



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΧΗΜΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ & ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ

ΔΙΕΡΓΑΣΙΩΝ & ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ & ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗΣ ΟΙΚΟΝΟΜΙΑΣ

**Σύγχρονη Θεωρία Χαρτοφυλακίου
στη διαμόρφωση του μίγματος ηλεκτροπαραγωγής
στην Ευρωπαϊκή Ένωση**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Στογιάννος Παναγιώτης

Επιβλέπων: Μαυρωτάς Γεώργιος
Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Φεβρουάριος 2012

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στο Εργαστήριο Βιομηχανικής & Ενεργειακής Οικονομίας της Σχολής Χημικών Μηχανικών, υπό την επίβλεψη του Επ. Καθηγητή Γ. Μαυρωτά.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον Κο Μαυρωτά για την ευκαιρία που μου πρόσφερε να ασχοληθώ με τον πολύ ενδιαφέροντα τομέα της ενεργειακής πολιτικής καθώς και για τη συνεχή καθοδήγηση και ουσιαστική υποστήριξη του καθ' όλη τη διάρκεια υλοποίησης της εργασίας αυτής.

Αθήνα, Φεβρουάριος 2012

Στογιάννος Παναγιώτης

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία, γίνεται εφαρμογή των αρχών της Σύγχρονης Θεωρίας Χαρτοφυλακίου για τη διαμόρφωση του μίγματος ηλεκτροπαραγωγής της Ευρωπαϊκής Ένωσης για το 2020. Το χρησιμοποιούμενο μοντέλο προέρχεται από αντίστοιχη μελέτη των Awerbuch και Berger (2003), με τη διαφορά ότι σε αυτή την περίπτωση κριτήριο για το ρίσκο δεν είναι η διακύμανση, αλλά η μέση απόλυτη απόκλιση (Mean Absolute Deviation, MAD). Για τα δεδομένα εισόδου γίνεται εν μέρει παραγωγή χρονοσειρών με δειγματοληψία Monte Carlo με βάση προδιαγραφές ορισμένες από τη βιβλιογραφία, ενώ γίνεται εφαρμογή για τρία εναλλακτικά σενάρια. Τα αποτελέσματα αναδεικνύουν τη σημασία της αύξησης του ποσοστού των ΑΠΕ στο ηλεκτροπαραγωγικό μίγμα της ΕΕ. Επίσης, ελέγχεται η αξιοπιστία της μεθόδου και τα αποτελέσματα συγκρίνονται με το μοντέλο μέσης-τιμής διακύμανσης.

Λέξεις-Κλειδιά: Σύγχρονη Θεωρία Χαρτοφυλακίου (ΣΘΧ), Αποδοτικό Μέτωπο, Ενεργειακός Σχεδιασμός, Ηλεκτροπαραγωγικό Μίγμα, Ευρωπαϊκή Ένωση, Μέση Απόλυτη Απόκλιση (MAD)

ABSTRACT

On this thesis, Modern Portfolio Theory is applied to the generating mix of the European Union for 2020. The model used originates from the respective study of Awerbuch and Berger (2003), with the difference that in this case risk is not minimized through variance, but with the use of Mean Absolute Deviation (MAD). Input data is partly generated by Monte Carlo sampling to meet standards set from the literature and the model is applied for three alternative scenarios. The results highlight the importance of increasing the share of RES in the generating mix of EU. Furthermore, the reliability of the method is verified and the results are compared to the mean-variance model.

Keywords: Modern Portfolio Theory (MPT), Efficient Frontier, Energy Planning, Generating Mix, European Union, Mean Absolute Deviation (MAD)

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	8
2. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΚΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ	9
2.1 Η ΣΥΓΧΡΟΝΗ ΘΕΩΡΙΑ ΧΑΡΤΟΦΥΛΑΚΙΟΥ	9
2.1.1 Εισαγωγή	9
2.1.2 Οι έννοιες της απόδοσης και του ρίσκου	9
2.1.3 Επίδραση χαρτοφυλακίου (Portfolio effect)	14
2.1.4 Η επίδραση ενός ακίνδυνου χρεογράφου	16
2.1.5 Κριτική ενάντια στη Σύγχρονη Θεωρία Χαρτοφυλακίου	18
2.1.6 Μοντέλα Προγραμματισμού	19
2.2 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΗΣ ΣΥΓΧΡΟΝΗΣ ΘΕΩΡΙΑΣ ΧΑΡΤΟΦΥΛΑΚΙΟΥ ΣΤΟΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΟ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟ	22
2.2.1 Ο ρόλος του ρίσκου στον ενεργειακό σχεδιασμό και οι ΑΠΕ	22
2.2.2 Προβλήματα κατά την εφαρμογή της ΣΘΧ για το μίγμα ηλεκτροπαραγωγής	24
2.2.3 Εφαρμογές της ΣΘΧ στον ενεργειακό σχεδιασμό	25
3. ΜΕΛΕΤΗ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗΣ. Το ηλεκτροπαραγωγικό μίγμα της ΕΕ το 2020.	29
3.1 Η ενεργειακή πολιτική της ΕΕ	29
3.2 Το μοντέλο του Awerbuch στη μελέτη για το ενεργειακό χαρτοφυλάκιο της ΕΕ το 2003 και οι τροποποιήσεις	32
3.2.1 Ρίσκο	32
3.2.2 Απόδοση και Κόστος	33
3.2.3 Δεδομένα εισόδου	34
4. ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ	36
4.1 Κόστος τεχνολογιών-SETIS Energy Calculator	36
4.2 Ρίσκο	39
4.3 Μέθοδος παραγωγής των χρονοσειρών μέσω παραγοντοποίησης Cholesky	41
5. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ	43
5.1 Σενάριο Αναφοράς	43
5.1.1 Ρίσκο λόγω τιμών καυσίμων	43
5.1.2 Υπολογισμός Ρίσκου από όλους τους παράγοντες κόστους	45
5.1.3 Εισαγωγή Περιορισμών	48
5.2 Σενάριο Υψηλών Τιμών Καυσίμων	51
5.3 Σενάριο Υψηλού Κόστους CO ₂	53
5.4 Ευστάθεια αποτελεσμάτων	55

5.5 Σύγκριση με το μοντέλο μέσης τιμής-διακύμανσης	57
5.6 Εξαγωγή άνω και κάτω ορίων για το κόστος χαρτοφυλακίου.....	59
6. ΣΥΖΗΤΗΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ	61
6.1 Αποτελέσματα σχετικά με την Ενεργειακή Πολιτική της ΕΕ	61
6.2 Αποτελέσματα σχετικά με τη μέθοδο και τη μοντελοποίηση	62
7. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΜΕΛΕΤΗΣ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗΣ ΕΡΕΥΝΑΣ	64
8. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	66
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ	71
Π.1 Κώδικας GAMS.....	71
Π.2 Προβλεπόμενα κόστη με βάση το SETIS-Calculator	78
Π.3 Παράδειγμα παραγωγής χρονοσειρών μέσω παραγοντοποίησης Cholesky και δειγματοληψίας Monte Carlo	79
Π.4 Χρονοσειρές.....	81

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ, ΓΡΑΦΗΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΠΙΝΑΚΩΝ

Γράφημα 2.1: Συμπεριφορά χρεογράφων στο χρόνο με συσχέτιση $\rho=1$ ή $\rho=-1$	12
Σχήμα 2.1: Γραφική Αναπαράσταση του Αποδοτικού Μέτωπου	13
Σχήμα 2.2: Συνοπτική διαδικασία εφαρμογής της ΣΘΧ.....	13
Σχήμα 2.3: Η Επίδραση Χαρτοφυλακίου για ένα χαρτοφυλάκιο με δύο χρεόγραφα.....	14
Σχήμα 2.4: Πιθανά αποδοτικά χαρτοφυλάκια και ο συνδυασμός απόδοσης/ρίσκου	15
Σχήμα 2.5: Η επίδραση του συντελεστή συσχέτιση στα εφικτά χαρτοφυλάκια δύο χρεογράφων	16
Σχήμα 2.6: Η επίδραση της εισαγωγής στο χαρτοφυλάκιο ενός ακίνδυνου χρεογράφου	17
Πίνακας 3.1: Υπολογισμός του ρίσκου για τους παράγοντες κόστους κατά Awerbuch (2003)	35
Πίνακας 4.1: Επιλεγμένες τεχνολογίες ανά πηγή ενέργειας	37
Πίνακας 4.2: Κόστος τεχνολογιών για το σενάριο μέτριων τιμών καυσίμων.....	38
Πίνακας 4.3: Κόστος τεχνολογιών για το σενάριο υψηλών τιμών καυσίμων	38
Πίνακας 4.4: Κόστος τεχνολογιών για το σενάριο υψηλής τιμής CO ₂	39
Πίνακας 4.5: Συντελεστές συσχέτισης και τυπικές αποκλίσεις για το κόστος λειτουργίας και συντήρησης. Πηγή: Awerbuch και Berger (2003)	40
Πίνακας 4.6: Συντελεστές συσχέτισης και τυπικές αποκλίσεις για το κόστος επένδυσης..... Πηγή: Awerbuch και Berger (2003).....	40
Πίνακας 4.7: Συντελεστές συσχέτισης και τυπικές αποκλίσεις για το κόστος επένδυσης..... Πηγή: Awerbuch και Berger (2003).....	40
Γράφημα 5.1: Αποδοτικό μέτωπο με υπολογισμό ρίσκου βάση τιμών καυσίμου.....	44
Γράφημα 5.2: Συστάσεις αποδοτικών χαρτοφυλακίων με υπολογισμό ρίσκου βάση τιμών καυσίμου	45
Γράφημα 5.3: Σύγκριση σύστασης χαρτοφυλακίου EU2020 με συστάσεις αποδοτικών χαρτοφυλακίων	45
Γράφημα 5.4: Αποδοτικά μέτωπα (i) με υπολογισμό ρίσκου βάση τιμών καυσίμου (ii) με ολοκληρωμένο υπολογισμό ρίσκου.....	46
Γράφημα 5.5: Αποδοτικό μέτωπο με ολοκληρωμένο υπολογισμό ρίσκου	46
Γράφημα 5.6: Συστάσεις αποδοτικών χαρτοφυλακίων με ολοκληρωμένο υπολογισμό ρίσκου	47
Γράφημα 5.7: Σύγκριση σύστασης χαρτοφυλακίου EU2020 με συστάσεις αποδοτικών χαρτοφυλακίων	47
Γράφημα 5.8: Αποδοτικό μέτωπο και μη διαφοροποιημένα χαρτοφυλάκια	48
Πίνακας 5.1: Άνω και κάτω όρια για τα ποσοστά συμμετοχής τεχνολογιών στο μίγμα	49
Γράφημα 5.9: Αποδοτικά μέτωπα με ολοκληρωμένο υπολογισμό ρίσκου (i) χωρίς περιορισμούς (ii) με περιορισμούς.....	49
Γράφημα 5.10: Αποδοτικό μέτωπο μετά την εισαγωγή περιορισμών	49
Γράφημα 5.11: Συστάσεις αποδοτικών χαρτοφυλακίων μετά την εισαγωγή περιορισμών..	50
Γράφημα 5.12: Σύγκριση σύστασης χαρτοφυλακίου EU2020 με συστάσεις αποδοτικών χαρτοφυλακίων	51
Γράφημα 5.13: Αποδοτικά μέτωπα (i) για το σενάριο αναφοράς (ii) για το σενάριο υψηλών τιμών καυσίμων	51
Γράφημα 5.14: Αποδοτικό μέτωπο για το σενάριο υψηλών τιμών καυσίμων	52

Γράφημα 5.15: Συστάσεις αποδοτικών χαρτοφυλακίων για το σενάριο υψηλών τιμών καυσίμων.....	52
Γράφημα 5.16: Σύγκριση σύστασης χαρτοφυλακίου EU2020 με τη σύσταση του αποδοτικού χαρτοφυλακίου ΣΚ	53
Γράφημα 5.17: Αποδοτικά μέτωπα (i) για το σενάριο αναφοράς (ii) για το σενάριο υψηλών τιμών καυσίμων (iii) για το σενάριο υψηλής τιμής CO ₂	53
Γράφημα 5.18: Αποδοτικό μέτωπο για το σενάριο υψηλής τιμής CO ₂	54
Γράφημα 5.19: Συστάσεις αποδοτικών χαρτοφυλακίων για το σενάριο υψηλής τιμής CO ₂ . 54	
Γράφημα 5.20: Σύγκριση σύστασης χαρτοφυλακίου EU2020 με τη σύσταση του αποδοτικού χαρτοφυλακίου Α	55
Γράφημα 5.21: Αποδοτικά μέτωπα χωρίς περιορισμούς για 10 διαφορετικές χρονοσειρές	55
Γράφημα 5.22: Σύγκριση συστάσεων αποδοτικών χαρτοφυλακίων ίσου κόστους χωρίς περιορισμούς για δέκα διαφορετικές χρονοσειρές.....	56
Γράφημα 5.23: Αποδοτικά μέτωπα με περιορισμούς για 10 διαφορετικές χρονοσειρές	56
Γράφημα 5.24: Σύγκριση συστάσεων αποδοτικών χαρτοφυλακίων ίσου κόστους με περιορισμούς για δέκα διαφορετικές χρονοσειρές.....	57
Γράφημα 5.25: Αποδοτικά μέτωπα (i) με το μοντέλο MAD (ii) με το μοντέλο SD.....	58
Γράφημα 5.26: Συστάσεις αποδοτικών χαρτοφυλακίων με το μοντέλο MAD	58
Γράφημα 5.27: Συστάσεις αποδοτικών χαρτοφυλακίων με το μοντέλο SD.....	59
Πίνακας 5.2: Διαστήματα εμπιστοσύνης για τρία ενδεικτικά χαρτοφυλάκια.....	59
Γράφημα 5.28: Αποδοτικό μέτωπο και διαστήματα εμπιστοσύνης.....	60

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι ενεργειακές πολιτικές διαμορφώνονταν μέχρι σήμερα σε μεγάλο βαθμό από τις αναλύσεις ελάχιστου κόστους. Σύμφωνα με αυτές, εμφανίζονται ως προτιμότερες οι επιλογές που ικανοποιούν τους ενεργειακούς στόχους ελαχιστοποιώντας τις δαπάνες. Φυσικά, οι προβλέψεις για το κόστος των εκάστοτε επιλογών εμπεριέχουν μια αβεβαιότητα, που εκφράζεται από την έννοια του κινδύνου. Όταν λαμβάνεται υπόψη μονό το κριτήριο της ελαχιστοποίησης του κόστους, απορρίπτονται πολυδάπανες τεχνολογικές επιλογές παρά τα μεγάλα οφέλη που μπορεί να έχουν για τον περιορισμό του κινδύνου.

Η Σύγχρονη Θεωρία Χαρτοφυλακίου (ΣΘΧ), μια θεωρία που εφαρμόζεται κατά κόρον στα χρηματοοικονομικά, μπορεί να αποτελέσει ένα χρήσιμο εργαλείο για τη χάραξη ενεργειακής πολιτικής, αφού εκτός από το κριτήριο της ελαχιστοποίησης του κόστους, εισάγει και το κριτήριο της ελαχιστοποίησης του ρίσκου. Με την κατάλληλη εισαγωγή δεδομένων, η εφαρμογή της ΣΘΧ παρέχει ένα αποδοτικό μέτωπο, δηλαδή ένα σύνολο συνδυασμών που ικανοποιούν τα κριτήρια ελαχιστοποίησης του κόστους αλλά και του ρίσκου.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία, θα γίνει εφαρμογή των αρχών της ΣΘΧ στη διαμόρφωση του μίγματος της ηλεκτροπαραγωγής στην Ευρωπαϊκή Ένωση. Από την εφαρμογή του μοντέλου μας, θα προκύψει μια σειρά από αποδοτικούς συνδυασμούς τεχνολογιών, με βάση τους οποίους θα προταθούν στη συνέχεια κάποιες γενικές κατευθύνσεις για την επίτευξη των κοινοτικών ενεργειακών στόχων και την αντιμετώπιση των προκλήσεων που προκύπτουν στον τομέα του ενεργειακού σχεδιασμού.

Το μοντέλο που θα εφαρμοστεί βασίζεται σε προηγούμενη μελέτη των Awerbuch και Berger για την ΕΕ [1], παρουσιάζει όμως και ορισμένες τροποποιήσεις. Συγκεκριμένα, θα επιλεγθεί ένα εναλλακτικό κριτήριο για το ρίσκο: αντί της χρήσης της διακύμανσης, θα χρησιμοποιηθεί σαν κριτήριο του ρίσκου η μέση απόλυτη απόκλιση (MAD), σύμφωνα με την πρόταση των Konno και Yamazaki [6]. Επειδή η μέθοδος αυτή απαιτεί την χρήση εκτεταμένων χρονοσειρών για τα παρελθοντικά κόστη, οι οποίες είτε δεν υπάρχουν είτε δεν είναι διαθέσιμες, θα γίνει παραγωγή χρονοσειρών κόστους που πληρούν τις προϋποθέσεις που θέτονται στη βιβλιογραφία με δειγματοληψία Monte Carlo.

2. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΚΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ

Η βιβλιογραφική ανασκόπηση που ακολουθεί μπορεί να χωριστεί σε δύο μέρη. Στο πρώτο μέρος, διατυπώνονται οι βασικές έννοιες της Σύγχρονης Θεωρίας Χαρτοφυλακίου, ενώ στο δεύτερο μέρος παρουσιάζονται οι εφαρμογές της σε προβλήματα ενεργειακού σχεδιασμού.

