποίησης του κάθε μέτρου, την διάρκεια ζωής καθώς και την υπολογιζόμενη εξοικονόμηση τελικής ενέργειας. Είναι σαφές ότι στην έρευνά μας θα μας απασχολήσουν περισσότερο τα μέτρα τα οποία έχουν διάρκεια υλοποίησης που απευθύνεται σε σημερινές και μελλοντικές ημερομηνίες.

Με βάση τον παραπάνω πίνακα έχουμε τις πληροφορίες που χρειαζόμαστε για την εφαρμογή των αλγορίθμων Min-Max και Min-Max Regret, δηλαδή πληροφορίες για το κόστος και την εξοικονόμηση ενέργειας του κάθε μέτρου.

Παρακάτω ακολουθεί η μεθοδολογία για την υλοποίηση των δύο αλγορίθμων.

### 5.3 Μέθοδος

Ο στόχος μας είναι η εφαρμογή των αλγορίθμων Min-Max και Min-Max Regret για την κατασκευή του βέλτιστου χαρτοφυλακίου εναλλακτικών πολιτικών για μεγιστοποίηση της συνολικής εξοικονόμησης τελικής ενέργειας(σε ktoe) υπό τον περιορισμό του προϋπολογισμού(budget).

Κατ' αρχάς, έγινε επιλογή μέτρων των εξής 7 μέτρων για κατασκευή χαρτοφυλακίου. Η επιλογή έγινε με βάση την κρισιμότητα του κάθε μέτρου καθώς και με την χρονική διάρκεια υλοποίησής του. Τα μέτρα αυτά παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 7- Μέτρα Κλιματικής Πολιτικής

Νούμερο	Μέτρα Κλιματικής Πολιτικής	Εξοικονόμηση Ενέργειας- Απαισιόδοξο Σενάριο	Εξοικονόμηση Ενέργειας- Μεσαίο Σενάριο	Εξοικονόμηση Ενέργειας- Αισιόδοξο Σενάριο	Προϋπολογισμός (€)
1	Ενεργειακή Αναβάθμιση Κατοικιών	230	239.5	250	342
2	Ενεργειακή Αναβάθμιση Δημοσίων Κτιρίων	8	12.8	15	99
3	Εφαρμογή Συστήματος Ενεργειακής Διαχείρισης με βάση το πρότυπο ISO 50001 σε φορείς του δημοσίου	25	28.1	31	95
4	Ανάπτυξη Ευφών Συστημάτων Μέτρησης Ενέργειας	91	96.8	102	170
5	Συμψηφισμός προστίμων αυθαιρέτων με εργασίες ενεργειακής αναβάθμισης	102	107.8	114	4.5
6	Αντικατάσταση Παλαιών Επιβατηγών	18	22.7	26	108
7	Επέκταση του Μετρό της Αθήνας	23	29.3	35	358

Όπως φαίνεται από τον Πίνακα 8 θα χρησιμοποιήσουμε τη μέθοδο διακριτών σεναρίων για την εφαρμογή των Min-Max και Min-Max Regret. Συγκεκριμένα, έχουμε 3 διακριτά σεναρία, ένα το οποίο συγκεντρώνει τη μεγαλύτερη πιθανότητα πραγματοποίησης (median) και λήφθηκε από τον Πίνακα 6, καθώς και δύο ακόμα σεναρία ένα απαισιόδοξο (conservative forecast) και ένα αισιόδοξο σεναριο (optimistic forecast).

Ουσιαστικά στην εφαρμογή μας θα χρησιμοποιήσουμε τον Max-Min και όχι τον Min-Max αλγόριθμο αφού στόχος είναι η μεγιστοποίηση της συνολικής εξοικονόμησης ενέργειας.

Θεωρούμε λοιπόν την εξής αντικειμενική συνάρτηση την οποία θέλουμε να μεγιστοποιήσουμε

$$val(x, s) = \sum_{i=1}^N c_i^s x_i, \quad s \in S = \{s_1, s_2, s_3\}$$

Παραπάνω  $\mathbf{X}$  είναι το διάνυσμα των πολιτικών του χαρτοφυλακίου οι οποίες μπορούν να πάρουν τις τιμές 0 και 1, δηλαδή να μην ανήκουν ή να ανήκουν στο χαρτοφυλάκιο αντίστοιχα. Επίσης, το  $S$  αφορά τα 3 διαφορετικά σενάρια που έχουμε λάβει υπόψη.

Ο περιορισμός προϋπολογισμού γράφεται ως εξής:

$$342\chi_1 + 99\chi_2 + 95\chi_3 + 170\chi_4 + 4.5\chi_5 + 108\chi_6 + 358\chi_7 \leq 800$$

Επομένως θέλουμε να δούμε με βάση τον παραπάνω περιορισμό ποιες πολιτικές είναι οι προτιμότερες όσον αφορά την εξοικονόμηση ενέργειας και ταυτόχρονα μπορούν να καλυφθούν από τον προϋπολογισμό μας.

Για τον Max-Min αλγόριθμο στόχος μας είναι να βρούμε την λύση

$$\max_{x \in X} \min_{s \in S} val(x, s),$$

δηλαδή την καλύτερη χειρότερη τιμή κατά μήκος των σεναρίων.

Από την άλλη πλευρά για τον Min-Max Regret αλγόριθμο στόχος μας είναι να βρούμε τη λύση η οποία ελαχιστοποιεί την μέγιστη δυσαρέσκεια(Regret):

$$\min_{x \in X} R_{max}(x), \text{ με}$$

$$\circ R_{max}(x) = \max_{s \in S} R(x, s)$$

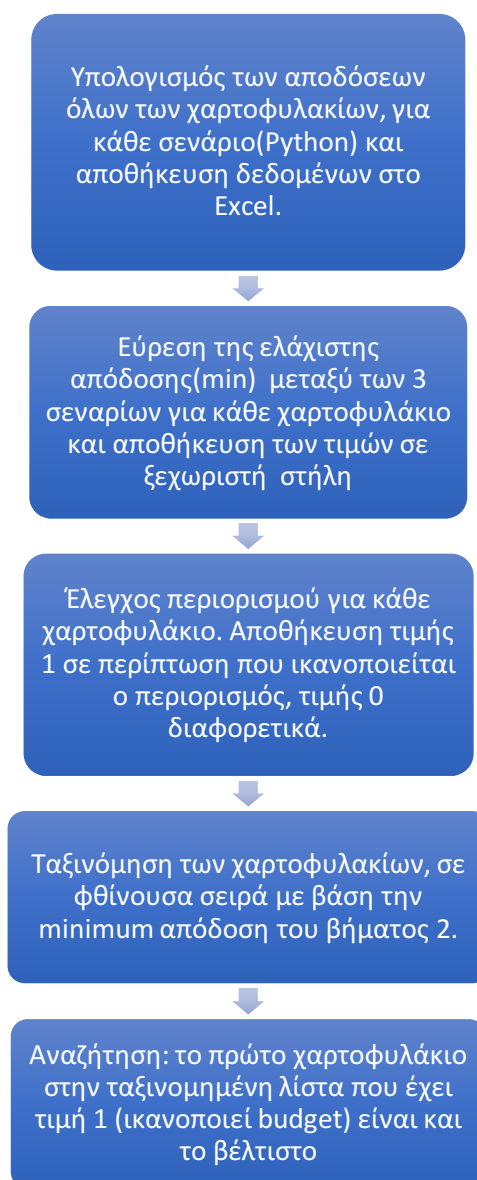
$$\circ R(x, s) = |val(x, s) - val_s^*|$$

Παρακάτω παρουσιάζουμε τον τρόπο με τον οποίο εφαρμόζουμε τους αλγορίθμους και λαμβάνουμε το βέλτιστο χαρτοφυλάκιο σε κάθε περίπτωση.

## 5.4 Επίλυση με την Μέθοδο Max-Min

Στο σημείο αυτό παρουσιάζεται ένα διάγραμμα ροής για τον αλγόριθμο Max-Min. Το διάγραμμα αυτό δείχνει τα απαιτούμενα βήματα που χρειάζονται έτσι ώστε να βρεθεί το βέλτιστο χαρτοφυλάκιο, που να αποδίδει βέλτιστα στη χειρότερη περίπτωση.

Διάγραμμα Ροής Max-Min



Εικόνα 9-Διάγραμμα Ροής αλγορίθμου Max-Min

Πιο συγκεκριμένα το πρώτο βήμα για την υλοποίηση του Max-Min είναι να παράγουμε όλα τα δυνατά χαρτοφυλάκια που μπορούν να προκύψουν και να υπολογίσουμε την τιμή της συνολική εξοικονόμησης ενέργειας, για το καθένα 3 φορές, όσα είναι και τα

δυνατά σενάρια. Αυτό γίνεται εκτελώντας το παρακάτω πρόγραμμα python το οποίο υπολογίζει άθροισμα υποσυνόλων( sum of subsets).

```
array = [250,15,31,102,114,26,35]

#return a list of tuples (path, sum)
def sums_of_subsets(array, path, sum):
    if len(array) == 0:
        return [(path,sum)]
    else:
        next_item = array.pop(0)
        array1 = [e for e in array]
        array2 = [e for e in array]
        path_without_item = [e for e in path]
        path_with_item = [e for e in path]
        path_without_item.append(0)
        path_with_item.append(1)

        left_path = sums_of_subsets(array1, path_without_item, sum)
        right_path = sums_of_subsets(array2, path_with_item, sum+next_item)
        return left_path + right_path

result = sums_of_subsets(array, [], 0)
text_file = open("result.txt", "w")
for item in result:
    for x in item[0]:
        text_file.write(str(x)+ "\t")

    text_file.write(str(item[1]) + "\n")
text_file.close()
print "Number of results: " + str(len(result))
```

**Εικόνα 10- Πρόγραμμα Python Max-Min**



Το παραπάνω πρόγραμμα λαμβάνει μια λίστα από 7 στοιχεία, τα οποία είναι η εξοικονόμηση ενέργειας της κάθε πολιτικής για ένα συγκεκριμένο σενάριο. Στη συνέχεια υπολογίζει όλα τα δυνατά διανύσματα-χαρτοφυλάκια που μπορούν να προκύψουν από τις 7 πολιτικές. Επομένως ο αριθμός των χαρτοφυλακίων είναι:  $2^7=128$ .

Τα διαφορετικά αποτελέσματα, δηλαδή τα χαρτοφυλάκια, υπό τη μορφή διανυσμάτων διάστασης 7, και με τιμές 0 και 1, καθώς και η συνολική εξοικονόμηση ενέργειας του κάθε χαρτοφυλακίου αποθηκεύονται στο αρχείο “results.txt”.

Εκτελώντας το παραπάνω πρόγραμμα 3 φορές, μια για κάθε σενάριο, λαμβάνουμε τις (3-όσα και τα σενάρια) τιμές της εξοικονόμησης ενέργειας για κάθε χαρτοφυλάκιο τις οποίες αποθηκεύουμε σε ένα φύλλο του Excel.

Στη συνέχεια για να εφαρμόσουμε τον Max-Min χρειαζόμαστε την χειρότερη(μικρότερη) τιμή, από τα 3 σενάρια, για την εξοικονόμηση ενέργειας κάθε χαρτοφυλακίου. Επομένως, αποθηκεύουμε την τιμή αυτή για κάθε χαρτοφυλάκιο σε μια ξεχωριστή στήλη. Η εικόνα του excel στο σημείο αυτό είναι η εξής:

**Πίνακας 8- Σύνολο Δυνατών Χαρτοφυλακίων Max-Min**

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	1	23	29.3	35	23
0	0	0	0	0	1	0	18	22.7	26	18
0	0	0	0	0	1	1	41	52	61	41
0	0	0	0	1	0	0	102	107.8	114	102
0	0	0	0	1	0	1	125	137.1	149	125
0	0	0	0	1	1	0	120	130.5	140	120
0	0	0	0	1	1	1	143	159.8	175	143
0	0	0	1	0	0	0	91	96.8	102	91
0	0	0	1	0	0	1	114	126.1	137	114
0	0	0	1	0	1	0	109	119.5	128	109
0	0	0	1	0	1	1	132	148.8	163	132
0	0	0	1	1	0	0	193	204.6	216	193
0	0	0	1	1	0	1	216	233.9	251	216
0	0	0	1	1	1	0	211	227.3	242	211
0	0	0	1	1	1	1	234	256.6	277	234
0	0	1	0	0	0	0	25	28.1	31	25
0	0	1	0	0	0	1	48	57.4	66	48
0	0	1	0	0	1	0	43	50.8	57	43
0	0	1	0	0	1	1	66	80.1	92	66

0	0	1	0	1	0	0	127	135.9	145	127
0	0	1	0	1	0	1	150	165.2	180	150
0	0	1	0	1	1	0	145	158.6	171	145
0	0	1	0	1	1	1	168	187.9	206	168
0	0	1	1	0	0	0	116	124.9	133	116
0	0	1	1	0	0	1	139	154.2	168	139
0	0	1	1	0	1	0	134	147.6	159	134
0	0	1	1	0	1	1	157	176.9	194	157
0	0	1	1	1	0	0	218	232.7	247	218
0	0	1	1	1	0	1	241	262	282	241
0	0	1	1	1	1	0	236	255.4	273	236
0	0	1	1	1	1	1	259	284.7	308	259
0	1	0	0	0	0	0	8	12.8	15	8
0	1	0	0	0	0	1	31	42.1	50	31
0	1	0	0	0	1	0	26	35.5	41	26
0	1	0	0	0	1	1	49	64.8	76	49
0	1	0	0	1	0	0	110	120.6	129	110
0	1	0	0	1	0	1	133	149.9	164	133
0	1	0	0	1	1	0	128	143.3	155	128
0	1	0	0	1	1	1	151	172.6	190	151
0	1	0	1	0	0	0	99	109.6	117	99
0	1	0	1	0	0	1	122	138.9	152	122
0	1	0	1	0	1	0	117	132.3	143	117
0	1	0	1	0	1	1	140	161.6	178	140
0	1	0	1	1	0	0	201	217.4	231	201
0	1	0	1	1	0	1	224	246.7	266	224
0	1	0	1	1	1	0	219	240.1	257	219
0	1	0	1	1	1	1	242	269.4	292	242
0	1	1	0	0	0	0	33	40.9	46	33
0	1	1	0	0	0	1	56	70.2	81	56
0	1	1	0	0	1	0	51	63.6	72	51
0	1	1	0	0	1	1	74	92.9	107	74
0	1	1	0	1	0	0	135	148.7	160	135
0	1	1	0	1	0	1	158	178	195	158
0	1	1	0	1	1	0	153	171.4	186	153
0	1	1	0	1	1	1	176	200.7	221	176
0	1	1	1	0	0	0	124	137.7	148	124
0	1	1	1	0	0	1	147	167	183	147
0	1	1	1	0	1	0	142	160.4	174	142
0	1	1	1	0	1	1	165	189.7	209	165
0	1	1	1	1	0	0	226	245.5	262	226
0	1	1	1	1	0	1	249	274.8	297	249

0	1	1	1	1	1	0	244	268.2	288	244
0	1	1	1	1	1	1	267	297.5	323	267
1	0	0	0	0	0	0	230	239.5	250	230
1	0	0	0	0	0	1	253	268.8	285	253
1	0	0	0	0	1	0	248	262.2	276	248
1	0	0	0	0	1	1	271	291.5	311	271
1	0	0	0	1	0	0	332	347.3	364	332
1	0	0	0	1	0	1	355	376.6	399	355
1	0	0	0	1	1	0	350	370	390	350
1	0	0	0	1	1	1	373	399.3	425	373
1	0	0	1	0	0	0	321	336.3	352	321
1	0	0	1	0	0	1	344	365.6	387	344
1	0	0	1	0	1	0	339	359	378	339
1	0	0	1	0	1	1	362	388.3	413	362
1	0	0	1	1	0	0	423	444.1	466	423
1	0	0	1	1	0	1	446	473.4	501	446
1	0	0	1	1	1	0	441	466.8	492	441
1	0	0	1	1	1	1	464	496.1	527	464
1	0	1	0	0	0	0	255	267.6	281	255
1	0	1	0	0	0	1	278	296.9	316	278
1	0	1	0	0	1	0	273	290.3	307	273
1	0	1	0	0	1	1	296	319.6	342	296
1	0	1	0	1	0	0	357	375.4	395	357
1	0	1	0	1	0	1	380	404.7	430	380
1	0	1	0	1	1	0	375	398.1	421	375
1	0	1	0	1	1	1	398	427.4	456	398
1	0	1	1	0	0	0	346	364.4	383	346
1	0	1	1	0	0	1	369	393.7	418	369
1	0	1	1	0	1	0	364	387.1	409	364
1	0	1	1	0	1	1	387	416.4	444	387
1	0	1	1	1	0	0	448	472.2	497	448
1	0	1	1	1	0	1	471	501.5	532	471
1	0	1	1	1	1	0	466	494.9	523	466
1	0	1	1	1	1	1	489	524.2	558	489
1	1	0	0	0	0	0	238	252.3	265	238
1	1	0	0	0	0	1	261	281.6	300	261
1	1	0	0	0	1	0	256	275	291	256
1	1	0	0	0	1	1	279	304.3	326	279
1	1	0	0	1	0	0	340	360.1	379	340
1	1	0	0	1	0	1	363	389.4	414	363
1	1	0	0	1	1	0	358	382.8	405	358
1	1	0	0	1	1	1	381	412.1	440	381