2.1 Η ΣΥΓΧΡΟΝΗ ΘΕΩΡΙΑ ΧΑΡΤΟΦΥΛΑΚΙΟΥ

2.1.1 Εισαγωγή

Το 1952 δημοσιεύτηκε στο Journal of Finance ένα άρθρο με τίτλο 'Portfolio Selection' από τον Harry Markowitz [1]. Οι ιδέες που προτάθηκαν σε αυτό το άρθρο αποτελέσαν τα θεμέλια της σημερινής Σύγχρονης Θεωρίας Χαρτοφυλακίου (Modern Portfolio Theory, MPT). Στην αρχή, η Σύγχρονη Θεωρία Χαρτοφυλακίου (από δω και στο εξής ΣΘΧ) δεν πυροδότησε μεγάλο ενδιαφέρον, αλλά σταδιακά έγινε ευρέως αποδεκτή, ώστε τώρα, 60 χρόνια μετά, να προτείνονται συνεχώς νέα χρηματοοικονομικά μοντέλα, βασισμένα στις ίδιες αρχές. Η ΣΘΧ έπαιξε καθοριστικό ρόλο στη διαμόρφωση μιας νέας τάσης στον τομέα των επενδύσεων, αφού οι επενδυτές είχαν για πρώτη φορά στη διάθεση τους ένα ορθολογικό μεθοδολογικό πλαίσιο για τη διαχείριση των κεφαλαίων τους. [2]

Παρότι βρήκε εφαρμογή σε πολλούς τομείς, η ΣΘΧ έχει επιδράσει κυρίως στη διαχείριση χαρτοφυλακίου. Ως χαρτοφυλάκιο, ορίζεται το σύνολο των περιουσιακών στοιχείων που έχει ένας επενδυτής στην κατοχή του, όπως για παράδειγμα οι μετοχές, τα ομόλογα και οι τίτλοι ιδιοκτησίας. Συνοπτικά μπορεί να πει κανείς ότι ένα χαρτοφυλάκιο αποτελείται από ένα σύνολο χρεογράφων, που συμμετέχουν σε αυτό με κάποια αναλογία. Στην πιο απλή μορφή της, η ΣΘΧ παρέχει ένα πλαίσιο για την επιλογή του κατάλληλου συνδυασμού χρεογράφων για την κατασκευή ενός χαρτοφυλακίου, με κριτήρια την αναμενόμενη απόδοση των επενδύσεων και την ροπή του επενδυτή προς το ρίσκο. Η ΣΘΧ, αναφερόμενη συχνά και ως 'ανάλυση μέσης τιμής-διακύμανσης' (mean-variance analysis), εισήγαγε μια ορολογία, η οποία έχει πλέον κυριαρχήσει στον τομέα της διαχείρισης επενδύσεων.

Η ΣΘΧ βασίζεται στη λεγόμενη αρχή της διαφοροποίησης. Σύμφωνα με την αρχή αυτή, η τοποθέτηση του συνόλου του κεφαλαίου σε επενδύσεις που είναι πιθανόν να αποτύχουν συγχρόνως, δηλαδή που οι αποδόσεις τους παρουσιάζουν έντονη συσχέτιση, θα πρέπει να αποφεύγεται. Σε αντίθετη περίπτωση, εάν μια επένδυση αποτύχει, αυτό θα οδηγήσει σε συνολική αποτυχία του χαρτοφυλακίου. Είναι λοιπόν προτιμότερο ένας επενδυτής να διαφοροποιεί τις επενδύσεις του, ώστε το συνολικό του κεφάλαιο να είναι θωρακισμένο από απρόσμενες μεταβολές στην αξία ενός χρεογράφου ή μιας ομάδας χρεογράφων που συσχετίζονται έντονα.

2.1.2 Οι έννοιες της απόδοσης και του ρίσκου

Βασικές έννοιες που είναι απαραίτητες για την περιγραφή της Σύγχρονης Θεωρίας Χαρτοφυλακίου είναι η προσδοκώμενη απόδοση (expected return) και το ρίσκο (risk). Η προσδοκώμενη απόδοση αντιπροσωπεύει το κέρδος που προβλέπεται να

προκύπτει από ένα χρεόγραφο μετά από ορισμένη χρονική περίοδο. Από την άλλη πλευρά, το ρίσκο (ή κίνδυνος) εκφράζει την πιθανότητα η πραγματική απόδοση στο μέλλον να αποκλίνει από την προσδοκώμενη.

Αξίζει εδώ να σημειωθεί ότι το ρίσκο μιας επένδυσης μπορεί να χωριστεί σε συστηματικό και μη συστηματικό [3]. Το συστηματικό ρίσκο οφείλεται σε εξωτερικούς παράγοντες που δε μπορούν να ελεγχθούν από τον επενδυτή και συνεπώς δε μπορεί να εξαλειφθεί, ενώ το μη συστηματικό ρίσκο αναφέρεται στις επιλογές του επενδυτή. Αυτό σημαίνει ότι όλες οι επενδύσεις εμπεριέχουν συστηματικό ρίσκο, το οποίο δε μπορεί να εξαλειφθεί. Η ΣΘΧ εστιάζει στην εξάλειψη του μη συστηματικού ρίσκου, το οποίο μπορεί να μηδενιστεί, όταν επιτευχθεί κατάλληλη διαφοροποίηση.

Ο υπολογισμός της προσδοκώμενης απόδοσης ενός χρεογράφου μπορεί να γίνει με βάση παρελθοντικά δεδομένα ή με χρήση μοντέλων πρόβλεψης. Συνήθως, δίνεται ως ποσοστό αύξησης ή μείωσης της τιμής του χρεογράφου. Αν εκτιμάται ότι η αξία ενός χρεογράφου τη χρονική στιγμή t_1 είναι $E(t_1)$ και η αξία του τη χρονική στιγμή t_2 είναι $E(t_2)$, τότε η προσδοκώμενη απόδοση της επένδυσης στο χρεόγραφο θα είναι:

$$R = \frac{E(t_2) - E(t_1)}{t_2 - t_1}$$

Στην πραγματικότητα, η προσδοκώμενη απόδοση υπολογίζεται με βάση ορισμένες προβλέψεις για την απόδοση του χρεογράφου (R_i) και την πιθανότητα που αποδίδεται στο ενδεχόμενο πραγματοποίησης κάθε μίας από αυτές (P_i).

$$R = \sum_i P_i R_i$$

Το ρίσκο συνήθως υπολογίζεται μέσω της τυπικής απόκλισης των καταγεγραμμένων παρελθοντικών αποδόσεων του χρεογράφου ανά τακτά χρονικά διαστήματα, για μια ορισμένη χρονική περίοδο. Συγκεκριμένα, όσο υψηλότερη είναι η τυπική απόκλιση των δεδομένων αυτών, τόσο μεγαλύτερο είναι το ρίσκο (ο κίνδυνος) μιας ορισμένης επένδυσης. Ο συνηθισμένος τύπος υπολογισμού της τυπικής απόκλισης στην περίπτωση που υπάρχουν διαθέσιμες n τιμές για την απόδοση (R_t) από ιστορικά στοιχεία είναι ο εξής:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{t=1}^n (R_t - \bar{R})^2}$$

Ο στόχος της ΣΘΧ είναι συνεπώς η κατασκευή χαρτοφυλακίων με τη μέγιστη συνολική προσδοκώμενη απόδοση, με δεδομένο ένα ορισμένο αποδεκτό επίπεδο συνολικού ρίσκου. Η διαδικασία που ακολουθείται συνοψίζεται ως εξής: Χρησιμοποιώντας παρελθοντικά δεδομένα καθώς και προβλέψεις για τις προσδοκώμενες αποδόσεις όλων των χρεογράφων, ποσοτικοποιούνται τα μεγέθη

της προσδοκώμενης απόδοσης αλλά και του ρίσκου του χαρτοφυλακίου και παρέχεται μια μέθοδος για την επιλογή του βέλτιστου χαρτοφυλακίου. [4]

Αναλυτικότερα, κατά την εφαρμογή της μεθόδου, υπολογίζεται η συνολική προσδοκώμενη απόδοση χαρτοφυλακίου (portfolio return) και το συνολικό ρίσκο χαρτοφυλακίου (portfolio risk) για όλα τα πιθανά χαρτοφυλάκια. Αν θεωρήσουμε ένα χαρτοφυλάκιο που αποτελείται από n χρεόγραφα με προσδοκώμενη απόδοση R_i και ποσοστό συμμετοχής w_i , τότε η συνολική προσδοκώμενη απόδοση του χαρτοφυλακίου υπολογίζεται ως σταθμικός μέσος των αποδόσεων των χρεογράφων.

$$R_P = \sum_{i=1}^n w_i R_i$$

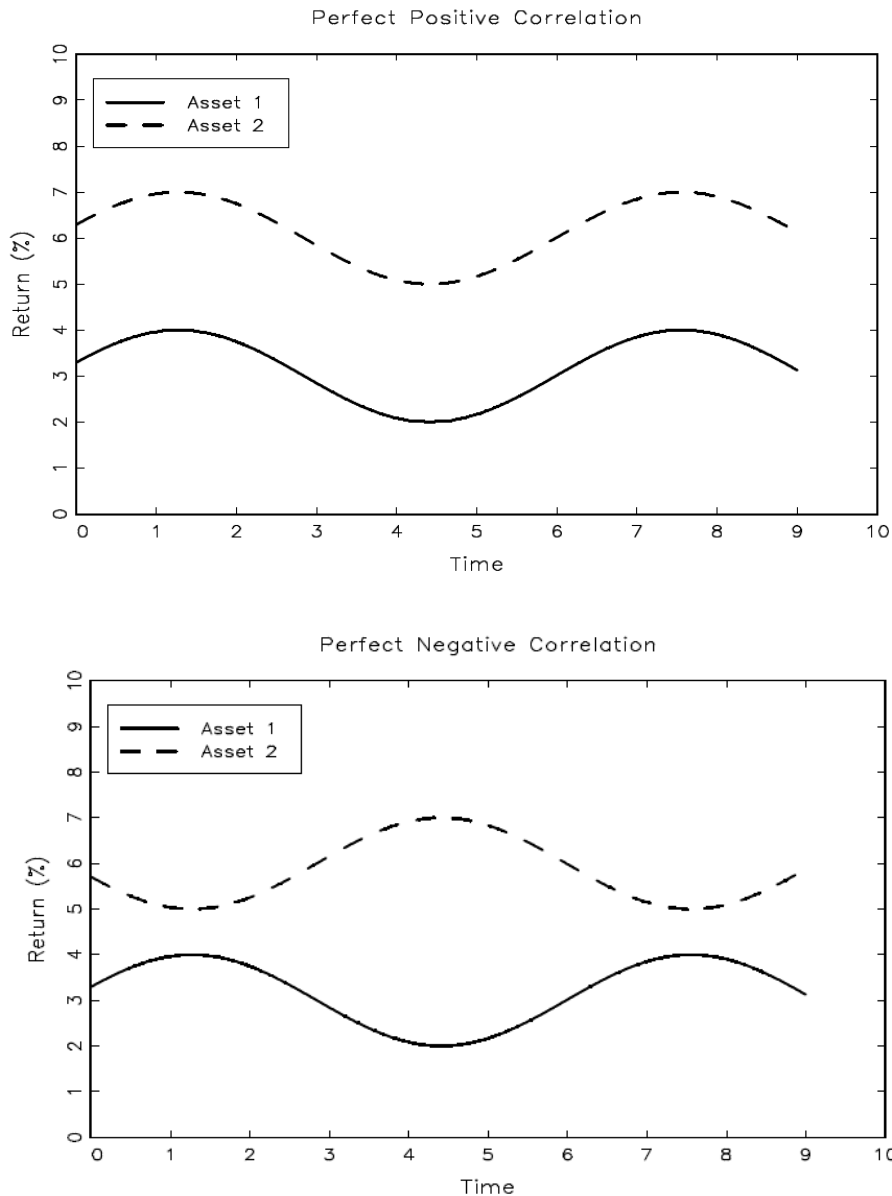
Το συνολικό ρίσκο για κάθε χαρτοφυλάκιο υπολογίζεται με ανάλογο τρόπο, με τη διαφορά ότι εδώ σημαντικό ρόλο παίζει και η συνδιακύμανση των χρεογράφων ανά ζεύγη, με χρήση συντελεστών συσχέτισης. Εάν τα χρεόγραφα παρουσιάζουν μεμονωμένο ρίσκο σ_i και οι συντελεστές συσχέτισης δύο χρεογράφων i και j (με $i \neq j$) είναι ρ_{ij} , τότε το συνολικό ρίσκο του χαρτοφυλακίου θα είναι:

$$\sigma_P = \sqrt{\sum_{i=1}^n w_i^2 \sigma_i^2 + \sum_i \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n w_i w_j \sigma_i \sigma_j \rho_{ij}}$$

Οι συντελεστές συσχέτισης (correlation coefficients) παίρνουν τιμές από το -1 έως το 1 και μπορούν να υπολογιστούν με χρήση των ιστορικών στοιχείων των αποδόσεων ανά δύο χρεόγραφα. Συγκεκριμένα, ο συνήθης τρόπος υπολογισμού του συντελεστή συσχέτισης για δύο χρεόγραφα i και j γίνεται με βάση τις καταγεγραμμένες αποδόσεις τους R_{it} και R_{jt} , κατά τη χρονική περίοδο $t = 1, \dots, n$ με βάση τον παρακάτω τύπο:

$$\rho_{ij} = \frac{\sum (R_{it} - \bar{R}_i)(R_{jt} - \bar{R}_j)}{\sqrt{\sum (R_{it} - \bar{R}_i)^2 \sum (R_{jt} - \bar{R}_j)^2}}$$

Ο συντελεστής συσχέτισης φανερώνει εάν οι αλλαγές στις αποδόσεις του ενός χρεογράφου συμπίπτουν με ανάλογες αλλαγές στις αποδόσεις του άλλου. Για παράδειγμα, η αύξηση της απόδοσης του ενός μπορεί να συνεπάγεται τέλεια ανάλογη αύξηση της απόδοσης του άλλου ($\rho_{12} \rightarrow 1$), ή τέλεια ανάλογη μείωση ($\rho_{12} \rightarrow -1$). Επίσης, μπορεί τα δύο χρεόγραφα να μην παρουσιάζουν καμία συσχέτιση στις μεταβολές των αποδόσεων τους ($\rho_{12} \rightarrow 0$).



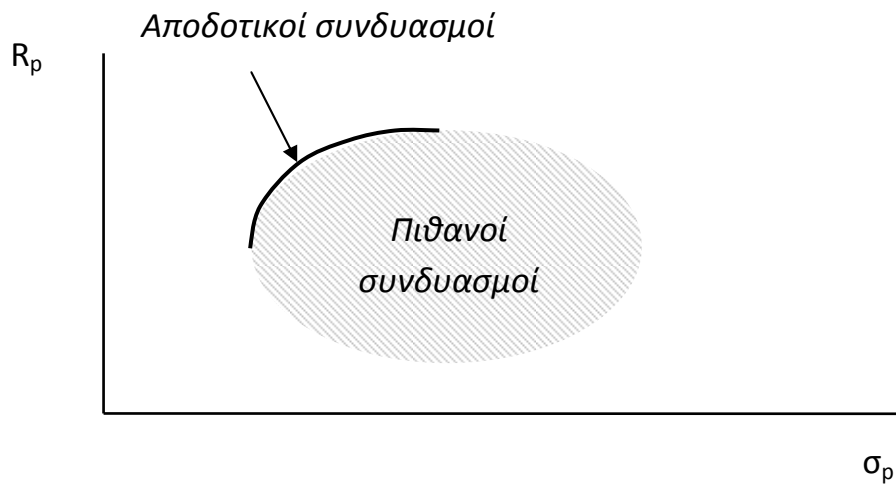
Γράφημα 2.1: Συμπεριφορά χρεογράφων στο χρόνο με συσχέτιση $\rho=1$ ή $\rho=-1$

Ο συνδυασμός χρεογράφων που παρουσιάζουν αρνητική συσχέτιση μεταξύ τους (όταν το ένα παρουσίαζε θετική απόδοση, το άλλο παρουσίαζε αρνητική απόδοση και αντίστροφα) μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να μειωθεί αισθητά το συνολικό ρίσκο του χαρτοφυλακίου.

Αφού υπολογιστούν όλα τα πιθανά χαρτοφυλάκια (όλοι οι πιθανοί συνδυασμοί των διαθέσιμων χρεογράφων), επιλέγονται τα αποδοτικά χαρτοφυλάκια. Ως αποδοτικά ορίζονται τα χαρτοφυλάκια, τα οποία προσφέρουν τη μέγιστη προσδοκώμενη απόδοση για ένα ορισμένο επίπεδο ρίσκου, ή ενέχουν το ελάχιστο ρίσκο για μία ορισμένη τιμή της προσδοκώμενης απόδοσης.

Στο παρακάτω γράφημα, το γραμμοσκιασμένο κομμάτι παριστάνει όλα τα πιθανά χαρτοφυλάκια, ενώ τα σημεία της καμπύλης που βρίσκονται στην περιοχή υψηλών αποδόσεων R_p και χαμηλού ρίσκου σ_p (επάνω αριστερά) παριστάνουν τα

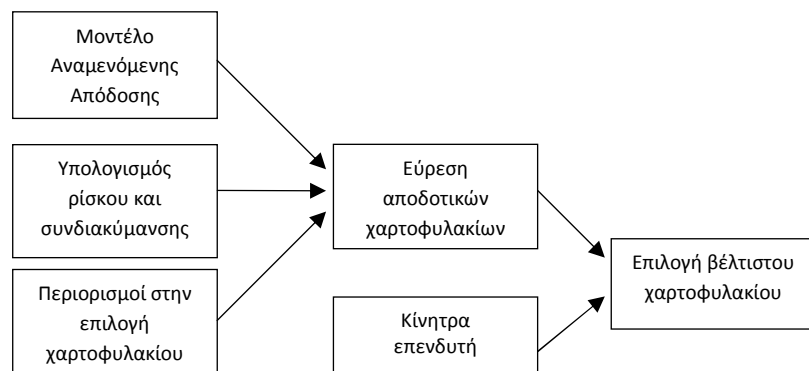
αποδοτικά χαρτοφυλάκια. Η καμπύλη που αποτελείται από τα αποδοτικά χαρτοφυλάκια ονομάζεται αποδοτικό μέτωπο (efficient frontier).



Σχήμα 2.1: Γραφική Αναπαράσταση του Αποδοτικού Μετώπου

Αξίζει να τονισθεί ότι από την εφαρμογή της μεθόδου δεν προκύπτει μόνο ένα βέλτιστο χαρτοφυλάκιο αλλά ένα σύνολο αποδοτικών χαρτοφυλακίων, από τα οποία ο κάθε επενδυτής επιλέγει ένα, με βάση τα προσωπικά του κίνητρα, δηλαδή είτε την προσδοκώμενη απόδοση που επιθυμεί ή το ποσοστό ρίσκου που μπορεί να αποδεχθεί.

Η συνολική διαδικασία της επένδυσης με βάση τη Σύγχρονη Θεωρία Χαρτοφυλακίου μπορεί να συνοψισθεί στο παρακάτω σχήμα. [2]



Σχήμα 2.2: Συνοπτική διαδικασία εφαρμογής της ΣΘΧ

2.1.3 Επίδραση χαρτοφυλακίου (Portfolio effect)¹

Στη συνέχεια, θα παρουσιαστεί το απλό μοντέλο δύο χρεογράφων, με στόχο να αποσαφηνιστούν τα οφέλη που προκύπτουν από τη διαφοροποίηση του χαρτοφυλακίου με βάση τις αρχές της Σύγχρονης Θεωρίας Χαρτοφυλακίου.

Απαραίτητες μεταβλητές εισόδου είναι οι αναμενόμενες αποδόσεις των χρεογράφων μετά από ορισμένο χρόνο, R_1 και R_2 , το ρίσκο που χαρακτηρίζει κάθε χρεόγραφο, εκφρασμένο ως τυπική απόκλιση, σ_1 και σ_2 , καθώς και ο συντελεστής συσχέτισης για τα δύο χρεόγραφα, ρ_{12} .

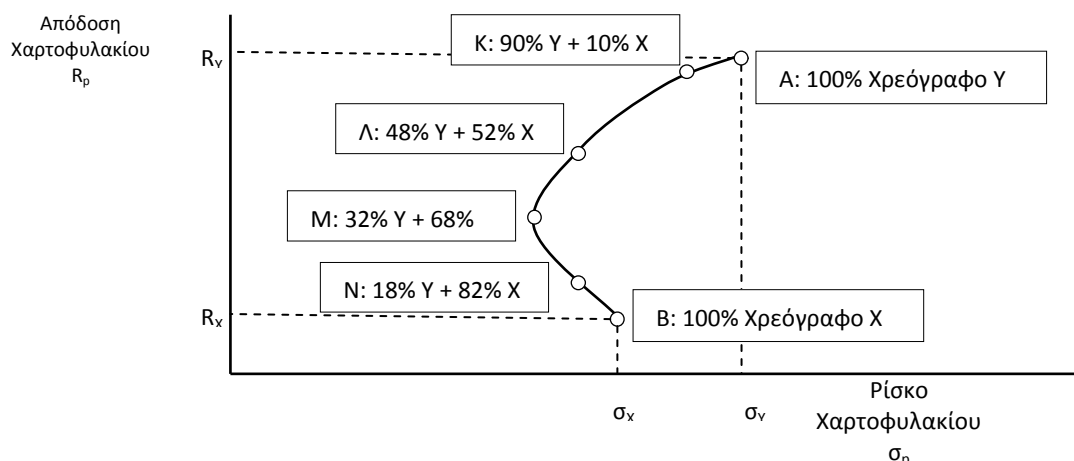
Όπως αναφέρθηκε, η αναμενόμενη απόδοση του χαρτοφυλακίου υπολογίζεται ως σταθμικός μέσος, συνεπώς εάν το ποσοστά συμμετοχής των χρεογράφων είναι X_1 και X_2 , τότε:

$$R_p = X_1 \cdot R_1 + X_2 \cdot R_2$$

Το συνολικό ρίσκο του χαρτοφυλακίου υπολογίζεται επίσης σταθμικά, αλλά στην εξίσωση υπεισέρχεται και ο συντελεστής συσχέτισης των δύο χρεογράφων.

$$\sigma_p = \sqrt{X_1^2 \sigma_1^2 + X_2^2 \sigma_2^2 + 2X_1 X_2 \rho_{12} \sigma_1 \sigma_2}$$

Εάν τα δύο χρεόγραφα παρουσιάζουν χαμηλή συσχέτιση ή υψηλή αρνητική συσχέτιση, τότε ο συνδυασμός του μπορεί να μειώσει το συνολικό ρίσκο του χαρτοφυλακίου. Στο παρακάτω γράφημα, η καμπύλη παριστάνει όλα τα πιθανά χαρτοφυλάκια που περιέχουν δύο χρεόγραφα Y και X με συντελεστή συσχέτισης $\rho_{12} = 0.6$. σε διαφορετικές αναλογίες. Γίνεται έτσι εμφανής η επίδραση χαρτοφυλακίου (Portfolio Effect), δηλαδή η ελάττωση που προκύπτει στο συνολικό ρίσκο του χαρτοφυλακίου, λόγω της αρνητικής συσχέτισης των χρεογράφων.



Σχήμα 2.3: Η Επίδραση Χαρτοφυλακίου για ένα χαρτοφυλάκιο με δύο χρεόγραφα

¹Οι δύο επόμενες ενότητες στηρίζεται σε μεγάλο βαθμό στις αντίστοιχες ενότητες του άρθρου των Awerbuch and Berger (2003) [10]

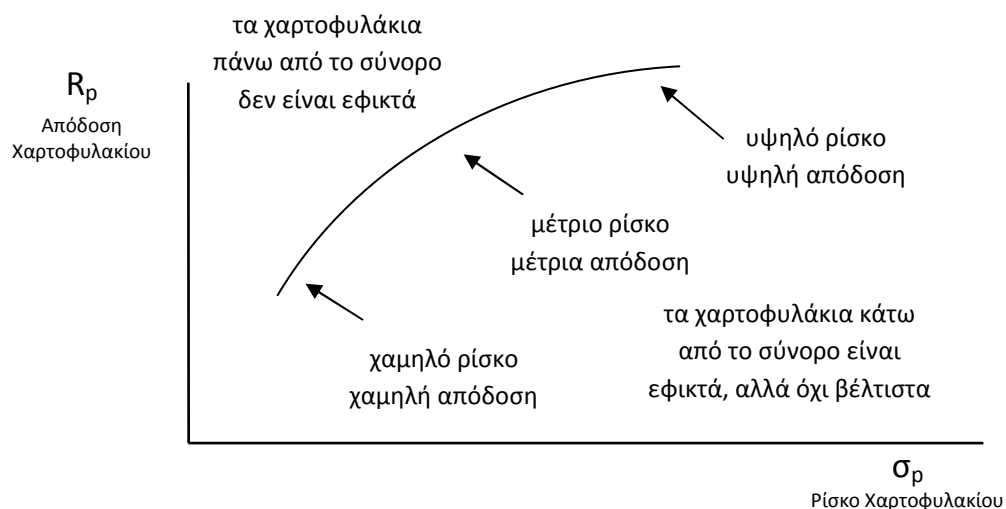
Το ένα χρεόγραφο παρουσιάζει υψηλότερη αναμενόμενη απόδοση (Y) αλλά και υψηλότερο ρίσκο από το άλλο (X). Ξεκινώντας από το χαρτοφυλάκιο που αποτελείται από 100% χρεόγραφο υψηλής απόδοσης (σημείο A) και προσθέτοντας σταδιακά ένα ποσοστό του χρεογράφου χαμηλής απόδοσης, παρατηρείται μείωση του συνολικού ρίσκου του χαρτοφυλακίου, μέχρι την ελαχιστοποίηση του ρίσκου (σημείο M). Παρατηρούμε ότι το ελάχιστο ρίσκο είναι χαμηλότερο από το ρίσκο του χρεογράφου X , λόγω της επίδρασης χαρτοφυλακίου. Δηλαδή, με τον κατάλληλο συνδυασμό διαφοροποιημένων χρεογράφων, είναι δυνατή την κατασκευή ενός χαρτοφυλακίου με συνολικό ρίσκο χαμηλότερο από το ρίσκο κάθε χρεογράφου ξεχωριστά (stand-alone risk).

Προφανώς, δεν είναι ορθολογική η κατοχή χαρτοφυλακίων που βρίσκονται κάτω από το χαρτοφυλάκιο M , αφού υπάρχουν συνδυασμοί Y και X που παρουσιάζουν υψηλότερες αποδόσεις με το ίδιο ρίσκο. Για παράδειγμα, το χαρτοφυλάκιο L παρουσιάζει το ίδιο ρίσκο με το χαρτοφυλάκιο N , αλλά έχει πολύ υψηλότερη απόδοση από αυτό.

Οι επενδυτές που επιθυμούν αποδόσεις υψηλότερες από αυτές του χαρτοφυλακίου M θα πρέπει να αποδεχθούν υψηλότερο ρίσκο προσθέτοντας περισσότερο χρεόγραφο Y στο χαρτοφυλάκιο τους. Αυτό θα τους μετακινήσει κατά μήκος της καμπύλης προς χαρτοφυλάκια όπως το K .

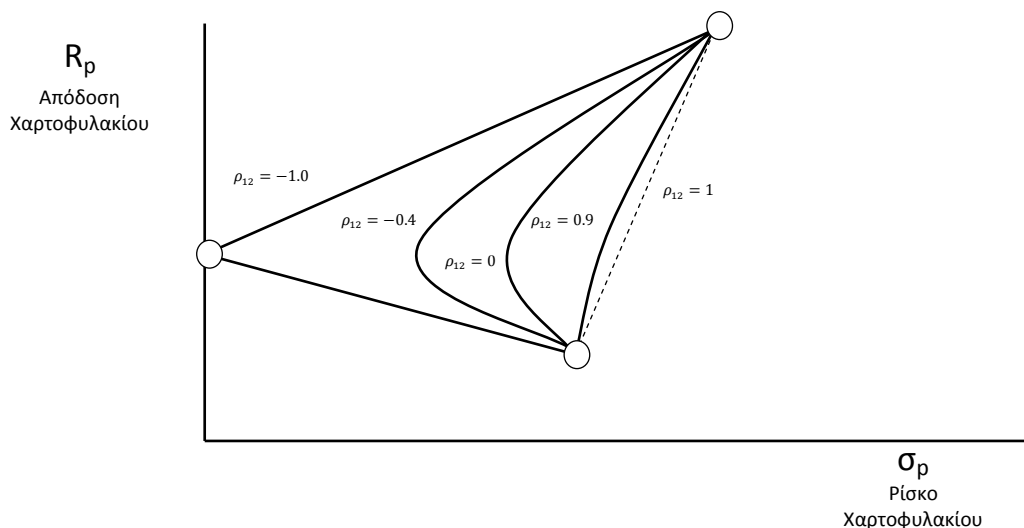
Γενικά, για δυο χρεόγραφα που ενέχουν ρίσκο, δεν υπάρχει ένα μόνο βέλτιστο χαρτοφυλάκιο, αλλά ένα εύρος αποδοτικών συνδυασμών (όλα τα σημεία πάνω από το M). Με άλλα λόγια, το αποδοτικό σύνορο είναι σε αυτή την περίπτωση η καμπύλη MA .

Οι επενδυτές μπορούν να επιλέξουν οποιοδήποτε χαρτοφυλάκιο που βρίσκεται επάνω στην καμπύλη MA , ανάλογα με τις προτιμήσεις τους. Ένας συντηρητικός επενδυτής θα επιλέξει χαρτοφυλάκια χαμηλότερης απόδοσης και ρίσκου, ενώ ένας ριψοκίνδυνος επενδυτής θα προτιμήσει χαρτοφυλάκια με υψηλότερη απόδοση και αντίστοιχα υψηλότερο ρίσκο.



Σχήμα 2.4: Πιθανά αποδοτικά χαρτοφυλάκια και ο συνδυασμός απόδοσης/ρίσκου

Η επίδραση του συντελεστή συσχέτισης στην καμπύλη με τα εφικτά χαρτοφυλάκια φαίνεται στο παρακάτω γράφημα. Όταν τα δύο χρεόγραφα παρουσιάζουν υψηλή θετική συσχέτιση, τότε η καμπύλη τείνει να γίνει ευθεία και δεν παρουσιάζονται πλέον οφέλη από το συνδυασμό των χρεογράφων. Αντίθετα, όσο η συσχέτιση μειώνεται και ειδικά όταν μιλάμε για αρνητική συσχέτιση, η επίδραση χαρτοφυλακίου γίνεται όλο και πιο έντονη, προσφέροντας ευκαιρίες για χαρτοφυλάκια μειωμένου ρίσκου.



Σχήμα 2.5: Η επίδραση του συντελεστή συσχέτισης στα εφικτά χαρτοφυλάκια δύο χρεογράφων

2.1.4 Η επίδραση ενός ακίνδυνου χρεογράφου

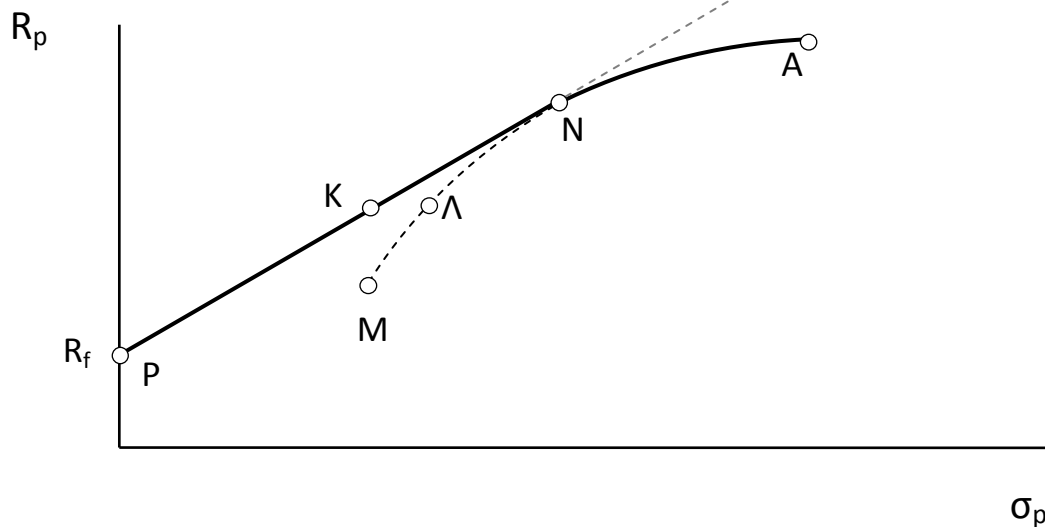
Η επίδραση ενός ακίνδυνου χρεογράφου σε ένα χαρτοφυλάκιο εμφανίζει επίσης ενδιαφέροντα αποτελέσματα. Ως ακίνδυνο χρεόγραφο (αναφέρεται και ως χρεόγραφο μηδενικού ρίσκου) ορίζεται ένα περιουσιακό στοιχείο, η απόδοση του οποίου δεν εμπεριέχει καθόλου αβεβαιότητα. Αυτό ισχύει υπό ορισμένες προϋποθέσεις, για παράδειγμα, για τα έντοκα γραμμάτια του δημοσίου². Ο επενδυτής μπορεί να επενδύσει στο ακίνδυνο χρεόγραφο και να απολάβει μια βέβαια απόδοση R_f . Αυτό σημαίνει ότι $\sigma_f = 0$, και κατ' επέκταση ισχύει ότι τα ακίνδυνα χρεόγραφα έχουν μηδενικό συντελεστή συσχέτισης με τα υπόλοιπα χρεόγραφα. Φυσικά, η απόδοση ενός ακίνδυνου χρεογράφου είναι αρκετά χαμηλότερη από αυτές των «επικίνδυνων» χρεογράφων.

Η επίδραση της εισαγωγής ενός χρεογράφου μηδενικού ρίσκου σε ένα χαρτοφυλάκιο απεικονίζεται στο παρακάτω γράφημα. Έστω ότι το αποδοτικό μέτωπο ενός συνόλου επικίνδυνων χρεογράφων βρίσκεται στην καμπύλη γραμμή. Αφού η διακύμανση αλλά και οι συντελεστές συσχέτισης του ακίνδυνου

² Η έκφραση «μηδενικό ρίσκο» είναι μάλλον παραπλανητική, αφού ακόμα και τα έντοκα γραμμάτια του δημοσίου ενέχουν κάποιο ρίσκο: η αξία τους μεταβάλλεται υπό την επίδραση του πληθωρισμού. Φυσικά, οι επενδυτές είναι βέβαιοι ότι θα λάβουν την ονομαστική αξία την ημερομηνία λήξης του γραμματίου. Στην πραγματικότητα, είναι σωστότερη η έκφραση «χρεόγραφο μηδενικού συντελεστή beta». Ο συντελεστής beta είναι ένας δείκτης μέτρησης του συστηματικού ρίσκου.

χρεογράφου είναι μηδέν, η προσθήκη ενός ποσοστού από το ακίνδυνο χρεόγραφο σε ένα χαρτοφυλάκιο θα παριστάνεται από μια ευθεία γραμμή, η οποία θα ενώνει το χαρτοφυλάκιο με το ακίνδυνο χρεόγραφο, δηλαδή το σημείο, $(\sigma, R) = (0, R_f)$. Τα χαρτοφυλάκια στην ευθεία αυτή θα αποτελούνται από ένα ποσοστό του επικίνδυνου χαρτοφυλακίου σε συνδυασμό με αντίστοιχο ποσοστό του ακίνδυνου χρεογράφου. Για την εύρεση του νέου αποδοτικού μετώπου, το πιο συμφέρον είναι να χρησιμοποιήσουμε το επικίνδυνο χαρτοφυλάκιο που βρίσκεται στο σημείο που η ευθεία του ακίνδυνου χρεογράφου εφάπτεται στο πάνω μέρος του αποδοτικού μέτωπο. Με αυτό τον τρόπο, η ευθεία ανάμιξης του επικίνδυνου χαρτοφυλακίου με το ακίνδυνο χρεόγραφο θα βρίσκεται ψηλότερα από κάθε άλλη περίπτωση, προσφέροντας νέες επιλογές χαρτοφυλακίων με τις μεγαλύτερες αποδόσεις, για ίδια επίπεδα ρίσκου.