1	1	0	1	0	0	0	329	349.1	367	329
1	1	0	1	0	0	1	352	378.4	402	352
1	1	0	1	0	1	0	347	371.8	393	347
1	1	0	1	0	1	1	370	401.1	428	370
1	1	0	1	1	0	0	431	456.9	481	431
1	1	0	1	1	0	1	454	486.2	516	454
1	1	0	1	1	1	0	449	479.6	507	449
1	1	0	1	1	1	1	472	508.9	542	472
1	1	1	0	0	0	0	263	280.4	296	263
1	1	1	0	0	0	1	286	309.7	331	286
1	1	1	0	0	1	0	281	303.1	322	281
1	1	1	0	0	1	1	304	332.4	357	304
1	1	1	0	1	0	0	365	388.2	410	365
1	1	1	0	1	0	1	388	417.5	445	388
1	1	1	0	1	1	0	383	410.9	436	383
1	1	1	0	1	1	1	406	440.2	471	406
1	1	1	1	0	0	0	354	377.2	398	354
1	1	1	1	0	0	1	377	406.5	433	377
1	1	1	1	0	1	0	372	399.9	424	372
1	1	1	1	0	1	1	395	429.2	459	395
1	1	1	1	1	0	0	456	485	512	456
1	1	1	1	1	0	1	479	514.3	547	479
1	1	1	1	1	1	0	474	507.7	538	474
1	1	1	1	1	1	1	497	537	573	497

Οι στήλες Α έως Γ απεικονίζουν τα διαφορετικά χαρτοφυλάκια. Έχουμε λοιπόν 7 στήλες και  $2^7=128$  σειρές.

Οι στήλες Η έως Ι δείχνουν την τιμή εξοικονόμησης ενέργειας κάθε χαρτοφυλακίου για τα σενάρια 1,2 και 3 αντίστοιχα

Τέλος, η στήλη Κ ισούται με το minimum των Η, Ι και Ι.

Στο σημείο αυτό γίνεται έλεγχος του προϋπολογισμού για κάθε σενάριο. Στην στήλη L του φύλλου excel αποθηκεύουμε την τιμή 1 αν το χαρτοφυλάκιο ικανοποιεί τον περιορισμό ή την τιμή 0 αν δεν ικανοποιεί τον περιορισμό προϋπολογισμού.

Το τελικό βήμα είναι η ταξινόμηση των χαρτοφυλακίων με βάση την στήλη Κ, που εκφράζει το min των προβλέψεων για κάθε σενάριο και η αναζήτηση του πρώτου χαρτοφυλακίου στη λίστα που ικανοποιεί τον περιορισμό, δηλαδή έχει τιμή 1 στην στήλη L.

Παρακάτω φαίνεται το τελικό φύλλο του Excel απ' όπου λαμβάνουμε το βέλτιστο χαρτοφυλάκιο.

**Πίνακας 9- Πίνακας Βέλτιστου Χαρτοφυλακίου Max-Min**

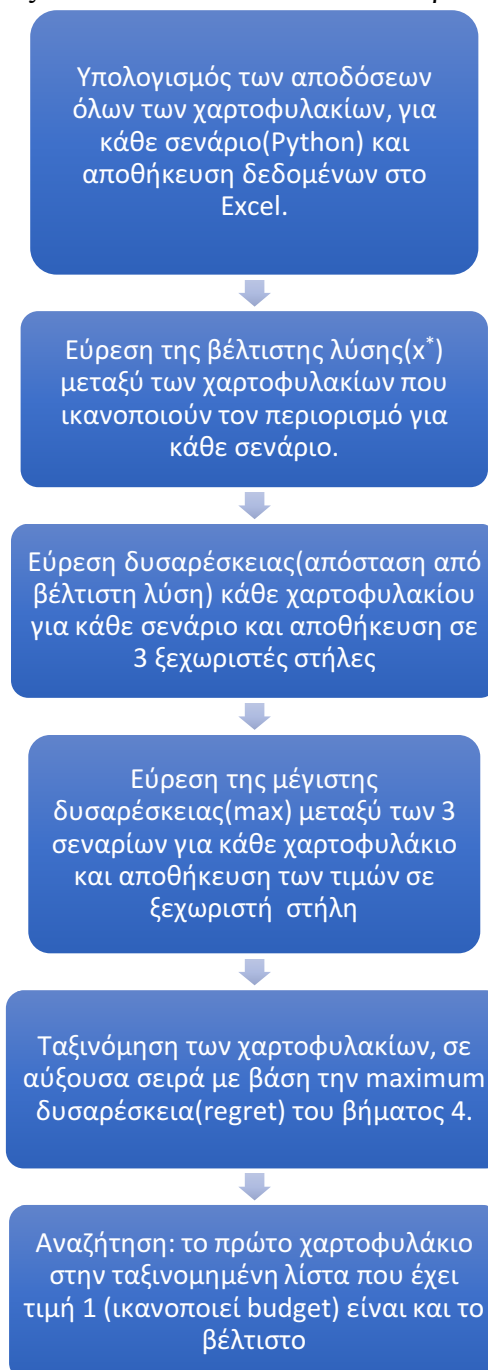
A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
1	1	1	1	1	1	1	497	537	573	497	0
1	0	1	1	1	1	1	489	524.2	558	489	0
1	1	1	1	1	0	1	479	514.3	547	479	0
1	1	1	1	1	1	0	474	507.7	538	474	0
1	1	0	1	1	1	1	472	508.9	542	472	0
1	0	1	1	1	0	1	471	501.5	532	471	0
<b>1</b>	<b>0</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>0</b>	<b>466</b>	<b>494.9</b>	<b>523</b>	<b>466</b>	<b>1</b>
1	0	0	1	1	1	1	464	496.1	527	464	0
1	1	1	1	1	0	0	456	485	512	456	1
1	1	0	1	1	0	1	454	486.2	516	454	0
1	1	0	1	1	1	0	449	479.6	507	449	1
1	0	1	1	1	0	0	448	472.2	497	448	1
1	0	0	1	1	0	1	446	473.4	501	446	0
1	0	0	1	1	1	0	441	466.8	492	441	1
1	1	0	1	1	0	0	431	456.9	481	431	1
1	0	0	1	1	0	0	423	444.1	466	423	1
1	1	1	0	1	1	1	406	440.2	471	406	0
1	0	1	0	1	1	1	398	427.4	456	398	0
1	1	1	1	0	1	1	395	429.2	459	395	0
1	1	1	0	1	0	1	388	417.5	445	388	0
1	0	1	1	0	1	1	387	416.4	444	387	0
1	1	1	0	1	1	0	383	410.9	436	383	1
1	1	0	0	1	1	1	381	412.1	440	381	0
1	0	1	0	1	0	1	380	404.7	430	380	1
1	1	1	1	0	0	1	377	406.5	433	377	0

Επομένως παρατηρούμε ότι το βέλτιστο χαρτοφυλάκιο όπως αυτό προκύπτει από τον Max-Min αλγόριθμο είναι το  $\mathbf{X} = (1,0,1,1,1,1,0)$ .

Το χαρτοφυλάκιο αυτό αποτελείται από τις εξής εναλλακτικές πολιτικές για την εξοικονόμηση ενέργειας: Ενεργειακή αναβάθμιση κατοικιών, εφαρμογή συστήματος ενεργειακής διαχείρισης με βάση το πρότυπο ISO 50001 σε φορείς του Δημοσίου, ανάπτυξη ευφών συστημάτων μέτρησης ενέργειας, συμψηφισμός προστίμων αυθαιρέτων με εργασίες ενεργειακής αναβάθμισης και τέλος αντικατάσταση παλαιών επιβατικών οχημάτων.

## 5.5 Επίλυση με την Μέθοδο Min-Max Regret

Όπως και στην περίπτωση του Max-Min παραθέτουμε στο σημείο αυτό ένα διάγραμμα ροής για την αναλυτική αναπαράσταση των βημάτων του Min-Max Regret κατά τη διαδικασία δηλαδή εύρεσης του χαρτοφυλακίου που θα έχει την μικρότερη τιμή μέγιστης δυσαρέσκειας κάτω από όλα τα δυνατά σενάρια.



Εικόνα 11- Διάγραμμα Ροής Min-Max Regret

Αναλυτικότερα, το πρώτο βήμα είναι να υπολογίσουμε τις αποδόσεις όλων των θεωρητικά δυνατών χαρτοφυλακίων, όπως και στον αλγόριθμο Max-Min με βάση το πρόγραμμα Python. Κατ' αυτό τον τρόπο υπολογίζουμε και πάλι την συνολική εξοικονόμηση ενέργειας 3 φορές για κάθε χαρτοφυλάκιο, όσα είναι και τα δυνατά σενάρια. Στη συνέχεια, αποθηκεύουμε τα δεδομένα σε ένα φύλλο του excel και το επόμενο βήμα είναι να βρούμε τη βέλτιστη λύση για καθένα από τα 3 σενάρια, δηλαδή για κάθε σενάριο το χαρτοφυλάκιο εκείνο το οποίο εξοικονομεί την περισσότερη ενέργεια και ταυτόχρονα δεν ξεπερνά τον προϋπολογισμό.

Στο σημείο αυτό, αφού υπολογίσουμε τη βέλτιστη λύση για κάθε σενάριο, βρίσκουμε τη δυσαρέσκεια(regret) κάθε χαρτοφυλακίου για κάθε σενάριο, υπολογίζουμε δηλαδή την απόσταση που έχει η εξοικονόμηση ενέργειας κάθε χαρτοφυλακίου με τη βέλτιστη εξοικονόμηση ενέργειας για κάθε σενάριο. Αποθηκεύουμε τις τιμές που βρίσκουμε για κάθε χαρτοφυλάκιο σε 3 ξεχωριστές στήλες.

Επιπλέον, για να εφαρμόσουμε τον αλγόριθμο Min-Max Regret, χρειαζόμαστε την μέγιστη δυσαρέσκεια για κάθε χαρτοφυλάκιο μεταξύ των διαφορετικών σεναρίων, επομένως βρίσκουμε τη μέγιστη δυσαρέσκεια για κάθε χαρτοφυλάκιο και αποθηκεύουμε σε ξεχωριστή στήλη.

Στο σημείο αυτό το φύλλο του excel θα έχει αυτή την μορφή:

**Πίνακας 10-Πίνακας Δυνατών Χαρτοφυλακίων Min-Max Regret**

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
1	1	1	1	1	1	1	497	537	573	31	42.1	50	50
1	0	1	1	1	1	1	489	524.2	558	23	29.3	35	35
1	1	1	1	1	0	1	479	514.3	547	13	19.4	24	24
1	1	0	1	1	1	1	472	508.9	542	6	14	19	19
1	1	1	1	1	1	0	474	507.7	538	8	12.8	15	15
1	0	1	1	1	0	1	471	501.5	532	5	6.6	9	9
1	0	0	1	1	1	1	464	496.1	527	2	1.2	4	4
1	0	1	1	1	1	0	466	494.9	523	0	0	0	0
1	1	0	1	1	0	1	454	486.2	516	12	8.7	7	12
1	1	1	1	1	0	0	456	485	512	10	9.9	11	11
1	1	0	1	1	1	0	449	479.6	507	17	15.3	16	17
1	0	0	1	1	0	1	446	473.4	501	20	21.5	22	22
1	0	1	1	1	0	0	448	472.2	497	18	22.7	26	26
1	0	0	1	1	1	0	441	466.8	492	25	28.1	31	31
1	1	0	1	1	0	0	431	456.9	481	35	38	42	42
1	1	1	0	1	1	1	406	440.2	471	60	54.7	52	60
1	0	0	1	1	0	0	423	444.1	466	43	50.8	57	57

1	1	1	1	0	1	1	395	429.2	459	71	65.7	64	71
1	0	1	0	1	1	1	398	427.4	456	68	67.5	67	68
1	1	1	0	1	0	1	388	417.5	445	78	77.4	78	78
1	0	1	1	0	1	1	387	416.4	444	79	78.5	79	79
1	1	0	0	1	1	1	381	412.1	440	85	82.8	83	85
1	1	1	0	1	1	0	383	410.9	436	83	84	87	87
1	1	1	1	0	0	1	377	406.5	433	89	88.4	90	90
1	0	1	0	1	0	1	380	404.7	430	86	90.2	93	93
1	1	0	1	0	1	1	370	401.1	428	96	93.8	95	96
1	0	0	0	1	1	1	373	399.3	425	93	95.6	98	98
1	1	1	1	0	1	0	372	399.9	424	94	95	99	99
1	0	1	0	1	1	0	375	398.1	421	91	96.8	102	102
1	0	1	1	0	0	1	369	393.7	418	97	101.2	105	105
1	1	0	0	1	0	1	363	389.4	414	103	105.5	109	109
1	0	0	1	0	1	1	362	388.3	413	104	106.6	110	110
1	1	1	0	1	0	0	365	388.2	410	101	106.7	113	113
1	0	1	1	0	1	0	364	387.1	409	102	107.8	114	114
1	1	0	0	1	1	0	358	382.8	405	108	112.1	118	118
1	1	0	1	0	0	1	352	378.4	402	114	116.5	121	121
1	0	0	0	1	0	1	355	376.6	399	111	118.3	124	124
1	1	1	1	0	0	0	354	377.2	398	112	117.7	125	125
1	0	1	0	1	0	0	357	375.4	395	109	119.5	128	128
1	1	0	1	0	1	0	347	371.8	393	119	123.1	130	130
1	0	0	0	1	1	0	350	370	390	116	124.9	133	133
1	0	0	1	0	0	1	344	365.6	387	122	129.3	136	136
1	0	1	1	0	0	0	346	364.4	383	120	130.5	140	140
1	1	0	0	1	0	0	340	360.1	379	126	134.8	144	144
1	0	0	1	0	1	0	339	359	378	127	135.9	145	145
1	1	0	1	0	0	0	329	349.1	367	137	145.8	156	156
1	0	0	0	1	0	0	332	347.3	364	134	147.6	159	159
1	1	1	0	0	1	1	304	332.4	357	162	162.5	166	166
1	0	0	1	0	0	0	321	336.3	352	145	158.6	171	171
1	0	1	0	0	1	1	296	319.6	342	170	175.3	181	181
1	1	1	0	0	0	1	286	309.7	331	180	185.2	192	192
1	1	0	0	0	1	1	279	304.3	326	187	190.6	197	197
0	1	1	1	1	1	1	267	297.5	323	199	197.4	200	200
1	1	1	0	0	1	0	281	303.1	322	185	191.8	201	201
1	0	1	0	0	0	1	278	296.9	316	188	198	207	207
1	0	0	0	0	1	1	271	291.5	311	195	203.4	212	212
0	0	1	1	1	1	1	259	284.7	308	207	210.2	215	215
1	0	1	0	0	1	0	273	290.3	307	193	204.6	216	216
1	1	0	0	0	0	1	261	281.6	300	205	213.3	223	223



0	1	1	1	1	0	1	249	274.8	297	217	220.1	226	226
1	1	1	0	0	0	0	263	280.4	296	203	214.5	227	227
0	1	0	1	1	1	1	242	269.4	292	224	225.5	231	231
1	1	0	0	0	1	0	256	275	291	210	219.9	232	232
0	1	1	1	1	1	0	244	268.2	288	222	226.7	235	235
1	0	0	0	0	0	1	253	268.8	285	213	226.1	238	238
0	0	1	1	1	0	1	241	262	282	225	232.9	241	241
1	0	1	0	0	0	0	255	267.6	281	211	227.3	242	242
0	0	0	1	1	1	1	234	256.6	277	232	238.3	246	246
1	0	0	0	0	1	0	248	262.2	276	218	232.7	247	247
0	0	1	1	1	1	0	236	255.4	273	230	239.5	250	250
0	1	0	1	1	0	1	224	246.7	266	242	248.2	257	257
1	1	0	0	0	0	0	238	252.3	265	228	242.6	258	258
0	1	1	1	1	0	0	226	245.5	262	240	249.4	261	261
0	1	0	1	1	1	0	219	240.1	257	247	254.8	266	266
0	0	0	1	1	0	1	216	233.9	251	250	261	272	272
1	0	0	0	0	0	0	230	239.5	250	236	255.4	273	273
0	0	1	1	1	0	0	218	232.7	247	248	262.2	276	276
0	0	0	1	1	1	0	211	227.3	242	255	267.6	281	281
0	1	0	1	1	0	0	201	217.4	231	265	277.5	292	292
0	1	1	0	1	1	1	176	200.7	221	290	294.2	302	302
0	0	0	1	1	0	0	193	204.6	216	273	290.3	307	307
0	1	1	1	0	1	1	165	189.7	209	301	305.2	314	314
0	0	1	0	1	1	1	168	187.9	206	298	307	317	317
0	1	1	0	1	0	1	158	178	195	308	316.9	328	328
0	0	1	1	0	1	1	157	176.9	194	309	318	329	329
0	1	0	0	1	1	1	151	172.6	190	315	322.3	333	333
0	1	1	0	1	1	0	153	171.4	186	313	323.5	337	337
0	1	1	1	0	0	1	147	167	183	319	327.9	340	340
0	0	1	0	1	0	1	150	165.2	180	316	329.7	343	343
0	1	0	1	0	1	1	140	161.6	178	326	333.3	345	345
0	0	0	0	1	1	1	143	159.8	175	323	335.1	348	348
0	1	1	1	0	1	0	142	160.4	174	324	334.5	349	349
0	0	1	0	1	1	0	145	158.6	171	321	336.3	352	352
0	0	1	1	0	0	1	139	154.2	168	327	340.7	355	355
0	1	0	0	1	0	1	133	149.9	164	333	345	359	359
0	0	0	1	0	1	1	132	148.8	163	334	346.1	360	360
0	1	1	0	1	0	0	135	148.7	160	331	346.2	363	363
0	0	1	1	0	1	0	134	147.6	159	332	347.3	364	364
0	1	0	0	1	1	0	128	143.3	155	338	351.6	368	368
0	1	0	1	0	0	1	122	138.9	152	344	356	371	371
0	0	0	0	1	0	1	125	137.1	149	341	357.8	374	374