Το νέο αποδοτικό μέτωπο βρίσκεται πλέον στη γραμμή PNA. Στο σημείο P βρίσκεται το χαρτοφυλάκιο που αποτελείται μόνο από το ακίνδυνο χρεόγραφο (έστω F), ενώ όσο πλησιάζουμε προς το σημείο N, έχουμε ένα αυξανόμενο ποσοστό του χαρτοφυλακίου N. Για παράδειγμα, αν το χαρτοφυλάκιο N αποτελείται από τρία χρεόγραφα X1, X2 και X3 σε ποσοστά 20%, 30% και 50%, τότε το σημείο K θα αποτελείται από 40% χρεόγραφο F και 60% N, δηλαδή συνδυασμό X1, X2 και X3 με την αντίστοιχη αναλογία. Συνεπώς το K περιέχει 40% F, 12% X1, 18% X2 και 30% X3.



Σχήμα 2.6: Η επίδραση της εισαγωγής στο χαρτοφυλάκιο ενός ακίνδυνου χρεογράφου

Η θετική επίδραση του ακίνδυνου χρεογράφου φαίνεται κατά τη σύγκριση του σημείου K του νέου αποδοτικού μετώπου με το σημείο L του παλαιού. Τα δύο χαρτοφυλάκια παρουσιάζουν την ίδια απόδοση, το χαρτοφυλάκιο που περιλαμβάνει το ακίνδυνο χρεόγραφο έχει όμως χαμηλότερο ρίσκο.

Φυσικά, η προσθήκη ακίνδυνου χρεογράφου στο χαρτοφυλάκιο παρουσιάζει οφέλη μόνο όταν ο επενδυτής επιθυμεί να κατασκευάσει χαρτοφυλάκια με απόδοση χαμηλότερη του N. Για απόδοση μεγαλύτερη από αυτή του χαρτοφυλακίου N, η προσθήκη του χρεογράφου μηδενικού ρίσκου δε μπορεί να βελτιώσει τα χαρτοφυλάκια (το αποδοτικό μέτωπο παραμένει όπως πριν).

2.1.5 Κριτική ενάντια στη Σύγχρονη Θεωρία Χαρτοφυλακίου

Παρά την μείζονος σημασίας επίδραση της Σύγχρονης Θεωρίας Χαρτοφυλακίου στη διαμόρφωση ενός επιστημονικού πλαισίου για τη διαχείριση χαρτοφυλακίου και τις επενδύσεις, δεν παύουν να υπάρχουν αδύναμα σημεία σε αυτήν. Παρακάτω θα παρουσιαστούν συνοπτικά οι βασικότερες παραδοχές της θεωρίας και οι ενστάσεις που έχουν προταθεί σε σχέση με αυτές.

Παραδοχή 1: Οι αποδόσεις των χρεογράφων είναι τυχαίες μεταβλητές που ακολουθούν κανονική κατανομή.

Στην πραγματικότητα, έχει παρατηρηθεί συχνά ότι οι αποδόσεις των χρεογράφων δεν ακολουθούν κανονική κατανομή. Απότομες μεταβολές (3 έως 6 τυπικές αποκλίσεις από τη μέση τιμή) συμβαίνουν στην αγορά πολύ συχνότερα από ότι θα προέβλεπε η κανονική κατανομή. Επίσης, οι μεταβολές στις αποδόσεις συνήθως δεν χαρακτηρίζονται από κάποια συμμετρία.

Σημαντικές ενστάσεις έχουν διατυπωθεί επίσης για το πώς ορίζεται η έννοια του ρίσκου στη ΣΘΧ. Σύμφωνα με τη θεωρία, το ρίσκο εκφράζεται από τη διακύμανση, πράγμα που σημαίνει ότι αυξάνεται όταν ένα χρεόγραφο παρουσιάσει απότομα είτε θετικές είτε αρνητικές μεταβολές στην απόδοση του. Στην πράξη, οι επενδυτές θέλουν να ελαχιστοποιήσουν μόνο το «ρίσκο προς τα κάτω» (downside risk), δηλαδή τις πιθανές απώλειες. [4]

Παραδοχή 2: Οι συσχετίσεις μεταξύ των χρεογράφων θα παραμείνουν σταθερές με την πάροδο του χρόνου.

Η παραδοχή αυτή δεν ανταποκρίνεται πλήρως στην πραγματικότητα, αφού οι συσχετίσεις εξαρτώνται από τις συστημικές σχέσεις ανάμεσα στα χρεόγραφα και συνεπώς μεταβάλλονται όταν μεταβάλλονται οι σχέσεις αυτές. Για παράδειγμα, οι σχέσεις αυτές μπορεί να αλλάξουν απότομα λόγω της κήρυξης ενός πολέμου ή μιας γενικευμένης κρίσης στις αγορές.

Παραδοχή 3: Όλοι οι επενδυτές στοχεύουν στην μεγιστοποίηση του κεφαλαίου τους, χωρίς να υπάρχουν επί μέρους κίνητρα. Επίσης, δρουν πάντα με ορθολογικό τρόπο και αποφεύγουν την ανάληψη ρίσκου.

Η παραδοχή αυτή είναι μια βασική παραδοχή για την υπόθεση της αποτελεσματικής αγοράς. Φυσικά κάτι τέτοιο δεν είναι εγγυημένο στην πραγματικότητα. Βασικά, η ΣΘΧ αποτελεί ένα αμιγώς μαθηματικό μοντέλο, το οποίο λαμβάνει υπ' όψιν κυρίως παρελθοντικά δεδομένα. Οι υπολογισμοί που γίνονται για τον κίνδυνο των επενδύσεων λοιπόν έχουν στοχαστική φύση και δεν αναφέρονται στις δομικές σχέσεις που υπάρχουν στις αγορές. Επίσης, το μοντέλο δεν συνυπολογίζει τον κίνδυνο να συμβεί κάτι που δεν έχει ήδη ξανασυμβεί.

Αξίζει να αναφερθεί επίσης ότι αρκετοί θεωρούν το μοντέλο μέσης τιμής-διακύμανσης υπερβολικά απλουστευτικό για τη λήψη επενδυτικών αποφάσεων, αφού βασίζεται μόνο σε δύο κριτήρια.

2.1.6 Μοντέλα Προγραμματισμού

Παρότι η ΣΘΧ έχει πολύ μεγάλη απήχηση, το μοντέλο του Markowitz δεν χρησιμοποιήθηκε εκτενώς όταν προτάθηκε. Δύο από τους κυριότερους λόγους γι' αυτό ήταν:

- i. Η δυσκολία κατά τον υπολογισμό των πινάκων συσχέτισης που απαιτούνται από το μοντέλο
- ii. Ο απαιτούμενος χρόνος για εύρεση των αποδοτικών χαρτοφυλακίων (για την επίλυση του τετραγωνικού μαθηματικού μοντέλου προγραμματισμού) [5]

Φυσικά, το δεύτερο πρόβλημα δεν είναι πλέον τόσο σημαντικό, λόγω της αλματώδους ανάπτυξης της υπολογιστής ισχύος των υπολογιστών.

Στο αρχικό μοντέλο του Markowitz, το πρόβλημα της ΣΘΧ εκφράζεται ως ένα πρόβλημα ελαχιστοποίησης του συνολικού ρίσκου χαρτοφυλακίου (σ_P) για δεδομένη προσδοκώμενη απόδοση (R_P), έχοντας ως παραμέτρους τις αποδόσεις (R_i) και τα ρίσκα (σ_i) των n διαθέσιμων χρεογράφων, καθώς και τους συντελεστές συσχέτισης όλων των ζευγών χρεογράφων (ρ_{ij}). Μεταβλητές απόφασης θεωρούνται τα ποσοστά συμμετοχής του κάθε χρεογράφου στο χαρτοφυλάκιο (w_i). Συνοπτικά, ο αλγόριθμος μπορεί να γραφεί ως εξής:

$$\begin{aligned} \min \sigma_P &= \sqrt{\sum_{i=1}^n w_i^2 \sigma_i^2 + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_i w_j \sigma_i \sigma_j \rho_{ij}} \\ \text{subject to } &\sum_{i=1}^n w_i R_i = R_P \\ &\sum_{i=1}^n w_i = 1 \\ &0 \leq w_i \leq 1 \text{ για κάθε } i = 1, \dots, n \end{aligned}$$

Το μοντέλο αυτό απαιτεί τον υπολογισμό των διακυμάνσεων, συνεπώς αποτελεί ένα πρόβλημα τετραγωνικού προγραμματισμού. Εάν η ΣΘΧ μπορούσε να εκφραστεί μέσω ενός γραμμικού μοντέλου, τότε η εφαρμογή της θα απαιτούσε σαφώς μικρότερο υπολογιστικό φορτίο.

Οι Κορνο και Yamazaki πρότειναν το 1991 ένα εναλλακτικό μοντέλο για τον υπολογισμό των αποδοτικών χαρτοφυλακίων, διαφορετικό από το μοντέλο μέσης τιμής-διακύμανσης (mean-variance model) του Markowitz. Χρησιμοποίησαν τη μέση απόλυτη απόκλιση (Mean Absolute Deviation, MAD) έναντι της διακύμανσης ως μέτρο για το ρίσκο του χαρτοφυλακίου. Έτσι οδηγήθηκαν σε ένα πρόγραμμα γραμμικού προγραμματισμού και ξεπεράστηκε το πρόβλημα του μεγάλου αλγοριθμικού φορτίου του τετραγωνικού προγραμματισμού. [6]

Οι Ιάπωνες ερευνητές εισήγαγαν μια συνάρτηση L_1 για το ρίσκο (μέση απόλυτη απόκλιση, MAD). Για τον υπολογισμό της είναι απαραίτητες όλες οι παρελθοντικές αποδόσεις R_{it} για κάθε ένα από τα n χρεόγραφα σε κάθε μία από τις T χρονικές στιγμές.

$$MAD = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T \left(\sum_{i=1}^n w_i |R_{it} - \bar{R}_i| \right)$$

Απέδειξαν ότι τα δύο αυτά μέτρα διασποράς (διακύμανση και μέση απόλυτη απόκλιση) δίνουν αντίστοιχα αποτελέσματα εάν οι μεταβλητές R_1, \dots, R_n ακολουθούν πολυμεταβλητή κανονική κατανομή. Συγκεκριμένα, αποδείχθηκε ότι ισχύει η παρακάτω σχέση.

$$\frac{\sigma}{MAD} = \sqrt{\frac{\pi}{2}}$$

Θέτοντας $a_{it} = R_{it} - \bar{R}_i$, το μοντέλο για την εύρεση των αποδοτικών χαρτοφυλακίων μετατρέπεται στο εξής:

$$\begin{aligned} \min MAD &= \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T \left| \sum_{i=1}^n w_i a_{it} \right| \\ \text{subject to } &\sum_{i=1}^n w_i R_i = R_p \\ &\sum_{i=1}^n w_i = 1 \\ &0 \leq w_i \leq 1 \text{ για κάθε } i = 1, \dots, n \end{aligned}$$

Για τον υπολογισμό της απόλυτης τιμής, προτάθηκε η χρήση μιας βοηθητικής μεταβλητής $y_t = \sum_{i=1}^n w_i a_{it}$ και το τελικό μοντέλο που προέκυψε παρουσιάζεται στο παρακάτω πλαίσιο.

$$\begin{aligned}
 & \min \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T y_t \\
 & \text{subject to} \quad y_t + \sum_{i=1}^n w_i a_{it} \geq 0 \quad t = 1, \dots, T \\
 & \quad y_t - \sum_{i=1}^n w_i a_{it} \geq 0 \quad t = 1, \dots, T \\
 & \quad \sum_{i=1}^n w_i R_i = R_p \\
 & \quad \sum_{i=1}^n w_i = 1
 \end{aligned}$$

Σύμφωνα με τους Konno and Yamazaki, το μοντέλο MAD παρουσιάζει τα εξής πλεονεκτήματα έναντι του μοντέλου του Markowitz:

- i. Δεν απαιτεί τον υπολογισμό των συντελεστών συσχέτισης, αφού δε συμμετέχουν στο μοντέλο.
- ii. Η επίλυση αυτού του γραμμικού μοντέλου είναι πολύ ευκολότερη από το αντίστοιχο τετραγωνικό.
- iii. Ο μέγιστος αριθμός χρεογράφων που μπορούν να αποκτηθούν είναι $2T + 2$, επιτρέποντας τη χρήση της μεταβλητής T ως μεταβλητής ελέγχου για τον περιορισμό του αριθμού των χρεογράφων. [6]

Θυμίζουμε βέβαια ότι λόγω της εξέλιξης των υπολογιστών, πλέον ο υπολογιστικός χρόνος δεν αποτελεί και τόσο μεγάλο εμπόδιο για την επίλυση του προβλήματος της εύρεσης των αποδοτικών χαρτοφυλακίων, ακόμα και για μεγάλο αριθμό διαθέσιμων χρεογράφων.

2.2 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΗΣ ΣΥΓΧΡΟΝΗΣ ΘΕΩΡΙΑΣ ΧΑΡΤΟΦΥΛΑΚΙΟΥ ΣΤΟΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΟ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟ

Η έννοια του ενεργειακού σχεδιασμού αναφέρεται στη διαδικασία διαμόρφωσης μιας πολιτικής με στόχο να δοθεί μια κατεύθυνση σε ένα τοπικό, εθνικό ή και περιφερειακό ενεργειακό σύστημα. Η σημαντική αύξηση στην κατανάλωση ενέργειας κατά τη διάρκεια του 20^{ου} αιώνα και οι επακόλουθες επιπτώσεις στο περιβάλλον υπογράμμισαν τη σημασία του ενεργειακού σχεδιασμού.

Είναι προφανές ότι ο ενεργειακός σχεδιασμός συνιστά ένα πολύπλοκο πλαίσιο, με πολυάριθμες παραμέτρους. Αφενός η πρόοδος της τεχνολογίας προσφέρει συνεχώς νέες μεθόδους για την παραγωγή ενέργειας, αφετέρου οι εκάστοτε επιλογές επηρεάζονται από πολλών ειδών κριτήρια, όπως οικονομικά, γεωπολιτικά, περιβαλλοντικά κ.α. Η λήψη αποφάσεων και γενικότερα η χάραξη ενεργειακής πολιτικής από τους αρμόδιους φορείς συνιστά λοιπόν ένα δύσκολο, αλλά παράλληλα, κρίσιμο πρόβλημα. Για αυτό το λόγο, έχουν προταθεί πολλών ειδών εργαλεία και μοντέλα για τη λύση του.

Τα πιο συνηθισμένα οικονομικά μοντέλα επιχειρούν να προβλέψουν τις δαπάνες που συνεπάγονται οι διάφορες εναλλακτικές προσεγγίσεις, ώστε να επιλεγεί η προσέγγιση που ικανοποιεί τους ενεργειακούς στόχους ελαχιστοποιώντας το κόστος. Αυτού του είδους η ανάλυση ελάχιστου κόστους (least-cost analysis) όμως έχει δεχθεί κριτική διότι δε λαμβάνει υπόψη τον κίνδυνο το προβλεπόμενο κόστος να αποκλίνει από το πραγματικό. Σε αυτό το πλαίσιο, η εφαρμογή των αρχών της Σύγχρονης Θεωρίας Χαρτοφυλακίου στον ενεργειακό σχεδιασμό μπορεί να προσφέρει ίσως πιο αξιόπιστα αποτελέσματα, καθώς δίνει βαρύτητα εκτός από την οικονομική απόδοση κάθε επιλογής και στο ρίσκο που ενέχει.

Στην παρούσα ενότητα, αρχικά θα αναλυθεί η σημασία της έννοιας του ρίσκου στον ενεργειακό σχεδιασμό και στη συνέχεια θα γίνει μια σύντομη βιβλιογραφική ανασκόπηση στις εφαρμογές της ΣΘΧ στο πρόβλημα του ενεργειακού σχεδιασμού, με έμφαση στον καθορισμό του βέλτιστου μίγματος ηλεκτροπαραγωγής.

2.2.1 Ο ρόλος του ρίσκου στον ενεργειακό σχεδιασμό και οι ΑΠΕ

Έχει αποδειχθεί ότι οι μεταβολές στην τιμή του πετρελαίου και του φυσικού αερίου επιδρούν αρνητικά στην οικονομική απόδοση των χωρών που βασίζονται στις εισαγωγές των καυσίμων αυτών. Στο βαθμό που έχει μετρηθεί αυτή η αρνητική συσχέτιση με τους οικονομικούς δείκτες, οι μελλοντικές τιμές του πετρελαίου (και του φυσικού αερίου) αντιπροσωπεύουν ένα μεγάλο ποσοστό ρίσκου για τους καταναλωτές ενέργειας. Κάθε φορά που οι τιμές των καυσίμων αυξάνουν, η οικονομική δραστηριότητα, δηλαδή το εισόδημα των πολιτών και η αξία των περιουσιακών τους στοιχείων, μειώνεται. Λόγω αυτού, η πορεία των τιμών των καυσίμων αποτελεί έναν παράγοντα υψηλού ρίσκου, πράγμα που αποκαλύπτει τη βαρύτητα που πρέπει να δοθεί στους κινδύνους της χρήσης ορυκτών καυσίμων ως προς την ενεργειακή ασφάλεια και στη διαφοροποίηση του ενεργειακού μίγματος [7].

Πιο αναλυτικά, η πρώτη μελέτη επάνω στο θέμα έγινε στις αρχές της δεκαετίας του 1980 από τον Hamilton, ο οποίος παρατήρησε ότι οι αυξήσεις στην τιμή του πετρελαίου μείωσαν την ανάπτυξη των ΗΠΑ κατά την περίοδο 1948-1980 [8]. Σε πιο πρόσφατες μελέτες, έχει παρατηρηθεί πως σημαντικό ρόλο δεν παίζει μόνο η τιμή των καυσίμων (ο μέσος όρος των τιμών για μια χρονική περίοδο), αλλά και η μεταβλητότητα της τιμής αυτής (δηλαδή η τυπική απόκλιση σε ορισμένη χρονική περίοδο). Η Energy Information Administration (IEA) των ΗΠΑ αναφέρει ότι η μεταβλητότητα στις τιμές των καυσίμων κατά τη τριετία 1999-2001 οδήγησε σε μειωμένο ρυθμό ανάπτυξης κατά 0,7%, ποσοστό που μεταφράζεται σε δεκάδες δισεκατομμύρια δολάρια [9].

Με βάση τα παραπάνω, διαφαίνεται η σημασία της έννοιας του ρίσκου στη χάραξη οποιασδήποτε ενεργειακής πολιτικής. Ο ρόλος του ρίσκου θα γίνει πιο ίσως πιο σαφής, αν αναλογιστούμε μια επιλογή με μικρό ρίσκο, όπως οι Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ).

Επικεντρώνοντας στον τομέα της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, είναι αδιαμφισβήτητο ότι το κόστος ηλεκτροπαραγωγής από ΑΠΕ είναι προς το παρόν υψηλότερο από το κόστος λειτουργίας ηλεκτροπαραγωγικών μονάδων με χρήση ορυκτών καυσίμων ή πυρηνικών. Αυτό οφείλεται κυρίως στο γεγονός ότι η χρήση των ΑΠΕ για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας βρίσκεται τεχνολογικά στα πρώτα της βήματα. Το μεγάλο κόστος των ΑΠΕ τις καθιστά μη ελκυστικές εναλλακτικές, με αποτέλεσμα οι αρμόδιοι φορείς να τις εντάσσουν στο ηλεκτροπαραγωγικό μίγμα, μόνο στο βαθμό που δεν αυξάνεται υπερβολικά το συνολικό κόστος για την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών.

Ο Shimon Awerbuch, σε άρθρο του το 2000, εξηγεί γιατί αυτή η προσέγγιση με βάση οδηγεί σε λανθασμένα συμπεράσματα: οι φορείς χάραξης ενεργειακής πολιτικής στην Ευρώπη και τις ΗΠΑ αξιολογούν τις ΑΠΕ χρησιμοποιώντας ξεπερασμένες τεχνικές από τις αρχές του 20^{ου} αιώνα. Τα μοντέλα αυτά, που έχουν ήδη απορριφθεί στη βιομηχανία, μεροληπτούν υπέρ των ριψοκίνδυνων τεχνολογιών ηλεκτροπαραγωγής από ορυκτά καύσιμα, υποτιμώντας την πραγματική αξία των ΑΠΕ, οι οποίες είναι παθητικές τεχνολογίες εντάσεως κεφαλαίου (passive, capital-intensive technologies), με πολύ χαμηλό ρίσκο. Οι ΑΠΕ προσφέρουν μια μοναδική ευκαιρία μείωσης του συνολικού ρίσκου, παράλληλα με άλλα πολύτιμα χαρακτηριστικά, που τα παραδοσιακά μοντέλα αξιολόγησης δε μπορούν να αποτιμήσουν, μιας και στο παρελθόν δεν ήταν τεχνολογικά εφικτά. Τα παραδοσιακά μοντέλα αναφέρονται δηλαδή σε μια παλαιότερη τεχνολογική εποχή.

Μπορεί κανείς να παρατηρήσει ότι η παραδοσιακή προσέγγιση για τον ενεργειακό σχεδιασμό εστιάζει στην εύρεση του χαρτοφυλακίου με το ελάχιστο κόστος (ανάλυση ελάχιστου κόστους), τη στιγμή που στις σημερινές αβέβαιες, συνεχώς μεταβαλλόμενες συνθήκες είναι μάλλον αδύνατο να εντοπιστεί το χαρτοφυλάκιο ελάχιστου κόστους 30 χρόνια αργότερα. Η προσέγγιση του ελάχιστου κόστους αναλογεί με την εύρεση της μετοχής που παρουσίαζε τη μεγαλύτερη απόδοση χθες και την επένδυση μόνο σε αυτή για τα επόμενα 30 χρόνια [10].

Με σωστή κατανόηση και χρήση, οι ΑΠΕ θα μπορούσαν χωρίς αμφιβολία να αποτελέσουν μια βάση για την αναδιαμόρφωση της παραγωγής και διανομής ηλεκτρικής ενέργειας. Οι επενδυτές δεν κατανοούν πλήρως τις μοναδικές οικονομικές ιδιότητες των ΑΠΕ, τα οποία παρουσιάζουν δομικές διαφορές σε σχέση με τις υπάρχουσες εναλλακτικές (ορυκτά καύσιμα). Οι φορείς χάραξης πολιτικής φέρουν λοιπόν την ευθύνη για τη διεύρυνση των οριζόντων στο πλαίσιο της ανάλυσης και αξιολόγησης των διαφόρων τεχνολογιών, ώστε να αντικατοπτρίζουν πιο ολοκληρωμένα τα χαρακτηριστικά των ΑΠΕ [11].

Ένα βήμα προς αυτή την κατεύθυνση είναι η εφαρμογή των αρχών της ΣΘΧ στον ενεργειακό σχεδιασμό. Σε άλλο άρθρο, ο Awerbuch αναλύει τις προοπτικές που ανοίγονται. Παρομοιάζοντας το ενεργειακό μίγμα για την ηλεκτροπαραγωγή με ένα χαρτοφυλάκιο αποτελούμενο από διαφορετικά χρεόγραφα (τεχνολογίες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας), υποστηρίζει ότι οι ΑΠΕ επιδρούν βασικά σαν ένα ακίνδυνο χρεόγραφο που εισάγεται σε ένα επικίνδυνο χαρτοφυλάκιο. Συγκεκριμένα, η χρήση των ΑΠΕ μπορεί ακόμα να μειώσει και το συνολικό κόστος, όταν λαμβάνεται υπόψη ο σημαντικότερος παράγοντας του ρίσκου [12].

Με βάση τα παραπάνω, μπορεί ακόμα να αποδειχθεί ότι η προσθήκη ΑΠΕ σε ένα χαρτοφυλάκιο που αποτελείται από χρεόγραφα συμβατικών τεχνολογιών ορυκτών καυσίμων μπορεί να μειώσει το συνολικό κόστος και το συνολικό ρίσκο του χαρτοφυλακίου, παρ' ότι το κόστος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από ΑΠΕ είναι υψηλότερο, αν το δει κανείς ξεχωριστά. Αν και φαινομενικά περίεργο, αυτή η επίδραση εξηγείται από τη βασική χρηματοοικονομική θεωρία, λόγω της συσχέτισης στο κόστος και το ρίσκο των διαφόρων τεχνολογιών. Συνεπώς, η σχετική αξιολόγηση των τεχνολογιών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας ενδείκνυται να γίνεται όχι με βάση τις εναλλακτικές τεχνολογίες, αλλά με βάση τα εναλλακτικά χαρτοφυλάκια [13].

2.2.2 Προβλήματα κατά την εφαρμογή της ΣΘΧ για το μίγμα ηλεκτροπαραγωγής

Αξίζει εδώ να αναφερθούμε στις παραδοχές της ΣΘΧ και στο κατά πόσο μπορεί να θεωρηθεί ότι ισχύουν κατά τον υπολογισμό των αποδοτικών ενεργειακών χαρτοφυλακίων, καθώς και πόσο σημαντική είναι η επίδραση τους στα αποτελέσματα που θα προκύψουν.

Η βασική παραδοχή απαιτεί την ύπαρξη τέλειων αγορών στην εμπορεία χρεογράφων, δηλαδή αγορές όπου όλοι οι συμμετέχοντες έχουν τέλεια πρόσβαση στις πληροφορίες, ενώ παράλληλα δεν υπάρχουν φραγμοί για την είσοδο ή έξοδο επενδυτών στην αγορά. Επίσης, κανένας συμμετέχων δε μπορεί να ορίσει τις τιμές των χρεογράφων. Κατ' επέκταση, η παραδοχή των τέλειων αγορών προϋποθέτει επίσης χαμηλό κόστος συναλλαγών και αποδόσεις που ακολουθούν την κανονική κατανομή.

Η αγορά των μονάδων ηλεκτροπαραγωγής είναι ως ένα βαθμό μη τέλεια σε σχέση με τις αγορές κεφαλαίων, αφού αντίθετα από τα χρηματοοικονομικά προϊόντα, τα οποία μπορούν να πωληθούν αμέσως, οι επενδύσεις στον ηλεκτροπαραγωγικό

τομέα δε μπορούν να ρευστοποιηθούν τόσο σύντομα. Για παράδειγμα, ο παροπλισμός ενός πυρηνικού εργοστασίου παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας είναι μια χρονοβόρα διαδικασία με μεγάλο κόστος.

Επιπλέον, τα χρηματοοικονομικά προϊόντα μπορούν να θεωρηθούν απείρως διαιρετά, πράγμα που σημαίνει ότι ένα χαρτοφυλάκιο μπορεί να περιέχει οποιοδήποτε ποσοστό ενός χρεογράφου. Στην αγορά της ηλεκτροπαραγωγής δεν ισχύει κάτι τέτοιο, αφού οι επενδύσεις είναι συνήθως μεγάλης κλίμακας. Για μεγάλες περιφέρειες όμως, μπορεί να θεωρηθεί ότι αυτό το φαινόμενο δεν είχε τόσο μεγάλη σημασία [10].

Προσοχή εφιστούν ορισμένοι ερευνητές και στην χρήση της τυπικής απόκλισης ως μέτρο του ρίσκου σε περίπτωση που οι αποδόσεις δεν είναι μεταβλητές που ακολουθούν την κανονική κατανομή, αλλά παρουσιάζουν ασυμμετρία [14]. Σύμφωνα με αυτούς, σε αυτές τις περιπτώσεις, το ρίσκο μπορεί να υποεκτιμηθεί για γεγονότα με πολύ μικρή πιθανότητα, αλλά καταστροφικά αποτελέσματα μεγάλης έκτασης, (όπως για παράδειγμα ένα πυρηνικό ατύχημα).

Έχουν υπάρξει επίσης ερευνητές, οι οποίοι απορρίπτουν την εφαρμογή της ΣΘΧ στα ενεργειακά χαρτοφυλάκια, αφού –σύμφωνα με αυτούς– οι τιμές των καυσίμων δεν ακολουθούν κανενός είδους μοτίβο. Σύμφωνα με αυτούς, οι αποφάσεις στο πολύπλοκο και ραγδαία μεταβαλλόμενο περιβάλλον του ηλεκτροπαραγωγικού τομέα είναι μοναδικές, ανεπανάληπτες και αμετάκλητες [15]. Ο Awerbuch υποστηρίζει πάντως, ότι παρόλο που τα ιστορικά γεγονότα που διαμορφώνουν τις τιμές των καυσίμων (αλλά και τα κόστη επένδυσης και λειτουργίας των ηλεκτροπαραγωγικών μονάδων) δεν πρόκειται να επαναληφθούν, μπορεί να θεωρηθεί ότι γεγονότα *ίδιου τύπου* θα ξανασυμβούν. Με λίγα λόγια, το παρελθόν μπορεί να αποτελέσει έναν οδηγό για το μέλλον. Φυσικά, είναι πιθανό να συμβούν ριζικές αλλαγές στον ηλεκτροπαραγωγικό τομέα στο μέλλον, όμως θεωρούμε ότι η ολότητα των τυχαίων γεγονότων που διαμόρφωσαν τις τιμές των καυσίμων τις τελευταίες δεκαετίες καλύπτουν ένα εύλογο εύρος των προσδοκιών μας για το μέλλον.

2.2.3 Εφαρμογές της ΣΘΧ στον ενεργειακό σχεδιασμό

Η Σύγχρονη Θεωρία Χαρτοφυλακίου εφαρμόστηκε στο πλαίσιο της ενεργειακής διαχείρισης για την ηλεκτροπαραγωγή για πρώτη φορά κατά τη δεκαετία του 1970, σε ένα άρθρο που δημοσιεύτηκε από τους Bar-Lev και Katz [16]. Στο άρθρο αυτό, η θεωρία εφαρμόστηκε σε περιφερειακή βάση για τις ηλεκτροπαραγωγικές μονάδες και τα καύσιμα σε κάθε μια από αυτές. Τα αποδοτικά χαρτοφυλάκια που προέκυψαν συγκρίθηκαν με τις υπάρχουσες μονάδες και προέκυψε ότι τα πραγματικά χαρτοφυλάκια ήταν διαφοροποιημένα με αποδοτικό τρόπο, αλλά ότι χαρακτηρίζονταν από υψηλή απόδοση και υψηλό ρίσκο, πιθανόν λόγω της ισχύουσας νομοθεσίας.

Με βάση τον στόχο της ελαχιστοποίησης του ρίσκου για τις ΗΠΑ σε περίπτωση απότομων αυξήσεων των τιμών της ενέργειας, οι Humphreys και McClain διεξήγαγαν το 1998 μια ανάλογη ανάλυση, σε συνδυασμό με μελλοντικές

εκτιμήσεις για τις διάφορες παραμέτρους. [17] Υπολόγισαν τα αποδοτικά χαρτοφυλάκια που στοχεύουν στην ελαχιστοποίηση των συνεπειών πιθανών σοκ στις τιμές καυσίμων κι όχι αυτά που θα ελαχιστοποιούσαν το συνολικό κόστος της ηλεκτροπαραγωγής. Τα αποτελέσματα τους υποδεικνύουν ότι η βιομηχανία παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας λειτουργούσε σχετικά κοντά στη θέση ελάχιστου ρίσκου, αλλά μια στροφή στη χρήση άνθρακα θα μείωνε ακόμα περισσότερο τη μεταβλητότητα των τιμών για τη συνολική κατανάλωση ενέργειας.

Πολύ σημαντική θεωρείται η συμβολή της έρευνας των Awerbuch και Berger, οι οποίοι το 2003 μελέτησαν τα αποδοτικά ενεργειακά μίγματα για την ηλεκτροπαραγωγή στην ΕΕ, με στόχο την προώθηση της ενεργειακής ασφάλειας [10]. Η μελέτη αυτή συνυπολογίζει το ρίσκο των επί μέρους κατηγοριών του κόστους κάθε ηλεκτροπαραγωγικής μονάδας: κόστος καυσίμου, κόστος λειτουργίας και συντήρησης και κόστος κατασκευής. Εξηγείται επίσης το φαινόμενο της επίδρασης του χαρτοφυλακίου και προκύπτουν ορισμένα αρχικά ευρήματα, ως προς τα οφέλη της εισαγωγής των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στα τυπικά μίγματα συμβατικών καυσίμων. Η μελέτη χρησιμοποιεί σαν μεταβλητές εισόδου την απόδοση (αντίστροφο του κόστους) για κάθε τεχνολογία παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας [MWh/Euro] και τη διακύμανση των απόκλισης της Απόδοσης Περιόδου Διακράτησης (HPR) για κάθε τεχνολογία (ρίσκο). Οι παραδοχές και το μοντέλο της έρευνας αυτής θα παρουσιαστούν αναλυτικότερα παρακάτω, καθώς θα αποτελέσει τη βάση και για το μοντέλο που θα εφαρμοστεί στην παρούσα διπλωματική εργασία.

Το βασικό αυτό μοντέλο, με ορισμένες προσαρμογές και βελτιώσεις, βρήκε εφαρμογή σε πολλές μελέτες μέχρι σήμερα. Σημαντικές προσαρμογές στο μοντέλο πρότεινε το 2006 μια ομάδα ερευνητών από την Ολλανδία. Οι Jansen et al. χρησιμοποιούν ως μεταβλητή εισόδου το κόστος (και την απόκλιση του) αντί της απόδοσης, και προτιμούν να κάνουν υπολογισμούς με βάση την παραγόμενη ενέργεια ανά τεχνολογία σε κάποιο χρονικό διάστημα αντί της εγκατεστημένης ισχύος (ειδικά στις ΑΠΕ οι αριθμοί διαφέρουν κατά πολύ). Το πεδίο εφαρμογής είναι εδώ το ολλανδικό ενεργειακό μίγμα. [18] Η ίδια προσέγγιση με βάση το κόστος υιοθετήθηκε από τον Awerbuch και εφαρμόστηκε σε συνεργασία με τους Jansen και Beurskens για το ενεργειακό μίγμα τεσσάρων αναπτυσσόμενων χωρών [19] [20]. Μια μελέτη στο ίδιο κλίμα έγινε εστιάζοντας στη γεωθερμία στις δυτικές Ηνωμένες Πολιτείες [21], ενώ σε μια άλλη συνεργασία με τον Dr Pat DeLaquil και την ομάδα του μελετήθηκε η περίπτωση του ενεργειακού μίγματος της Πολιτείας της Βιρτζίνια (ΗΠΑ) [22]. Ο Awerbuch δημοσίευσε άλλο ένα άρθρο το 2006 επικαλούμενος το μοντέλο αυτό για να υποστηρίξει τη σημασία της διαφοροποίησης στο ενεργειακό μίγμα με την αύξηση του ποσοστού των (ΑΠΕ) [23]. Η ίδια μεθοδολογία χρησιμοποιήθηκε από τους Krey και Zweifel για εφαρμογή στα ενεργειακά χαρτοφυλάκια των ΗΠΑ και της Ελβετίας. [24] Οι ερευνητές Huang και Wu επεκτείνουν το μοντέλο αυτό ορίζοντας διαστήματα διαφορετικής ζήτησης ηλεκτρισμού και το εφαρμόζουν στο ενεργειακό μίγμα της Ταϊβάν [25]. Επίσης, οι

Gotham et al. διαχωρίζουν το απαιτούμενο φορτίο σε διαφορετικές "κλάσεις", στις οποίες κάθε τεχνολογία έχει διαφορετικό συντελεστή φορτίου (load factor) και εφαρμόζουν το μοντέλο στην Πολιτεία της Ιντιάνα (ΗΠΑ) [26]. Στην Ιρλανδία, οι McLoughlin και Bazilian υπολογίζουν τα αποδοτικά χαρτοφυλάκια για το ενεργειακό μίγμα της χώρας [27], ενώ οι Doherty et al. επικεντρώνονται στη συμβολή της ατομικής ενέργειας για διαφορετικά σενάρια των τιμών των καυσίμων το 2020 και εφαρμόζουν ένα μοντέλο που αναγνωρίζει διαφορετική απαίτηση φορτίου για διαφορετικά χρονικά διαστήματα [28]. Ενδιαφέρον παρουσιάζει επίσης η προσέγγιση των Awerbuch και Yang για τον υπολογισμό του περιβαλλοντικού κόστους (κόστος CO₂) και της διακύμανσης του, αλλά και της συνδιακύμανσης του με τις τιμές των καυσίμων [29]. Τέλος, απλές εφαρμογές του μοντέλου έχουν γίνει από διάφορους ερευνητές για τον ενεργειακό σχεδιασμό της Καλιφόρνιας [30], της Σκωτίας [31], της Κίνας [32] αλλά και της Κύπρου [33]. Αρκετές μελέτες έχουν γίνει και για μικρότερες απομονωμένες περιοχές όπως τις Κανάριες Νήσους [34] και τις Νήσους Φίτζι [35].