0	1	1	1	0	0	0	124	137.7	148	342	357.2	375	375
0	0	1	0	1	0	0	127	135.9	145	339	359	378	378
0	1	0	1	0	1	0	117	132.3	143	349	362.6	380	380
0	0	0	0	1	1	0	120	130.5	140	346	364.4	383	383
0	0	0	1	0	0	1	114	126.1	137	352	368.8	386	386
0	0	1	1	0	0	0	116	124.9	133	350	370	390	390
0	1	0	0	1	0	0	110	120.6	129	356	374.3	394	394
0	0	0	1	0	1	0	109	119.5	128	357	375.4	395	395
0	1	0	1	0	0	0	99	109.6	117	367	385.3	406	406
0	0	0	0	1	0	0	102	107.8	114	364	387.1	409	409
0	1	1	0	0	1	1	74	92.9	107	392	402	416	416
0	0	0	1	0	0	0	91	96.8	102	375	398.1	421	421
0	0	1	0	0	1	1	66	80.1	92	400	414.8	431	431
0	1	1	0	0	0	1	56	70.2	81	410	424.7	442	442
0	1	0	0	0	1	1	49	64.8	76	417	430.1	447	447
0	1	1	0	0	1	0	51	63.6	72	415	431.3	451	451
0	0	1	0	0	0	1	48	57.4	66	418	437.5	457	457
0	0	0	0	0	1	1	41	52	61	425	442.9	462	462
0	0	1	0	0	1	0	43	50.8	57	423	444.1	466	466
0	1	0	0	0	0	1	31	42.1	50	435	452.8	473	473
0	1	1	0	0	0	0	33	40.9	46	433	454	477	477
0	1	0	0	0	1	0	26	35.5	41	440	459.4	482	482
0	0	0	0	0	0	1	23	29.3	35	443	465.6	488	488
0	0	1	0	0	0	0	25	28.1	31	441	466.8	492	492
0	0	0	0	0	1	0	18	22.7	26	448	472.2	497	497
0	1	0	0	0	0	0	8	12.8	15	458	482.1	508	508
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	466	494.9	523	523

Οι στήλες Α έως Γ(και σειρές 1 έως 128) δείχνουν τα χαρτοφυλάκια που μπορούν να παραχθούν από τις 7 εναλλακτικές πολιτικές. Ακόμη οι στήλες Η έως Ι δείχνουν τη συνολική εξοικονόμηση ενέργειας κάθε χαρτοφυλακίου για κάθε ένα από τα τρία σενάρια αντίστοιχα.

Οι στήλες Κ έως Μ απεικονίζουν τη δυσαρέσκεια(regret) κάθε χαρτοφυλακίου για κάθε σενάριο αντίστοιχα και τέλος η Ν περιλαμβάνει για κάθε χαρτοφυλάκιο τη μέγιστη από αυτές τις τιμές(max regret).

Ο στόχος μας τώρα για την επιλογή του βέλτιστου χαρτοφυλακίου υπό τον αλγόριθμο Min-Max Regret είναι να βρούμε το χαρτοφυλάκιο εκείνο που θα έχει την μικρότερη μέγιστη δυσαρέσκεια, δηλαδή την μικρότερη τιμή στη στήλη Ν και ταυτόχρονα να ικανοποιεί τον περιορισμό προϋπολογισμού. Για το λόγο αυτό αρχικά γίνεται έλεγχος περιορισμού για κάθε χαρτοφυλάκιο, όπως και στον Max-Min αλγόριθμο και

αποθηκεύουμε στην στήλη O την τιμή 1 αν το χαρτοφυλάκιο ικανοποιεί τον περιορισμό ή την τιμή 0 αν δεν ικανοποιεί τον περιορισμό προϋπολογισμού.

Τέλος, ταξινομούμε τα χαρτοφυλάκια σε αύξουσα σειρά με βάση την τιμή της μέγιστης δυσαρέσκειας και το βέλτιστο χαρτοφυλάκιο είναι αυτό το οποίο είναι πιο ψηλά στη λίστα και ταυτόχρονα έχει τιμή 1 στην στήλη O δηλαδή ικανοποιεί τον περιορισμό.

Παρακάτω φαίνεται το τελικό φύλλο του Excel απ' όπου λαμβάνουμε το βέλτιστο χαρτοφυλάκιο.

**Πίνακας 11-Πίνακας Βέλτιστου Χαρτοφυλακίου Min-Max Regret**

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
1	0	1	1	1	1	0	466	494.9	523	0	0	0	0	1
1	0	0	1	1	1	1	464	496.1	527	2	1.2	4	4	0
1	0	1	1	1	0	1	471	501.5	532	5	6.6	9	9	0
1	1	1	1	1	0	0	456	485	512	10	9.9	11	11	1
1	1	0	1	1	0	1	454	486.2	516	12	8.7	7	12	0
1	1	1	1	1	1	0	474	507.7	538	8	12.8	15	15	0
1	1	0	1	1	1	0	449	479.6	507	17	15.3	16	17	1
1	1	0	1	1	1	1	472	508.9	542	6	14	19	19	0
1	0	0	1	1	0	1	446	473.4	501	20	21.5	22	22	0
1	1	1	1	1	0	1	479	514.3	547	13	19.4	24	24	0
1	0	1	1	1	0	0	448	472.2	497	18	22.7	26	26	1
1	0	0	1	1	1	0	441	466.8	492	25	28.1	31	31	1
1	0	1	1	1	1	1	489	524.2	558	23	29.3	35	35	0
1	1	0	1	1	0	0	431	456.9	481	35	38	42	42	1
1	1	1	1	1	1	1	497	537	573	31	42.1	50	50	0

Όπως φαίνεται από το φύλλο του Excel το βέλτιστο χαρτοφυλάκιο όπως αυτό προκύπτει από τον αλγόριθμο Min-Max Regret είναι το  $\mathbf{X}=(1,0,1,1,1,1,0)$ .

Αξίζει να παρατηρήσουμε στο σημείο αυτό ότι από τα συγκεκριμένα 7 μέτρα που έθεσαν υποψηφιότητα για το βέλτιστο χαρτοφυλάκιο, το συγκεκριμένο που προκύπτει από τον Min-Max Regret παρουσιάζει μηδενική δυσαρέσκεια κάτω από όλα τα πιθανά σενάρια, επομένως είναι η καλύτερη λύση που μπορεί να βρεθεί στα πλαίσια αυτού του αλγορίθμου.



# 6

## Αποτελέσματα και

## Προοπτικές

### 6.1 Ανάλυση Επιλεγμένων Κλιματικών Πολιτικών

Η εφαρμογή των παραπάνω αλγορίθμων Max-Min και Min-Max Regret μας οδήγησε στο να βρούμε το βέλτιστο χαρτοφυλάκιο σε κάθε περίπτωση κάτω από 3 διαφορετικά σενάρια για τις τιμές της εξοικονόμησης ενέργειας σε κάθε μέτρο κλιματικής πολιτικής.