Μια αρκετά διαφορετική προσέγγιση ήρθε από τους Van Zon και Fuss, οι οποίοι πρότειναν ένα μαθηματικό μοντέλο που διαχωρίζει τις τεχνολογίες σε οικογένειες που περιέχουν διαφορετικές γενιές της ίδιας τεχνολογίας (πχ gas-fired-turbine-family, coal-fired-turbine-family, κτλ) και βελτιστοποιεί μια μόνο αντικειμενική συνάρτηση, η οποία ορίζεται ως το σταθμισμένο άθροισμα του κόστους και της διακύμανσης του. Και αυτό το μοντέλο αναγνωρίζει τη διαφορά ανάμεσα σε παραγόμενη ενέργεια και εγκατεστημένη ισχύ [36] [37]. Η Fuss δημοσίευσε το 2010 μαζί με μια ομάδα άλλων ερευνητών ένα άρθρο όπου το μοντέλο γίνεται πιο πολύπλοκο, λαμβάνοντας υπόψη διάφορα σενάρια με διαφορετικές πιθανότητες πραγματοποίησης, καθώς και προσαρμογές στο μοντέλο για μη κανονικές κατανομές των μεταβλητών [38].

Ένα βήμα παραπέρα πήγαν οι Kienzie και Andersson, επεκτείνοντας το μοντέλο για την παραγωγή διαφορετικών μορφών ενέργειας εκτός της ηλεκτρικής, όπως για παράδειγμα ενέργεια για θέρμανση και ψύξη [39].

Ένα από τα πιο πρόσφατα άρθρο από τους Delarue et al. προτείνει ένα ολοκληρωμένο μοντέλο, που κάνει διαχωρισμό ανάμεσα στις έννοιες της εγκατεστημένης ισχύος, της παραγόμενης ενέργειας και της διαθέσιμης ενέργειας ανά χρονικό διάστημα. Με αυτό τον τρόπο, λαμβάνονται υπόψη η μεταβλητότητα της ατομικής ενέργειας αλλά και τα όρια φορτίων των μονάδων παραγωγής ενέργειας με συμβατικά καύσιμα [40].

Σε διαφορετικό κλίμα, οι Roque et al. επιχειρούν να εφαρμόσουν τη Σύγχρονη Θεωρία Χαρτοφυλακίου σε μία απελευθερωμένη αγορά ενέργειας, όπου η χρηματική απόδοση των επενδύσεων έχει σημαντικότερο ρόλο από το κόστος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Χρησιμοποιούν προσομοίωση τύπου Monte-Carlo για να εξαγάουν τις τιμές των καυσίμων και τη διακύμανση τους, με βάση τη Καθαρή Παρούσα Αξία, για τρία διαφορετικά σενάρια συνδιακυμάνσεων [41]. Αντίστοιχο μοντέλο χρησιμοποιεί ο Roque με μια άλλη ομάδα ερευνητών, με πεδίο

εφαρμογής την αιολική ενέργεια στην Ευρώπη [42]. Την ίδια κατεύθυνση, όπου οι επενδύσεις στον τομέα της ηλεκτροπαραγωγής δεν επηρεάζονται από τις εθνικές ή περιφερειακές πολιτικές, αλλά από τους κανόνες της αγοράς, έχουν ακολουθήσει και άλλοι ερευνητές, όπως οι Madlener και Wenk σε μελέτη τους για τον ηλεκτροπαραγωγικό τομέα της Ελβετίας [43], αλλά και σε άλλο άρθρο για τα οφέλη των διαφοροποιημένων επενδύσεων στον τομέα της συμπαραγωγής στην Ευρώπη [44].

3. ΜΕΛΕΤΗ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗΣ. Το ηλεκτροπαραγωγικό μίγμα της ΕΕ το 2020.

Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας, θα εφαρμοστεί η ΣΘΧ για τον σχεδιασμό της ηλεκτροπαραγωγής στην ΕΕ έως το 2020. Ως βάση θα χρησιμοποιηθούν οι έρευνες των Awerbuch και Berger (2003) και Awerbuch και Yang (2007). Το μοντέλο επίλυσης θα ακολουθήσει το κριτήριο μέσης τιμής-MAD των Konno και Yamazaki, ενώ θα γίνει παραγωγή μέρους των δεδομένων εισόδου με δειγματοληψία Monte Carlo.

3.1 Η ενεργειακή πολιτική της ΕΕ

Η Ευρώπη, όπως και πολλές περιοχές σε όλο τον κόσμο, βρίσκεται υπό πίεση, όσον αφορά στην αντιμετώπιση μεγάλων προκλήσεων, όπως η κλιματική αλλαγή, η αυξανόμενη εξάρτηση από την εισαγόμενη ενέργεια, η εξάντληση των ενεργειακών πόρων και η ανάγκη διασφάλισης της πρόσβασης για όλους τους καταναλωτές της σε ασφαλή ενέργεια σε προσιτές τιμές.

Για την επίτευξη αυτών των στόχων, η Ευρωπαϊκή Ένωση θέτει σε εφαρμογή μια ενεργειακή πολιτική σε πολλά επίπεδα, η οποία καλύπτει όλο το φάσμα των πηγών ενέργειας, από τα ορυκτά καύσιμα (πετρέλαιο, φυσικό αέριο και άνθρακας) μέχρι την πυρηνική ενέργεια και τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ηλιακή, αιολική, βιομάζας, γεωθερμική, υδροηλεκτρική και παλιρροϊκή ενέργεια).

Στόχος του ευρωπαϊκού μπλοκ είναι να τεθεί σε εφαρμογή μια οικονομία με χαμηλές εκπομπές άνθρακα, κάνοντας παράλληλα τις πηγές ενέργειας πιο βιώσιμες και ασφαλείς, και να εξασφαλίσει χαμηλές τιμές για τους καταναλωτές.

Όπως αναφέρθηκε, το πλαίσιο στο οποίο καλείται να δράσει η ΕΕ είναι αρκετά πολύπλοκο και δημιουργεί μια σειρά από σημαντικές προκλήσεις, όπως:

- Η αύξηση της ζήτησης για ενέργεια. Η ενεργειακή ζήτηση αναμένεται να αυξηθεί με ετήσιο ρυθμό 1.5%, μια αύξηση που θα φτάσει συνολικά το 40% το 2030. Το 90% αυτής αύξησης αναφέρεται στην Κίνα, την Ινδία και τις χώρες της Μέσης Ανατολής. Η αυξανόμενη εκβιομηχάνιση και η οικονομική ανάπτυξη στις χώρες αυτές προκαλούν αυξανόμενη ενεργειακή ζήτηση [45]. Είναι φανερό ότι υπάρχει ήδη έντονος ανταγωνισμός για τους ενεργειακούς πόρους σε παγκόσμιο επίπεδο.
- Η εξάρτηση από τις εισαγωγές. Αυξάνει συνεχώς η εξάρτησή της ΕΕ από τις εισαγωγές. Κατά τα επόμενα 20 έτη ποσοστό γύρω στο 55% των ενεργειακών απαιτήσεων της Ένωσης, σε σύγκριση με ποσοστό 45% σήμερα, θα καλύπτεται από εισαγόμενα προϊόντα – ορισμένα, μάλιστα, από πολιτικά ασταθείς περιοχές. [46]
- Η μειωμένη πρόσβαση στα παγκόσμια ενεργειακά αποθέματα. Τα παγκόσμια ενεργειακά αποθέματα βρίσκονται συγκεντρωμένα σε λίγες μόνο χώρες. Τα αποδεδειγμένα αποθέματα πετρελαίου και φυσικού αερίου είναι άνισα κατανομημένα και μόνο λίγες χώρες θα συνεχίσουν τις εξαγωγές. Από στοιχεία φαίνεται ότι η παροχή πετρελαίου από χώρες εκτός του ΟΠΕΚ (Οργανισμός εξαγωγών πετρελαιοπαραγωγών Χωρών-Organization of the Petroleum Exporting Countries, OPEC) θα μειωθεί απότομα, με αποτέλεσμα

την αύξηση της ζήτησης πετρελαίου από τον ΟΠΕΚ, του οποίου το 60% βρίσκεται στον Περσικό Κόλπο. Τα αποθέματα του φυσικού αερίου είναι λιγότερο συγκεντρωμένα, αλλά η Ρωσία μαζί με την περιοχή της Κασπίας θάλασσας και τη Μέση Ανατολή κατέχουν τα 2/3 του συνολικού αερίου [47].

- Οι αυξανόμενες και ασταθείς τιμές για το πετρέλαιο και το φυσικό αέριο. Οι τιμές του πετρελαίου και αερίου αυξάνουν. Η τιμή του πετρελαίου ανά βαρέλι έχει πρακτικώς τριπλασιαστεί κατά την τελευταία δεκαετία, επακολουθεί δε αύξηση των τιμών ηλεκτρικής ενέργειας. Η κατάσταση αυτή είναι δύσκολη για τους καταναλωτές. Με την αύξηση της παγκόσμιας ζήτησης ορυκτών καυσίμων, την πίεση στα κυκλώματα προμήθειας και την αυξανόμενη εξάρτηση από τις εισαγωγές, το πιθανότερο είναι ότι οι τιμές πετρελαίου και αερίου θα παραμείνουν υψηλές.
- Η αλλαγή του κλίματος. Το κλίμα του πλανήτη μας γίνεται θερμότερο. Σύμφωνα με την Διακυβερνητική Επιτροπή για την Αλλαγή του Κλίματος (IPCC), οι εκπομπές αερίων θερμοκηπίου έχουν ήδη ανεβάσει τη θερμοκρασία κατά 0,6 βαθμούς Κελσίου παγκοσμίως. Εάν δεν ληφθούν μέτρα, θα σημειωθεί αύξηση κατά 1,1 έως 6,4 βαθμούς έως τα τέλη του αιώνα [48]. Όλες οι περιοχές του κόσμου - συμπεριλαμβανομένης της ΕΕ - θα αντιμετωπίσουν σοβαρές συνέπειες, τόσο για τις οικονομίες τους όσο και για τα οικοσυστήματά τους.

Όπως είναι αναμενόμενο, η πολιτική της ΕΕ διαμορφώνεται με βάση αυτές τις συνθήκες, με στόχο την διασφάλιση της πρόσβασης σε ενέργεια για όλους τους πολίτες της.

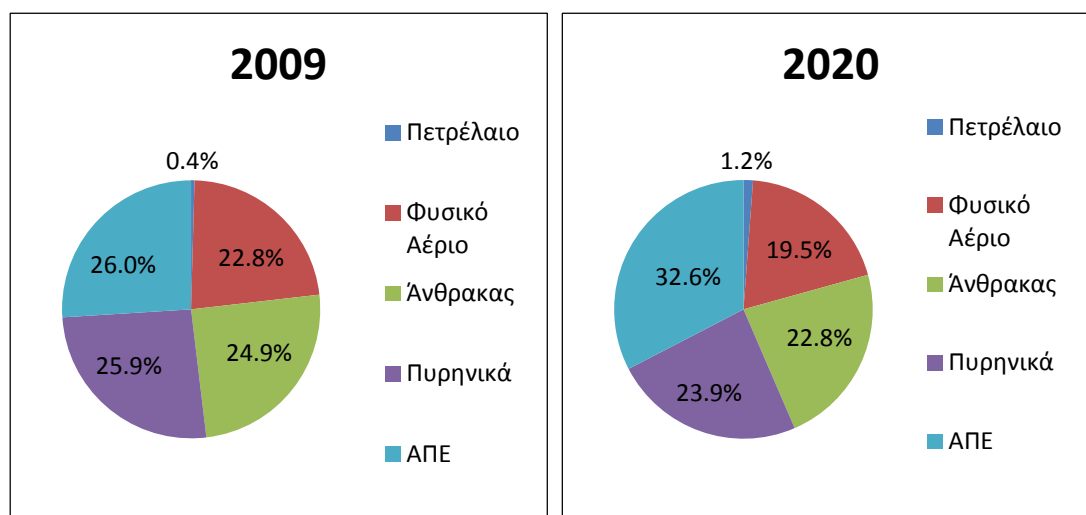
Η ολοένα αυξανόμενη ζήτηση ενέργειας σε συνδυασμό με τους φόβους για τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις της χρήσης ορυκτών καυσίμων (φαινόμενο του θερμοκηπίου) έχουν οδηγήσει την ΕΕ προς τη χάραξη μιας ενεργειακής πολιτικής που βασίζεται όλο και περισσότερο στις Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας και προωθεί την αύξηση της ενεργειακής απόδοσης και της καινοτομίας. Η ΕΕ έχει θέσει για τον εαυτό της το στόχο της μείωσης των εκπομπών των αερίων του θερμοκηπίου τουλάχιστον κατά 20% μέχρι το 2020, σε σύγκριση με το 1990. Επίσης, τέθηκε ο στόχος της χρήσης κατά 20% ανανεώσιμων πηγών ενέργειας για τις συνολικές ανάγκες ενέργειας της ΕΕ, όπως επίσης και μια ελάχιστη χρήση 10% βιοκαυσίμων αντί πετρελαίου και ντίζελ για τις μεταφορές στην ΕΕ [49].

Σημαντικός παράγοντας είναι επίσης η ανάγκη για ενεργειακή ασφάλεια (ασφάλεια του ενεργειακού εφοδιασμού), ένα πρόβλημα που προκύπτει αφενός από το μεγάλο ποσοστό εξάρτησης της ΕΕ από την εισαγωγή ορυκτών καυσίμων από πολιτικά ασταθείς περιοχές και αφετέρου από τα προβλήματα που προκύπτουν λόγω της μεγάλης διακύμανσης που παρουσιάζει η τιμή ζήτησης σε διαφορετικές ώρες της ημέρας ή χρονικές περιόδους. Η διασφάλιση ενός διαφοροποιημένου ενεργειακού μείγματος είναι ένας στόχος κλειδί για την προστασία της Ευρώπης από πιθανές εξωτερικές ενεργειακές κρίσεις και για την μακροπρόθεσμη επίτευξη της ασφάλειας του ενεργειακού εφοδιασμού [50].

Με σκοπό τη διασφάλιση της λειτουργίας της εσωτερικής αγοράς ενέργειας, της μεγαλύτερης ανταγωνιστικής αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας και φυσικού αερίου στον κόσμο, η Ευρωπαϊκή Ένωση καθορίζει τις υποχρεώσεις για τη διασφάλιση του εφοδιασμού ηλεκτρικής ενέργειας και αναλαμβάνει σημαντικές επενδύσεις σε δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας. Σύμφωνα με την ισχύουσα νομοθεσία, κατά τη θέσπιση μέτρων για την εφαρμογή της πολιτικής, τα κράτη μέλη πρέπει να λαμβάνουν υπόψη εκτός των άλλων τις ανάγκες για εισαγωγή ενός ορισμένου βαθμού διαφοροποίησης της ηλεκτροπαραγωγής προκειμένου να εξασφαλισθεί η αναγκαία ισορροπία μεταξύ των διάφορων πρωτογενών καυσίμων.

Επικεντρώνοντας περισσότερο στην ενεργειακή πολιτική της ΕΕ όσον αφορά στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, μπορεί κανείς να παρατηρήσει μια σταδιακή ένταξη ενός ποσοστού ΑΠΕ στο ενεργειακό μίγμα ηλεκτροπαραγωγής. Η αύξηση της χρήσης των ΑΠΕ γίνεται όμως με περιορισμένη ταχύτητα, λόγω του υψηλού κόστους που παρουσιάζουν. Όπως είδαμε σε προηγούμενη ενότητα, οι αναλύσεις ελάχιστου κόστους, στην προσπάθεια τους να διατηρηθεί όσο το δυνατόν χαμηλότερα το συνολικό κόστος, περιορίζουν τη χρήση ΑΠΕ στο ελάχιστο δυνατό, χωρίς να λαμβάνουν υπόψη τα πλεονεκτήματα των ΑΠΕ, οι οποίες είναι παθητικές τεχνολογίες εντάσεως κεφαλαίου με πολύ χαμηλό ρίσκο.

Με βάση στοιχεία που εκδίδει η ΕΕ, το ισχύον³ μίγμα για την ηλεκτροπαραγωγή στην ΕΕ περιλαμβάνει περίπου ίσα ποσοστά ηλεκτροπαραγωγής από φυσικό αέριο, άνθρακα, πυρηνικά και ΑΠΕ, ενώ η ηλεκτροπαραγωγή από πετρέλαιο κατέχει ποσοστό κάτω του 1%. Σύμφωνα με την ισχύουσα κοινοτική ενεργειακή πολιτική, το ενεργειακό μίγμα το 2020 προβλέπεται να αποτελείται από υψηλότερα ποσά ηλεκτροπαραγωγής από ΑΠΕ, τα οποία θα αντικαταστήσουν τα ορυκτά καύσιμα [51]. Τα συγκεκριμένα ποσοστά απεικονίζονται στα παρακάτω γραφήματα.



Γράφημα 2.1: Ισχύον και προσδοκώμενο μίγμα ηλεκτροπαραγωγής της ΕΕ (2009-2020)

³ Από δεδομένα για το 2009.

3.2 Το μοντέλο του Awerbuch στη μελέτη για το ενεργειακό χαρτοφυλάκιο της ΕΕ το 2003 και οι τροποποιήσεις

Πριν προχωρήσουμε στην περιγραφή του μοντέλου που θα χρησιμοποιήσουμε για τη μελέτη περίπτωσης που θα εφαρμόσουμε στο μίγμα ηλεκτροπαραγωγής της ΕΕ, θεωρείται σκόπιμο να αναφερθούμε στις βασικές αρχές του μοντέλου, πάνω στο οποίο βασιστήκαμε. Το μοντέλο προτάθηκε από τους Awerbuch και Berger το 2003, στα πλαίσια της αντίστοιχης μελέτης τους για τον ενεργειακό σχεδιασμό της ΕΕ. [10]

Θα αναφέρουμε τις παραδοχές πάνω στις οποίες βασίζεται το μοντέλο καθώς και στην αντιστοιχία που γίνεται ανάμεσα στα χρηματοοικονομικά μεγέθη και τις μεταβλητές του ενεργειακού σχεδιασμού.

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, το χαρτοφυλάκιο εδώ απαρτίζεται από χρεόγραφα των τεχνολογιών ηλεκτροπαραγωγής. Στην πιο απλή περίπτωση, οι τεχνολογίες χωρίζονται με βάση την πηγή ενέργειας, έτσι υπάρχουν οι εξής εναλλακτικές: Πετρέλαιο, Φυσικό Αέριο, Άνθρακας, Πυρηνικά, ΑΠΕ. Είναι εμφανές ότι κάθε μια από αυτές τις τεχνολογίες έχει διαφορετικό κόστος, αλλά επίσης ενέχει και διαφορετικό επίπεδο ρίσκου. Για παράδειγμα, η ηλεκτροπαραγωγή με βάση το φυσικό αέριο μπορεί να παρουσιάζει χαμηλότερο κόστος από τη χρήση ΑΠΕ, προσομοιώνεται όμως σαν μια επένδυση με υψηλότερο ρίσκο, κυρίως λόγω της αστάθειας στην τιμή του καυσίμου. Σημαντικό ρόλο παίζει και η συσχέτιση των τεχνολογιών μεταξύ τους, στα πλαίσια της αρχής της διαφοροποίησης.

Σχετικά με τις τεχνολογίες ηλεκτροπαραγωγής από ΑΠΕ, ο Awerbuch υποστηρίζει ότι σε γενικές γραμμές αντιπροσωπεύονται επαρκώς από την αιολική ενέργεια, κι έτσι χρησιμοποιεί τα διαθέσιμα δεδομένα κοστολόγησης για αυτήν.

3.2.1 Ρίσκο

Στην περίπτωση των ηλεκτροπαραγωγικών χρεογράφων, το ρίσκο για το ύψος του κόστους ορίζεται με τρόπο ανάλογο με τον ορισμό που χρησιμοποιείται στα χρηματοοικονομικά χρεόγραφα. Δηλαδή, το ρίσκο είναι η τυπική απόκλιση των τιμών για ορισμένη χρονική περίοδο. Όταν αναφερόμαστε στο ρίσκο των τιμών των καυσίμων, προτείνεται ο υπολογισμός της διακύμανσης όχι των τιμών αυτών καθαυτών, αλλά των μεταβολών των τιμών τους ανά τακτά χρονικά διαστήματα. Αυτή η μετατροπή, που ακολουθείται συνήθως και στα χρηματοοικονομικά χρεόγραφα, μετατρέπει τις τιμές σε ποσοστά, ώστε να απαλειφθούν πιθανές διαφορές τάξης μεγέθους για το κόστος των διαφόρων καυσίμων. Το υπολογιζόμενο ποσοστό ονομάζεται Απόδοση Περιόδου Διακράτησης (Holding Period Return, HPR). Για τις τιμές των καυσίμων, τα HPR υπολογίζονται με τον παρακάτω τύπο:

$$HPR_t = \frac{EV_t - BV_t}{BV_t}$$

όπου BV_t είναι η αρχική τιμή και EV_t είναι η τελική τιμή ανά μονάδα καυσίμου για μια χρονική περίοδο, πχ ένα έτος⁴.

Αξίζει εδώ να αναφερθεί ότι οι ΑΠΕ δε χρησιμοποιούν κάποιο καύσιμο για την παραγωγή ενέργειας, συνεπώς δεν εμπεριέχουν καθόλου ρίσκο ως προς την τιμή του καυσίμου. Αυτό σημαίνει ότι θα συμπεριφέρονται στο χαρτοφυλάκιο ως ακίνδυνα χρεόγραφα με μηδενικό ρίσκο.

3.2.2 Απόδοση και Κόστος

Στην αρχική του μελέτη για το ηλεκτροπαραγωγικό μίγμα της ΕΕ, ο Awerbuch, θέλοντας να διατηρήσει μια ξεκάθαρη αναλογία ανάμεσα στο αρχικό μοντέλο του Markowitz και το μοντέλο εφαρμογής του στον ενεργειακό σχεδιασμό, πρότεινε τη χρήση του μεγέθους της απόδοσης κάθε τεχνολογίας ηλεκτροπαραγωγής. Συγκεκριμένα, όρισε ότι η απόδοση θα αναφέρεται σε χρηματικές μονάδες ανά μονάδες εγκατεστημένης ηλεκτρικής ισχύος. Για τον υπολογισμό του μεγέθους αυτού, καταφεύγει απλά στην αντιστροφή του κόστους παραγωγής ενέργειας (C_i), δηλαδή:

$$R_i = \frac{1}{C_i}$$

Με αυτό τον τρόπο, φαίνεται και η επενδυτική διάσταση του μοντέλου, αφού μπορεί κανείς να αναφέρεται για παράδειγμα στον αριθμό KW που θα αποδοθεί ανά δολάριο που επενδύεται.

Όπως προαναφέρθηκε στη βιβλιογραφική έρευνα όμως, μετά από ένσταση των Jansen et al., η απόδοση αντικαταστάθηκε από το κόστος. Εκτός από την ασάφεια του όρου της απόδοσης για τα ενεργειακά χαρτοφυλάκια, η ομάδα των Ολλανδών ερευνητών έδειξε ότι κατά τη χρήση της απόδοσης δημιουργείται σφάλμα στους υπολογισμούς, αφού ο αντίστροφος μέσος όρος των αντίστροφων δυο αριθμών δεν είναι το ίδιο με το μέσο όρο τους [18].

$$\frac{1}{\bar{R}} \neq \frac{1}{n} \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n} \right)$$

Αυτό σημαίνει ότι η αριθμητική τιμή που υπολογίζεται για τη συνολική απόδοση του χαρτοφυλακίου δε μπορεί να αντιστραφεί και να δώσει το συνολικό κόστος.

Φυσικά, όταν η απόδοση αντικαθίσταται από το κόστος, το πρόβλημα του χαρτοφυλακίου θα έχει ως στόχο όχι τη μεγιστοποίηση της απόδοσης με παράλληλη ελαχιστοποίηση του ρίσκου, αλλά την ταυτόχρονη ελαχιστοποίηση κόστους και ρίσκου.

Μια δεύτερη παρατήρηση είναι ότι η εγκατεστημένη ισχύς δεν ανταποκρίνεται πάντα στην παραγόμενη ενέργεια (ιδίως στις τεχνολογίες διαλείποντος λειτουργίας,

⁴ Τα HPR βασίζονται στις ιστορικές ονομαστικές τιμές των καυσίμων

όπως οι ΑΠΕ), οπότε είναι καλύτερα να χρησιμοποιούνται για το κόστος μονάδες παραγόμενης ενέργειας (πχ €/MWh) αντί για εγκατεστημένη ισχύ.

Οι παραπάνω τροποποιήσεις, τις οποίες αποδέχθηκε και ο Awerbuch και τις ενσωμάτωσε στις επόμενες μελέτες που διεξήγαγε [40], θα τηρηθούν και στην παρούσα εργασία.

3.2.3 Δεδομένα εισόδου

Στο πρώτο στάδιο της έρευνας τους για την ΕΕ, οι Awerbuch και Berger κάνουν υπολογισμούς για το ρίσκο μόνο με βάση τις τιμές των καυσίμων για κάθε τεχνολογία. Αυτό σημαίνει ότι οι ΑΠΕ παρουσιάζουν μηδενικό ρίσκο και το υπολογισμένο ρίσκο για τις άλλες τεχνολογίες προκύπτει από τη διακύμανση των τιμών τους. Παρομοίως, κατά την υπολογισμό του συνολικού ρίσκου χαρτοφυλακίου, οι συντελεστές συσχέτισης προκύπτουν μόνο από την παρατηρούμενη συνδιακύμανση στις τιμές των καυσίμων.

Παρότι το ρίσκο που προκύπτει από τη μεταβλητότητα των τιμών θεωρείται σχετικά αντιπροσωπευτικό για το συνολικό ρίσκο επένδυσης σε κάθε τεχνολογία, είναι απαραίτητο σε επόμενο στάδιο να συνυπολογιστούν στο ρίσκο και οι υπόλοιποι παράγοντες που επηρεάζουν κάθε επένδυση. Είναι σημαντικό δηλαδή να υπολογιστεί το ρίσκο με βάση όλους τους παράγοντες κόστους, όπως το κόστος επένδυσης και το κόστος λειτουργίας και συντήρησης (O&M). Για τις κατηγορίες αυτές του κόστους, δεν υπάρχουν όμως διαθέσιμες χρονοσειρές με παρελθοντικά δεδομένα, οπότε οι Awerbuch και Berger προσπαθούν να προσεγγίσουν τις τυπικές αποκλίσεις τους με βάση ενδιάμεσων (proxy), θεωρούν δηλαδή ότι θα παρουσιάζουν παρόμοια διακύμανση με ορισμένα σύνολα μετοχών ή ομολόγων.

Συνοπτικά, το κόστος κατηγοριοποιήθηκε σε 4 κατηγορίες, και υπολογίστηκε η διακύμανση (ρίσκο) κάθε μιας από αυτές. Εκτός από την περίπτωση του κόστους καυσίμων, όπου η διακυμάνσεις και οι συντελεστές συσχέτισης ήταν δυνατό να υπολογιστούν από τις καταγεγραμμένες τιμές τις τελευταίες δύο δεκαετίες, το ρίσκο των άλλων κατηγοριών του κόστους προσεγγίστηκε με βάση τη διακύμανση κάποιων χρηματιστηριακών δεικτών. Επίσης, ορίστηκαν αυθαίρετα οι συντελεστές συσχέτισης ανάμεσα στις κατηγορίες κόστους. Ελλείψη δεδομένων, θεωρήθηκε ότι οι κατηγορίες αυτές παρουσιάζουν τις ίδιες συνδιακυμάνσεις ανεξάρτητα από το σε ποιες τεχνολογίες αναφέρονται. Για παράδειγμα, όλα τα μεταβλητά κόσθη λειτουργίας και συντήρησης (Variable O&M Cost) παρουσιάζουν συνδιακύμανση 0.1 σε σχέση με τα σταθερά (Fixed O&M Cost), σε όλους τους πιθανούς συνδυασμούς των διαθέσιμων τεχνολογιών.

Ο τρόπος υπολογισμού του ρίσκου για κάθε κατηγορία του κόστους κάθε τεχνολογίας συνοψίζεται στον επόμενο πίνακα.

Πίνακας 3.1: Υπολογισμός του ρίσκου για τους παράγοντες κόστους κατά Awerbuch (2003)

Ρίσκο για τις Κατηγορίες Κόστους κατά Awerbuch και Berger (2003)	
<i>Κατηγορία</i>	<i>Εκτίμηση του ρίσκου</i>
Κόστος Καυσίμου	Τυπική απόκλιση των HPR των χρονοσειρών
Σταθερό Κόστος Ο&Μ	Τυπική Απόκλιση HPR εταιρικών ομολόγων
Μεταβλητό Κόστος Ο&Μ	Τυπική Απόκλιση HPR όλων των χρεογράφων σε μια αγορά
Κόστος Επένδυσης	Τυπική Απόκλιση HPR όλων των χρεογράφων σε μια αγορά για πολύπλοκες μη προσαρμοστικές μονάδες. Μηδέν για απλές προσαρμοστικές μονάδες

Τελικά, το συνολικό κόστος του χαρτοφυλακίου υπολογίζεται ως άθροισμα των επί μέρους κοστών και το συνολικό ρίσκο υπολογίζεται ως σταθμικός μέσος, δηλαδή με βάση το ποσοστό συμμετοχής του κάθε παράγοντα στο συνολικό κόστος που προκύπτει.

Σε επόμενη μελέτη με τον Yang (2007), ο Awerbuch προσθέτει ως κατηγορία το κόστος του διοξειδίου, υπολογίζοντας το ρίσκο του από τα μέχρι στιγμής δεδομένα από το χρηματιστήριο των ρύπων και τη συσχέτιση του με τις τιμές των καυσίμων από έναν εμπειρικό τύπο σε συνδυασμό με δοκιμές τύπου Monte Carlo [29].

4. ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

Όπως προαναφέρθηκε, το μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία ακολουθεί τις αρχές του μοντέλου Awerbuch, παρουσιάζει όμως ορισμένες σημαντικές τροποποιήσεις, με βάση το μοντέλο των Konno και Yamazaki.

Οι κυριότερες μετατροπές που υλοποιήθηκαν είναι οι παρακάτω:

- i. Ως μέτρο του ρίσκου δε χρησιμοποιείται η διακύμανση (και κατ' επέκταση η τυπική απόκλιση), αλλά η μέση απόλυτη απόκλιση (MAD).
- ii. Ως δεδομένα εισόδου χρησιμοποιήθηκαν εν μέρει χρονοσειρές για το κόστος που παρήχθησαν με δειγματοληψία Monte Carlo με βάση τις διακυμάνσεις και τους συντελεστές συσχέτισης που προτείνονται στη βιβλιογραφία.

Υπενθυμίζεται ότι για τον υπολογισμό της MAD δεν απαιτείται η εισαγωγή δεδομένων συντελεστών συσχέτισης, απαιτούνται όμως όλες οι χρονοσειρές.

Η επίλυση του μοντέλου έγινε στο πρόγραμμα GAMS, όπου για την εύρεση του αποδοτικού μετώπου χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος AUGMECON (augmented ε-constraint method). Η ε-constraint μέθοδος χρησιμοποιείται για την επίλυση προβλημάτων πολυκριτηριακού προγραμματισμού, παράγοντας το κατά Pareto αποτελεσματικό μέτωπο [52]. Η παραλλαγή της αυτή παράγει μόνο ισχυρές (και όχι ασθενείς) κατά Pareto αποδοτικές λύσεις. Επίσης επιταχύνει τη διαδικασία υπολογισμού, αφού μπορεί να πραγματοποιήσει μια πρώιμη έξοδο από τους βρόχους που οδηγούν σε μη πραγματοποιήσιμες λύσεις, αποφεύγοντας τις περιττές επαναλήψεις [53].

Οι τροποποιήσεις και το πλαίσιο εφαρμογής του μοντέλου αναπτύσσονται στις παρακάτω ενότητες. Αρχικά αναφέρονται οι πηγές των δεδομένων για το κόστος και το ρίσκο, καθώς και ο τρόπος εισαγωγής τους στο μοντέλο, ενώ στη συνέχεια εξηγείται αναλυτικά η μεθοδολογία παραγωγής των απαιτούμενων χρονοσειρών μέσω δειγματοληψίας Monte Carlo. Στο παράρτημα Π.1 παρουσιάζεται ο κώδικας GAMS που χρησιμοποιήθηκε.

4.1 Κόστος τεχνολογιών-SETIS Energy Calculator

Για την εύρεση τιμών για το κόστος των τεχνολογιών χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο υπολογισμού που προτείνεται από το SETIS, μια υπηρεσία της Ευρωπαϊκής Επιτροπής που παρέχει πληροφορίες σχετικά με την εφαρμογή της ενεργειακής τεχνολογικής στρατηγικής της ΕΕ. Το SETIS (Strategic Energy Technology Information System) λειτουργεί στα πλαίσια SET-Plan (Strategic Energy Technology Plan), το οποίο στοχεύει στην προώθηση ενεργειακών τεχνολογιών χαμηλών εκπομπών άνθρακα στην ΕΕ [54]. Σε αυτό το πλαίσιο, στην ιστοσελίδα της υπηρεσίας παρέχεται ένα πρόγραμμα υπολογισμού του μελλοντικού κόστους παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας για διάφορες τεχνολογίες με το όνομα SETIS Energy Calculator.

Το πρόγραμμα αυτό προσφέρει τη δυνατότητα εξαγωγής αναλυτικών δεδομένων κοστολόγησης για έναν αρκετά μεγάλο αριθμό τεχνολογιών. Αξίζει να αναφερθεί ότι

το κόστος υπολογίζεται σε €/MWh, δηλαδή ανά μονάδα παραγόμενης ενέργειας κι όχι ανά μονάδα εγκατεστημένης ισχύος. Αυτό συνάδει με τις απαιτήσεις του μοντέλου μας.

Οι υπολογισμοί γίνονται για τα έτη 2020 και 2030, ενώ ως βάση για σύγκριση δίνονται τα πραγματικά δεδομένα κόστους των τεχνολογιών κατά το έτος 2007. Οι υπολογισμοί βασίζονται σε μια σειρά από άρθρα και μελέτες για τις τεχνολογίες ηλεκτροπαραγωγής και για τα πιθανά σενάρια για τις ενεργειακές ανάγκες και τις τιμές στην αγοράς ενέργειας.

Βασική παράμετρος για τον υπολογισμό του κόστους στην τεχνολογίες ορυκτών καυσίμων αποτελεί το κόστος του καυσίμου στο μέλλον. Με βάση μελέτη της ΕΕ, το SETIS διαχωρίζει τα αποτελέσματα σε δύο σενάρια, ένα που προβλέπει μέτριες κι ένα που προβλέπει υψηλές τιμές καυσίμων στο μέλλον [55].