Κατ'αρχάς, ο Max-Min αλγόριθμος μας επέστρεψε το χαρτοφυλάκιο που προσδιορίζεται από το διάνυσμα  $x = (1,0,1,1,1,1,0)$ . Το χαρτοφυλάκιο αυτό περιλαμβάνει τα εξής μέτρα τα οποία επιλέχθηκαν από το σύνολο των δυνατών προς επιλογή μέτρων που απεικονίζονται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 12-Επιλεγμένα Μέτρα Πολιτικής

Νούμερο	Μέτρα Κλιματικής Πολιτικής	Εξοικονόμηση Ενέργειας-Απαισιόδοξο Σενάριο(ktoe)	Εξοικονόμηση Ενέργειας-Μεσαίο Σενάριο (ktoe)	Εξοικονόμηση Ενέργειας-Αισιόδοξο Σενάριο (ktoe)	Προϋπολογισμός (εκατ. €)
1	Ενεργειακή Αναβάθμιση Κατοικιών	230	239.5	250	342
2	Ενεργειακή Αναβάθμιση Δημοσίων Κτιρίων	8	12.8	15	99
3	Εφαρμογή Συστήματος Ενεργειακής Διαχείρισης με βάση το πρότυπο ISO 50001 σε φορείς του δημοσίου	25	28.1	31	95

	Ανάπτυξη Ευφυών Συστημάτων Μέτρησης				
4	Ενέργειας	91	96.8	102	170
	Συμψηφισμός προστίμων αυθαιρέτων με εργασίες ενεργειακής αναβάθμισης				
5	Αντικατάσταση Παλαιών Επιβατηγών	102	107.8	114	4.5
6	Επέκταση του Μετρό της Αθήνας	18	22.7	26	108
7		23	29.3	35	358

Παραπάνω υπογραμμισμένα φαίνονται τα μέτρα που θα συμπεριλάβουμε στο χαρτοφυλάκιο και τα οποία είναι:

- Ενεργειακή Αναβάθμιση Κατοικιών
- Εφαρμογή συστήματος ενεργειακής διαχείρισης με βάση το πρότυπο ISO 50001 σε φορείς του Δημοσίου και ευρύτερου δημοσίου τομέα
- Ανάπτυξη ευφυών συστημάτων μέτρησης ενέργειας
- Συμψηφισμός προστίμων αυθαιρέτων με εργασίες ενεργειακής αναβάθμισης
- Αντικατάσταση παλαιών επιβατικών οχημάτων ιδιωτικής χρήσης(I.X.)

Πιο αναλυτικά η ενεργειακή αναβάθμιση κατοικιών που είναι και το πρώτο μέτρο που συμπεριλαμβάνεται στο χαρτοφυλάκιο πρόκειται για ένα μεγάλο και φιλόδοξο έργο το οποίο έχει σκοπό να εφαρμοστεί σε 200.000 κατοικίες μέχρι και το 2020 αποφέροντας έτσι εξοικονόμηση ενέργειας στο χειρότερο σενάριο 230 ktoe που είναι και η μεγαλύτερη συγκριτικά με τις υπόλοιπες επιλογές ακόμα και στο πιο αισιόδοξο σενάριό τους. Με την εφαρμογή του μέτρου αυτού ο ιδιοκτήτης μιας κατοικίας (είτε πρόκειται για μονοκατοικία, είτε για πολυκατοικία, είτε για μεμονωμένο διαμέρισμα) μπορεί να βελτιώσει την εξωτερική της μόνωση, να αντικαταστήσει τα παλαιά της κουφώματα και να εγκαταστήσει σύγχρονα συστήματα θέρμανσης. Με τον τρόπο αυτό, όχι μόνο θα εξασφαλίσει χαμηλότερη κατανάλωση ενέργειας με αποτέλεσμα να δαπανά λιγότερα χρήματα για τις ενεργειακές ανάγκες του σπιτιού του, αλλά παράλληλα θα πετύχει να αυξήσει αυτή καθ' αυτή την αξία του ακινήτου μέσω της ένταξής του σε υψηλότερη ενεργειακή κλάση. Σημειώνεται πως οι κατοικίες ανάλογα με τις ενεργειακές τους επιδόσεις κατατάσσονται σε επτά κατηγορίες (από την κατηγορία Α που είναι η πιο αποδοτική ενεργειακά μέχρι την Η που έχει τη χαμηλότερη ενεργειακή

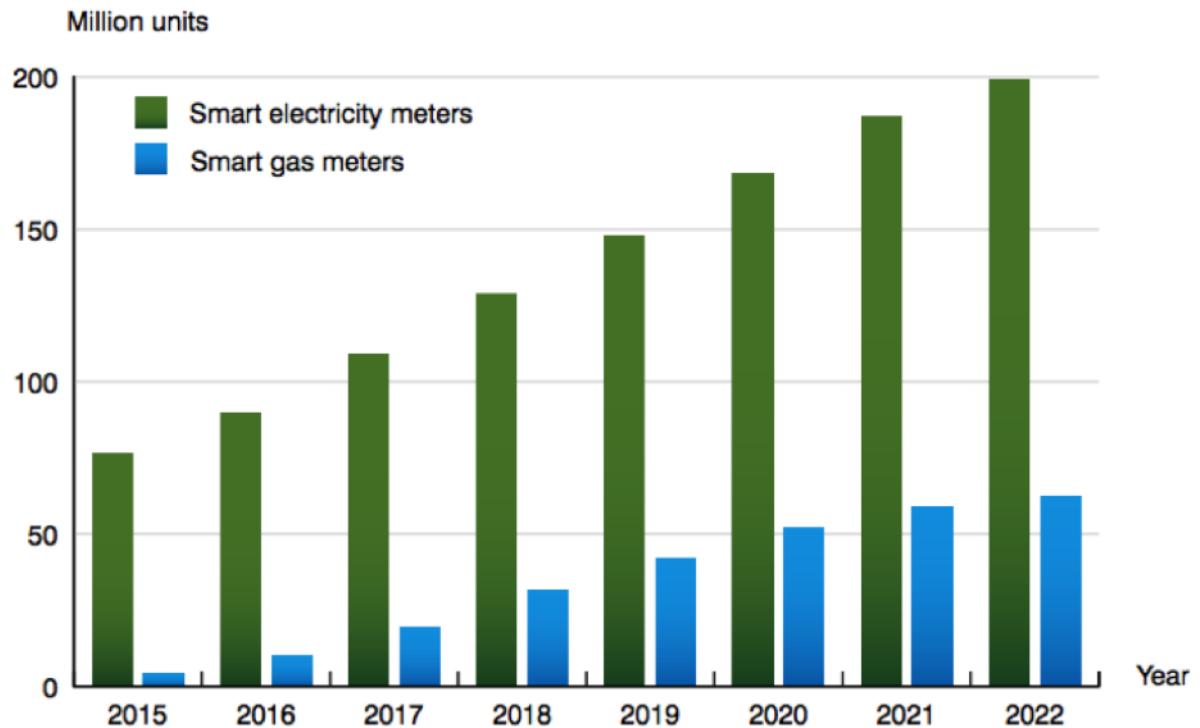
απόδοση). Το πρόγραμμα αυτό έρχεται ως συνέχεια του προγράμματος «Εξοικονομώ κατ' οίκον» που είχε εφαρμοστεί την περίοδο 2011-2016 και έτσι μέχρι σήμερα οι επιλέξιμες εργασίες αφορούσαν τρεις βασικούς τομείς.

1. τοποθέτηση θερμομόνωσης στο κέλυφος του ακινήτου, συμπεριλαμβανομένου του δώματος - στέγης και της πιλοτής
2. αντικατάσταση κουφωμάτων και τοποθέτηση συστημάτων σκίασης
3. αναβάθμιση του συστήματος θέρμανσης και παροχής ζεστού νερού χρήσης

Ακόμη, η δεύτερη πολιτική η οποία επιλέγεται είναι η Εφαρμογή συστήματος ενεργειακής διαχείρισης με βάση το πρότυπο ISO 50001 σε φορείς του Δημοσίου και ευρύτερου δημοσίου τομέα. Το παραπάνω μέτρο είναι πολύ σημαντικό διότι, εκτός από την εξοικονόμηση ενέργειας έχουν πολλαπλά οφέλη όπως, αύξηση της αξίας του ακινήτου, μείωση της «Ενεργειακής Φτώχειας», νέες θέσεις εργασίας, βελτίωση της ποιότητας του αέρα και άρα όφελος για την υγεία. Επιπλέον, προωθείται η ενεργειακή ασφάλεια αφού θα μειωθούν οι εισαγωγές ενέργειας και οι επενδύσεις για νέους σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και τέλος θα ενισχυθεί ο κατασκευαστικός κλάδος, όπως επίσης και κάποιοι κλάδοι βιομηχανικής παραγωγής (αλουμίνια, θερμομόνωση κλπ).

Η τρίτη ενεργειακή πολιτική που αποτελεί μέρος του βέλτιστου χαρτοφυλακίου είναι η Ανάπτυξη Ευφυών Συστημάτων Μέτρησης Ενέργειας. Τα ευφυή συστήματα καταμέτρησης έχουν δυνατότητες μέτρησης ενέργειας, τάσης, συχνότητας, κ.α., καθώς και δυνατότητα αμφίδρομης επικοινωνίας μέσω τηλεπικοινωνιακών μέσων με κέντρα συλλογής, αποθήκευσης, επεξεργασίας και διαχείρισης πληροφοριών. Οι μετρήσεις αυτές προορίζονται κυρίως για τον πάροχο του ηλεκτρικού ρεύματος, όπου μέσω του Smart metering μπορεί να κάνει έξυπνη διαχείριση του ηλεκτρικού δικτύου.

Το παραπάνω μέτρο το οποίο και αυτό θα έχει πολλαπλά οφέλη για τους καταναλωτές έχει ψηφιστεί στο πλαίσιο πιλοτικής εφαρμογής στην Ελλάδα σε καταναλωτές χαμηλής τάσης με σκοπό να γίνει ανάλυση των αποτελεσμάτων και να διερευνηθεί η ανάπτυξη τέτοιων συστημάτων σε πανελλαδική κλίμακα. Αξίζει να σημειωθεί ότι τα συστήματα αυτά έχουν γίνει πολύ δημοφιλή στην Ευρώπη με ανοδικούς ρυθμούς να καταγράφονται στη Δυτική Ευρώπη, που θα φθάσει σε μια πρόωρη ωρίμανση τα επόμενα χρόνια ενώ ακολουθεί με ανάμεικτες τάσεις υιοθέτησης η Κεντρική και Ανατολική Ευρώπη. Η παραπάνω τάση επιβεβαιώνεται και από την γραφική παράσταση που ακολουθεί.



**Εικόνα 12- Χρήση Ευφυών Συστημάτων Μέτρησης Ενέργειας στην Ευρώπη**

Σύμφωνα με τις εκτιμήσεις της έρευνας, έως τα τέλη του 2016, το ένα τρίτο των 283 εκατ. καταναλωτών ηλεκτρικής ενέργειας και φυσικού αερίου (έναν στους τρεις καταναλωτές ενέργειας στην Ευρώπη) θα διαθέτει τουλάχιστον έναν έξυπνο μετρητή. Το ποσοστό αυτό εκτιμάται ότι θα διπλασιαστεί έως το 2020, καθώς τα συστήματα smart metering θα γίνονται όλο και πιο δημοφιλή μεταξύ των Ευρωπαίων καταναλωτών.

Στο βέλτιστο χαρτοφυλάκιο επιλέγεται σαν τέταρτη πολιτική ο συμψηφισμός προστίμων αυθαιρέτων με εργασίες ενεργειακής αναβάθμισης. Ο συμψηφισμός θα αφορά αμοιβές υπηρεσιών, εργασίες και υλικά για την ενεργειακή αναβάθμιση κατασκευών προ του έτους 2003, καθώς και για την στατική επάρκειά τους. Βάσει των αποφάσεων, οι εργασίες και δαπάνες που καλύπτονται, αφορούν για τη μεν ενεργειακή αναβάθμιση την κάλυψη των ελάχιστων απαιτήσεων του Κανονισμού Ενεργειακής Απόδοσης Κτιρίων (KENAK), για τη δε στατική επάρκεια τις εργασίες και δαπάνες για την κάλυψη των ελάχιστων απαιτήσεων φέρουσας ικανότητας σύμφωνα με τον Κανονισμό Επεμβάσεων (KANEΠΕ). Ειδικά για την ενεργειακή αναβάθμιση θα ακολουθηθεί το πρότυπο του «εξοικονομώ κατ' οίκον». Ο συμψηφισμός διενεργείται για ποσό έως το πενήντα τοις εκατό (50%) του ειδικού προστίμου μη συμπεριλαμβανομένου του σχετικού παραβόλου και εφόσον οι παρεμβάσεις επιφέρουν αναβάθμιση του κτιρίου κατά μια τουλάχιστον ενεργειακή κατηγορία, ή ετήσια εξοικονόμηση πρωτογενούς ενέργειας μεγαλύτερη από 30% της κατανάλωσης του κτιρίου αναφοράς. Το παραπάνω μέτρο είναι πολύ σημαντικό και επιλέγεται εκτός των άλλων και για το μεγάλο συντελεστή εξοικονόμησης ενέργειας προς κόστος που έχει συγκριτικά με τα υπόλοιπα.



Το τελευταίο μέτρο εξοικονόμησης ενέργειας του βέλτιστου χαρτοφυλακίου είναι η Αντικατάσταση παλαιών επιβατικών οχημάτων ιδιωτικής χρήσης(I.X.). Το μέτρο αυτό έχει ήδη αρχίσει να εφαρμόζεται ως ένα βαθμό στην Ελλάδα και αποτελεί κάτι το οποίο ήταν αναγκαίο την εξοικονόμηση ενέργειας και για το λόγο αυτό βρίσκεται στις προτιμήσεις των καταναλωτών. Συγκεκριμένα, το προοίμιο του μέτρου αυτού υπερψηφίστηκε για το έτος 2016 και προβλέπεται απαλλαγή από το τέλος ταξινόμησης των καινούργιων επιβατικών αυτοκινήτων ΙΧ. μέχρι 2.000 κυβικά εκατοστά, φορολογητέας αξίας μέχρι 20.000 ευρώ, εφόσον παραλαμβάνονται σε αντικατάσταση παλαιών αυτοκινήτων των οποίων η άδεια έχει εκδοθεί μέχρι 31/12/2001.

## 6.2 Ερμηνεία Αποτελεσμάτων

Τα μέτρα κλιματικών πολιτικών που επιλέχθηκαν από τους αλγορίθμους βρίσκουν τη καλύτερη εξοικονόμηση ενέργειας στο χειρότερο σενάριο και την καλύτερη απόκλιση από την βέλτιστη λύση αντίστοιχα. Παρατηρούμε ότι οι κλιματικές πολιτικές που δεν εντάχθηκαν στο χαρτοφυλάκιο είναι αφ' ενός η ενεργειακή αναβάθμιση δημοσίων κτιρίων και αφ' ετέρου η επέκταση του μετρό της Αθήνας. Υπογραμμίζουμε ότι αυτά δεν επιλέχθηκαν όχι επειδή δεν είναι σημαντικά έργα αλλά γιατί το κριτήριο στην συγκεκριμένη εφαρμογή ήταν η εξοικονόμηση ενέργειας σε σχέση με το αντίστοιχο κόστος. Συγκεκριμένα, η ενεργειακή αναβάθμιση δημοσίων κτιρίων είχε την μικρότερη εξοικονόμηση ενέργειας σε σχέση με όλα τα υπόλοιπα μέτρα ακόμα και στο πιο ευνοϊκό σενάριο. Το γεγονός αυτό σε συνδυασμό με το ότι χρειαζόταν ένα budget 99 εκατομμυρίων για την υλοποίησή του οδήγησε και τους δύο αλγορίθμους να μην το συμπεριλάβουν στο χαρτοφυλάκιο της λύσης. Ακόμη, η επέκταση του μετρό της Αθήνας απαιτούσε την μεγαλύτερη θυσία στον προϋπολογισμό συγκριτικά με τις υπόλοιπες πολιτικές, με αναμενόμενο κόστος περί τα 358 εκατομμύρια ευρώ, χωρίς να έχει μεγάλο αντίκτυπο στην εξοικονόμηση ενέργειας στην περίπτωση που συμπεριλαμβανόταν και για αυτό το λόγο δεν επιλέχθηκε από τους δύο αλγορίθμους.

Από την άλλη πλευρά, εντυπωσιακή είναι η συνεισφορά του μέτρου που αφορά συμψηφισμό προστίμων αυθαιρέτων με εργασίες ενεργειακής αναβάθμισης στο χαρτοφυλάκιο καθώς εξοικονομείται σε πολύ μεγάλο βαθμό ενέργεια και ταυτόχρονα το κόστος είναι ελάχιστο(4.5 εκατομμύρια). Επιπλέον, συμπεριλαμβάνεται στο τελικό χαρτοφυλάκιο και στους δύο αλγορίθμους η ενεργειακή αναβάθμιση κατοικιών παρότι έχει το μεγαλύτερο κόστος σε σχέση με τα υπόλοιπα μέτρα, αφού η εξοικονόμηση ενέργειας που έχει στη μέση περίπτωση είναι διπλάσια σε σχέση με κάθε άλλο μέτρο. Αντίστοιχη περίπτωση αποτελεί η Ανάπτυξη Ευφυών Συστημάτων Μέτρησης Ενέργειας με σχεδόν 97 ktoe εξοικονόμηση ενέργειας. Το χαρτοφυλάκιο συμπληρώνουν η εφαρμογή συστήματος ενεργειακής διαχείρισης με βάση το πρότυπο ISO 50001 σε φορείς του Δημοσίου και ευρύτερου δημοσίου τομέα και η αντικατάσταση παλαιών επιβατηγών οχημάτων με συνολική εξοικονόμηση περί τα 50 ktoe ενέργειας.

Όσον αφορά τον αλγόριθμο Max-Min παρατηρούμε από τον Πίνακα 2 του excel ότι επιλέγεται το 7<sup>ο</sup> καλύτερο χαρτοφυλάκιο αλλά το 1<sup>ο</sup> το οποίο εναρμονίζεται με τον επιλεγμένο προϋπολογισμό. Όλα τα χαρτοφυλάκια τα οποία εξασφαλίζουν καλύτερη εξοικονόμηση ενέργειας στην χειρότερη περίπτωση δεν μπορούν να καλυφθούν από τον υπάρχοντα προϋπολογισμό. Οι περιπτώσεις αυτές αφορούν χαρτοφυλάκια που επιλέγονται όλες οι πολιτικές, ή σχεδόν όλες. Μάλιστα το επιλεγμένο χαρτοφυλάκιο είναι το 2<sup>ο</sup> καλύτερο από άποψη εξοικονόμησης ενέργειας σε χαρτοφυλάκια με 5 επιλεγόμενες πολιτικές, καθώς το άλλο δεν κάλυπτε τον περιορισμό του budget. Ως εκ τούτου συμπαίρνουμε ότι ακόμα και με τον περιορισμό αυτό το χαρτοφυλάκιο που παράγεται είναι από τα καλύτερα δυνατά ακόμα και αν είχαμε άπειρο προϋπολογισμό.

Αξίζει να σημειωθεί ότι στην συγκεκριμένη μελέτη περίπτωσης που εκτελέσαμε οι Max-Min και Min-Max Regret δίνουν ως αποτέλεσμα το ίδιο χαρτοφυλάκιο και αυτό αποτελεί γνώμονα για την σταθερότητα και ευστάθεια του χαρτοφυλακίου απέναντι στην αβεβαιότητα.

Μάλιστα, όπως φαίνεται από τον Πίνακα 4 του excel για τον Min-Max Regret το χαρτοφυλάκιο αυτό είναι το 1<sup>ο</sup>, δηλαδή το καλύτερο δυνατό όσον αφορά την απόσταση από την βέλτιστη λύση(δυσαρέσκεια-regret). Για την ακρίβεια το επιλεγμένο χαρτοφυλάκιο στην περίπτωσή μας είναι το βέλτιστο δυνατό, με βάση τον προϋπολογισμό μας, εφόσον η δυσαρέσκεια είναι 0. Αυτό σημαίνει ότι, μεταξύ των χαρτοφυλακίων που ικανοποιούν τον περιορισμό προϋπολογισμού το χαρτοφυλάκιο μας, δίνει την βέλτιστη λύση, για κάθε δυνατό σενάριο κάτι το οποίο δεν συμβαίνει συχνά στην βελτιστοποίηση χαρτοφυλακίου.

Ως εκ τούτου, καταλήγουμε ότι το χαρτοφυλάκιο το οποίο αποτέλεσε λύση και των δύο αλγορίθμων συγκεντρώνει μεγάλο βαθμό αξιοπιστίας και ευστάθειας κάτω από τους ευμετάβλητους οικονομικούς παράγοντες αβεβαιότητας οι οποίοι υπάρχουν στη χώρα μας τη δεδομένη περίοδο και για το λόγο αυτό προτείνουμε την εφαρμογή τους.

# 7

## 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.
- Allan, G., Eromenko, I., McGregor, P., & Swales, K. (2011). The regional electricity generation mix in Scotland: A portfolio selection approach incorporating marine technologies. *Energy Policy*, 39(1), 6-22.
- 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.
- Awerbuch, S. (2000). Investing in photovoltaics: risk, accounting and the value of new technology. *Energy Policy*, 28(14), 1023-1035.
- Awerbuch, S. (2006). Portfolio-based electricity generation planning: policy implications for renewables and energy security. *Mitigation and adaptation strategies for Global Change*, 11(3), 693-710. ISO 690
- Awerbuch, S., & Berger, M. (2003). Applying portfolio theory to EU electricity planning and policy making. In IAEA/EET Working Paper No. 03, EET.
- Awerbuch, S., Stirling, A., Jansen, J. C., Beurskens, L. W., Karyl, B. L., & David, L. B. (2006). Full-spectrum portfolio and diversity analysis of energy technologies. *Managing Enterprise Risk*, 202-222.
- 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.

- Barron, R., Djimadoumbaye, N., & Baker, E. (2014). How grid integration costs impact the optimal R&D portfolio into electricity supply technologies in the face of climate change. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 7, 22-29.
- Bhattacharya, A., & Kojima, S. (2012). Power sector investment risk and renewable energy: A Japanese case study using portfolio risk optimization method. *Energy Policy*, 40, 69-80.
- 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.
- Chalvatzis, K. J., & Rubel, K. (2015). Electricity portfolio innovation for energy security: The case of carbon constrained China. *Technological Forecasting and Social Change*, 100, 267-276.
- 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.
- Delarue, E., De Jonghe, C., Belmans, R., & D'haeseleer, W. (2011). Applying portfolio theory to the electricity sector: Energy versus power. *Energy Economics*, 33(1), 12-23.
- 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.
- Fuss, S., Szolgayová, J., Khabarov, N., & Obersteiner, M. (2012). Renewables and climate change mitigation: Irreversible energy investment under uncertainty and portfolio effects. *Energy Policy*, 40, 59-68.
- Hua, S., Liang, J., Zeng, G., Xu, M., Zhang, C., Yuan, Y., ... & Huang, L. (2015). How to manage future groundwater resource of China under climate change and urbanization: An optimal stage investment design from modern portfolio theory. *Water research*, 85, 31-37.
- Huang, Y. H., & Wu, J. H. (2008). A portfolio risk analysis on electricity supply planning. *Energy policy*, 36(2), 627-641.

- 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.
- Laurikka, H., & Springer, U. (2003). Risk and return of project-based climate change mitigation: a portfolio approach. *Global Environmental Change*, 13(3), 207-217.
- Lemoine, D. M., Fuss, S., Szolgayova, J., Obersteiner, M., & Kammen, D. M. (2012). The influence of negative emission technologies and technology policies on the optimal climate mitigation portfolio. *Climatic change*, 113(2), 141-162.
- Lintunen, J., & Uusivuori, J. (2016). On the economics of forests and climate change: Deriving optimal policies. *Journal of Forest Economics*, 24, 130-156.
- Liu, M., & Wu, F. F. (2007). Portfolio optimization in electricity markets. *Electric Power systems research*, 77(8), 1000-1009.
- Luo, C., & Wu, D. (2016). Environment and economic risk: An analysis of carbon emission market and portfolio management. *Environmental research*, 149, 297-301.
- Marinoni, O., Adkins, P., & Hajkowicz, S. (2011). Water planning in a changing climate: Joint application of cost utility analysis and modern portfolio theory. *Environmental Modelling & Software*, 26(1), 18-29.
- Markowitz, H. M. (1991). Foundations of portfolio theory. *The journal of finance*, 46(2), 469-477.
- 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.
- McLohglin, E., & Bazilian, M. (2006). Application of Portfolio Analysis to the Irish Generating Mix in 2020.
- 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.
- Muñoz, J. I., de la Nieta, A. A. S., Contreras, J., & Bernal-Agustín, J. L. (2009). Optimal investment portfolio in renewable energy: The Spanish case. *Energy Policy*, 37(12), 5273-5284.

- Nazari, M. S., Maybee, B., Whale, J., & McHugh, A. (2015). Climate policy uncertainty and power generation investments: A real options-CVaR portfolio optimization approach. *Energy Procedia*, 75, 2649-2657.
- 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.
- Roques, F. A., Newbery, D. M., & Nuttall, W. J. (2008). Fuel mix diversification incentives in liberalized electricity markets: A Mean-Variance Portfolio theory approach. *Energy Economics*, 30(4), 1831-1849.
- 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.
- Shacheur, V., Kamp, L. M., & Negro, S. O. (2013). A comparative analysis of Photovoltaic Technological Innovation Systems including international dimensions: the cases of Japan and The Netherlands. *Journal of Cleaner Production*, 48, 200-210.
- 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.
- Springer, U. (2003). Can the risks of the Kyoto mechanisms be reduced through Portfolio diversification? Evidence from the Swedish AIJ Program. *Environmental and Resource Economics*, 25(4), 501-513.
- Springer, U., & Laurikka, H. (2002). Quantifying risks and risk correlations of investments in Climate Change Mitigation. University of St. Gallen, Institute for Economy and the Environment (IWOe-HSG).

- Van Asseldonk, M. A., & Langeveld, J. W. A. (2007). Coping with climate change in agriculture: A portfolio analysis. Seminar Paper.
- Xidonas, P., Doukas, H., Mavrotas, G., & Pechak, O. (2016). Environmental corporate responsibility for investments evaluation: an alternative multi-objective programming model. *Annals of Operations Research*, 247(2), 395-413.
- 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.
- White, B. (2007). A mean-variance portfolio optimization of California's generation mix to 2020: Achieving California's 33 percent renewable portfolio standard goal. Draft Consultant Report.
- Zhu, L., & Fan, Y. (2010). Optimization of China's generating portfolio and policy implications based on portfolio theory. *Energy*, 35(3), 1391-1402.
- Ziegler, D., Schmitz, K., & Weber, C. (2012). Optimal electricity generation portfolios. *Computational Management Science*, 9(3), 381-399.
- 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).
- Εθνικό Σχέδιο Δράσης Ενεργειακής Απόδοσης.(2014). Ανακτήθηκε από <https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/20142207.pdf>