Για την παρούσα μελέτη, επιλέχθηκε μια αντιπροσωπευτική τεχνολογία για κάθε καύσιμο, ενώ θεωρήθηκε ότι η τεχνολογία της αιολικής ενέργειας αντιπροσωπεύει ικανοποιητικά τις τεχνολογίες ΑΠΕ, στο πρότυπο της μελέτης των Awerbuch και Berger [10]. Οι προβλέψεις αναφέρονται στο έτος 2020.

Στον επόμενο πίνακα, αναφέρονται οι τεχνολογίες που επιλέχθηκαν, ως αντιπροσωπευτικές για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από τα διάφορα καύσιμα, ή από ανανεώσιμες πηγές.

Πίνακας 4.1: Επιλεγμένες τεχνολογίες ανά πηγή ενέργειας

Πηγή Ενέργειας	Τεχνολογία που επιλέχθηκε
Πετρέλαιο	Internal Combustion Engine
Φυσικό Αέριο	Gas Turbine Combined Cycle
Άνθρακας	Pulverised Fuel Combustion
Πυρηνικά	Nuclear Reactor Generation III
ΑΠΕ	On-shore Wind Farm

Το Calculator παρέχει εκτός των άλλων τη δυνατότητα αλλαγής και ορισμένων μακροοικονομικών παραμέτρων, όπως τα επιτόκια και ο πληθωρισμός, στην περίπτωση μας όμως, επειδή θα γίνει σχετική σύγκριση των τεχνολογιών για την εύρεση των αποδοτικών χαρτοφυλακίων, οι παράμετροι αυτές δεν παρουσιάζουν κάποιο ενδιαφέρον, αφού επηρεάζουν ομοιόμορφα όλες τις τεχνολογίες.

Για την παρούσα εργασία υπολογίστηκαν τα δεδομένα κόστους για το 2020 με βάση τα δύο εναλλακτικά σενάρια για τις τιμές καυσίμων το 2020 που παρέχει το SETIS Calculator, δηλαδή το σενάριο μέτριων και το σενάριο υψηλών τιμών καυσίμων.

Μια σημαντική παράμετρος για τις τεχνολογίες με μεγάλες εκπομπές άνθρακα είναι φυσικά και η τιμή του CO₂ που θα επικρατεί το 2020. Για την παράμετρο αυτή

επιλέχθηκε η τιμή 20€/tCO₂ ως τιμή αναφοράς, ενώ δημιουργήθηκε κι ένα επιπλέον σενάριο που συνδυάζει χαμηλές τιμές καυσίμων με υψηλή τιμή CO₂, 35€/tCO₂.

Οι τιμές για το συνολικό κόστος που υπολογίστηκαν από το πρόγραμμα για κάθε τεχνολογία παρουσιάζονται στους παρακάτω πίνακες. Στους πίνακες αυτούς παρουσιάζονται και τα ποσοστά συνεισφοράς κάθε κατηγορίας κόστους στο συνολικό κόστος, τα οποία υπολογίστηκαν με βάση τα επί μέρους κόστη που προέκυψαν από το πρόγραμμα.

Σημειώνεται ότι στο παράρτημα Π.2 παρουσιάζεται τα ολοκληρωμένα αποτελέσματα για το κόστος ανά κατηγορία για κάθε τεχνολογία, όπως προέκυψαν από το SETIS Calculator.

Πίνακας 4.2: Κόστος τεχνολογιών για το σενάριο μέτριων τιμών καυσίμων

2020 – Μέτριες τιμές καυσίμων		Ποσοστά Συμμετοχής			
Τεχνολογία	Συνολικό Κόστος (€/MWh)	Κόστος Καυσίμου	Λειτουργικό Κόστος	Κόστος Επένδυσης	Κόστος εκπομπών CO ₂
Πετρέλαιο	133.91	0.78	0.04	0.09	0.09
Φυσικό Αέριο	65.27	0.69	0.04	0.17	0.10
Άνθρακας	58.97	0.30	0.13	0.34	0.24
Πυρηνικά	63.70	0.15	0.17	0.67	0.00
ΑΠΕ	68.31	0.00	0.14	0.86	0.00

Πίνακας 4.3: Κόστος τεχνολογιών για το σενάριο υψηλών τιμών καυσίμων

2020 – Υψηλές τιμές καυσίμων		Ποσοστά Συμμετοχής			
Τεχνολογία	Συνολικό Κόστος (€/MWh)	Κόστος Καυσίμου	Λειτουργικό Κόστος	Κόστος Επένδυσης	Κόστος εκπομπών CO ₂
Πετρέλαιο	157.38	0.81	0.03	0.08	0.08
Φυσικό Αέριο	84.24	0.76	0.03	0.13	0.08
Άνθρακας	66.66	0.38	0.11	0.30	0.21
Πυρηνικά	67.40	0.20	0.16	0.64	0.00
ΑΠΕ	68.31	0.00	0.14	0.86	0.00

Πίνακας 4.4: Κόστος τεχνολογιών για το σενάριο υψηλής τιμής CO₂

2020 – Υψηλή τιμή CO ₂		Ποσοστά Συμμετοχής			
Τεχνολογία	Συνολικό Κόστος (€/MWh)	Κόστος Καυσίμου	Λειτουργικό Κόστος	Κόστος Επένδυσης	Κόστος εκπομπών CO ₂
Πετρέλαιο	166.25	0.77	0.03	0.08	0.12
Φυσικό Αέριο	89.22	0.71	0.03	0.12	0.13
Άνθρακας	77.10	0.33	0.10	0.26	0.32
Πυρηνικά	67.40	0.20	0.16	0.64	0.00
ΑΠΕ	68.31	0.00	0.14	0.86	0.00

4.2 Ρίσκο

Για τον υπολογισμό του ρίσκου κάθε τεχνολογίας, στην προσέγγιση μας, δεν αρκεί η γνώση της τυπικής απόκλισης κάθε υποκατηγορίας του κόστους και οι συντελεστές συσχέτισης μεταξύ των τεχνολογιών. Στον αλγόριθμο που υπολογίζει τα αποδοτικά χαρτοφυλάκια έχοντας ως κριτήριο την MAD απαιτείται όπως είδαμε η εισαγωγή χρονοσειρών για το κόστος κάθε τεχνολογίας. Οι χρονοσειρές αυτές μπορούν να υπολογιστούν από πραγματικά δεδομένα μόνο για την υποκατηγορία του κόστους καυσίμου, ενώ για τις υπόλοιπες κατηγορίες θα πρέπει να γίνει παραγωγή δεδομένων (data generation).

Για το κόστος καυσίμου, υπολογίζονται λοιπόν οι απαραίτητες χρονοσειρές σύμφωνα με τη μέθοδο Awerbuch. Ουσιαστικά, τα δεδομένα εισόδου είναι οι ποσοστιαίες μεταβολές των τιμών (δηλ τα HPR) για κάθε έτος. Ως βάση δεδομένων για πετρέλαιο, φυσικό αέριο και άνθρακα χρησιμοποιήθηκε η ετήσια αναφορά για την ενέργεια της BP το έτος 2011 [47] ενώ για την τιμή του ουρανίου χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα από την Energy Information Administration (EIA) των ΗΠΑ⁵ [56]. Έτη αναφοράς ήταν τα 1989-2010, τα οποία αντιστοιχούν σε 22 τιμές. Μετά τον υπολογισμό των HPR, καταλήγουμε σε 21 τιμές.

Οι χρονοσειρές με τα HPR για τις υπόλοιπες τρεις υποκατηγορίες του κόστους (μεταβλητά κόστη, κόστη επένδυση, κόστη εκπομπής CO₂) παράχθηκαν με τη μέθοδο που περιγράφεται στην παρακάτω ενότητα, ώστε να ανταποκρίνονται στις εκτιμήσεις των Awerbuch και Yang στο άρθρο τους το 2007 [29]. Οι εκτιμήσεις αυτές για κάθε τεχνολογία παρουσιάζονται συνοπτικά στους παρακάτω πίνακες.

⁵ Θεωρούμε ότι οι μεταβολές των τιμών που συνέβησαν στις τιμές των καυσίμων τις τελευταίες δεκαετίες στις ΗΠΑ αντικατοπτρίζουν τη μεταβλητότητα των τιμών που επικράτησαν και για την ΕΕ.

Πίνακας 4.5: Συντελεστές συσχέτισης και τυπικές αποκλίσεις για το κόστος λειτουργίας και συντήρησης. Πηγή: Awerbuch και Berger (2003)

Κόστος Λειτουργίας & Συντήρησης	Πετρέλαιο	Φυσικό Αέριο	Άνθρακας	Πυρηνικά	ΑΠΕ	Τυπική Απόκλιση
Πετρέλαιο	1	0.09	-0.18	-0.17	-0.58	0.242
Φυσ. Αέριο	0.09	1	0.25	0.24	0	0.105
Άνθρακας	-0.18	0.25	1	0	-0.22	0.054
Πυρηνικά	-0.17	0.24	0	1	-0.07	0.055
ΑΠΕ	-0.58	0	-0.22	-0.07	1	0.080

Σε κάθε πίνακα, στο αριστερό μέρος παρουσιάζονται οι τιμές για τους συντελεστές συσχέτισης, ενώ στην τελευταία στήλη βρίσκεται η τυπική απόκλιση των HPR ανά τεχνολογία.

Πίνακας 4.6: Συντελεστές συσχέτισης και τυπικές αποκλίσεις για το κόστος επένδυσης. Πηγή: Awerbuch και Berger (2003)

Κόστος Επένδυσης	Πετρέλαιο	Φυσικό Αέριο	Άνθρακας	Πυρηνικά	ΑΠΕ	Τυπική Απόκλιση
Πετρέλαιο	1	0.70	0.70	0.70	0.70	0.23
Φυσ. Αέριο	0.70	1	0.70	0.70	0.70	0.15
Άνθρακας	0.70	0.70	1	0.70	0.70	0.23
Πυρηνικά	0.70	0.70	0.70	1	0.70	0.23
ΑΠΕ	0.70	0.70	0.70	0.70	1	0.05

Τα κόστη επένδυσης παρουσιάζουν την ίδια συσχέτιση, ανεξάρτητα από τα ζεύγη τεχνολογιών. Η συσχέτιση αυτή λαμβάνεται στην τιμή 0.70, σύμφωνα με την έρευνα του Awerbuch για την ΕΕ [10].

Πίνακας 4.7: Συντελεστές συσχέτισης και τυπικές αποκλίσεις για το κόστος επένδυσης. Πηγή: Awerbuch και Berger (2003)

Κόστος CO ₂	Πετρέλαιο	Φυσικό Αέριο	Άνθρακας	Πυρηνικά	ΑΠΕ	Τυπική Απόκλιση
CO ₂	1	0.09	-0.18	-0.17	-0.58	0.242

Το κόστος CO₂ παρουσιάζει συσχέτιση μόνο με τις τιμές των καυσίμων.

Όπως αναφέραμε και πριν, από τους παραπάνω πίνακες και με τη μέθοδο που περιγράφεται στην παρακάτω ενότητα, παράγονται χρονοσειρές HPR για την κάθε κατηγορία του κόστους κάθε τεχνολογίας. Οι απαραίτητες χρονοσειρές με τα HPR για να συνεχίσουμε είναι τρεις για κάθε τεχνολογία (κόστος καυσίμου, κόστος

λειτουργίας και συντήρησης, κόστος επένδυσης), ενώ υπάρχει και η χρονοσειρά για το κόστος CO₂, η οποία είναι κοινή σε όλες τις τεχνολογίες.

Αφού συγκεντρωθούν και οι 16 χρονοσειρές, τις μετατρέπουμε σε 5, μια για κάθε τεχνολογία, δίνοντας στον κάθε παράγοντα κόστους διαφορετικό βάρος, ανάλογα με τα ποσοστά συνεισφοράς που έχουμε στη διάθεση μας από τις προβλέψεις του SETIS Energy Calculator.

Η τιμή κάθε έτους ($t = 1, 2, \dots, 21$) για το HPR της i τεχνολογίας ($i = 1, 2, \dots, 5$) θα δίνεται από το γινόμενο του βάρους της κάθε κατηγορίας κόστους (Fuel, O&M, Inv, CO₂) επί την αντίστοιχη τιμή HPR για την κατηγορία αυτή και το έτος αυτό ($HPR_{Factor,it}$). Συνολικά,

$$HPR_{it} = x_{i,Fuel}HPR_{Fuel,it} + x_{i,O\&M}HPR_{O\&M,it} + x_{i,Inv}HPR_{Inv,it} + x_{i,CO_2}HPR_{CO_2,t}$$

Αυτές οι 5 χρονοσειρές (με 21 στοιχεία η κάθε μία) θα αποτελέσουν τα δεδομένα εισόδου για τον υπολογισμό του συνολικού ρίσκου χαρτοφυλακίου.

Στο παράρτημα Π.4 παρουσιάζονται όλες οι χρονοσειρές των HPR που χρησιμοποιήθηκαν ως δεδομένα εισόδου στο πρόγραμμα.

4.3 Μέθοδος παραγωγής των χρονοσειρών μέσω παραγοντοποίησης Cholesky

Σε αυτή την ενότητα, θα εξηγηθεί η διαδικασία που ακολουθήθηκε για την παραγωγή των χρονοσειρών που δεν υπάρχουν στη βιβλιογραφία. Το πρόβλημα που πρέπει να επιλυθεί για τον υπολογισμό των απαραίτητων χρονοσειρών για τα HPR είναι ουσιαστικά η παραγωγή 5 σειρών (διανυσμάτων) με δεδομένη συσχέτιση μεταξύ τους και με συγκεκριμένες τυπικές αποκλίσεις. Το αποτέλεσμα θα πρέπει να είναι τυχαίο, οπότε χρησιμοποιείται δειγματοληψία Monte Carlo. Η διαδικασία που ακολουθείται έχει παρουσιαστεί στη βιβλιογραφία [57].

Αναλυτικά, σε πρώτη φάση κατασκευάζεται ο πίνακας συνδιακύμανσης (\mathbf{C}). Έστω \mathbf{R} ο 5×5 πίνακας με τους συντελεστές συσχέτισης και \mathbf{D} 5×5 διαγώνιος πίνακας με τις τυπικές αποκλίσεις, τότε ο 5×5 πίνακας

$$\mathbf{C} = \mathbf{D}\mathbf{R}\mathbf{D}$$

θα περιέχει τις συνδιακυμάνσεις.

Μέσω παραγοντοποίησης Cholesky, ο πίνακας \mathbf{C} διαχωρίζεται στον άνω διαγώνιο \mathbf{U} και κάτω διαγώνιο \mathbf{L} , ώστε:

$$\mathbf{C} = \mathbf{L}\mathbf{U}$$

Στη συνέχεια, κατασκευάζουμε έναν 5×21 πίνακα \mathbf{u} με τυχαίους αριθμούς μέσω δειγματοληψίας Monte Carlo από κανονική κατανομή με μέση τιμή 0 και τυπική απόκλιση 1, δηλ για κάθε στοιχείο του πίνακα ισχύει $u_i \sim N(0,1)$, δεδομένου ότι θεωρούμε ότι τα κόστη είναι μεταβλητές που ακολουθούν την κανονική κατανομή.

Ο πίνακας που προκύπτει ως γινόμενο των L και u έχει διαστάσεις 5×21 και περιέχει τις ζητούμενες σειρές των HPR που έχουν τις επιθυμητές τυπικές αποκλίσεις και παρουσιάζουν την συσχέτιση που ζητούνταν.

Ενδεικτικά, παρουσιάζονται στο παράρτημα Π.3 οι πίνακες που προκύπτουν κατά τον υπολογισμό για τις χρονοσειρές των κοστών λειτουργίας και συντήρησης.

Σημειώνουμε ότι εξαιτίας της τυχαιότητας που προκύπτει από τη δειγματοληψία Monte Carlo, η μέθοδος αυτή θα παράγει χρονοσειρές που θα προσεγγίζουν μεν τα επιθυμητά χαρακτηριστικά, δε θα ανταποκρίνονται όμως πλήρως σε αυτά εκτός εάν οι χρονοσειρές έχουν πολύ μεγάλο μέγεθος. Συγκεκριμένα, σύμφωνα με τη βιβλιογραφία [58], κριτήριο είναι ο λόγος $r = \frac{n}{T}$, όπου n είναι το μέγεθος του πίνακα συσχέτισης (δηλαδή ο αριθμός των διαθέσιμων χρονοσειρών) και T το μέγεθος των χρονοσειρών που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό του συνολικού πίνακα συνδιακύμανσης. Προφανώς, καθώς $r \rightarrow 0$, ο πίνακας που υπολογίζεται προσεγγίζει τον πραγματικό πίνακα συνδιακύμανσης. Τιμές που μειώνουν το θόρυβο σε αποδεκτά σημεία είναι για $r < 0.20$.

5. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Στα αποτελέσματα, παρουσιάζεται αρχικά το σενάριο αναφοράς και στη συνέχεια εμφανίζεται η αλλαγή του αποδοτικού μετώπου όταν μεταφερόμαστε σε διαφορετικά σενάρια.

Τα αποτελέσματα μας συγκρίνονται κάθε φορά με το χαρτοφυλάκιο που αναμένει η ΕΕ για το 2020 με βάση τη στρατηγική που έχει χαράξει, το οποίο αποτελείται από 32.0% ΑΠΕ, 23.9% Πυρηνικά, 22.8% Άνθρακα, 19.5% Φυσικό Αέριο και 1.2% Πετρέλαιο. Χάριν συντομίας, το χαρτοφυλάκιο αυτό θα αναφέρεται και ως EU2020.

Ακολούθως, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα ανάλυσης ευαισθησίας που πραγματοποιήθηκε για το έλεγχο της αξιοπιστίας της μεθόδου που ακολουθήθηκε για την παραγωγή των χρονοσειρών.

Τέλος, γίνεται σύγκριση με τα αποτελέσματα του μοντέλου μέσης τιμής-διακύμανσης (mean-variance) για το ίδιο πρόβλημα και προτείνεται ένας τρόπος υπολογισμού διαστημάτων εμπιστοσύνης για μια πιο διαυγή ερμηνεία των πορισμάτων του μοντέλου.

5.1 Σενάριο Αναφοράς

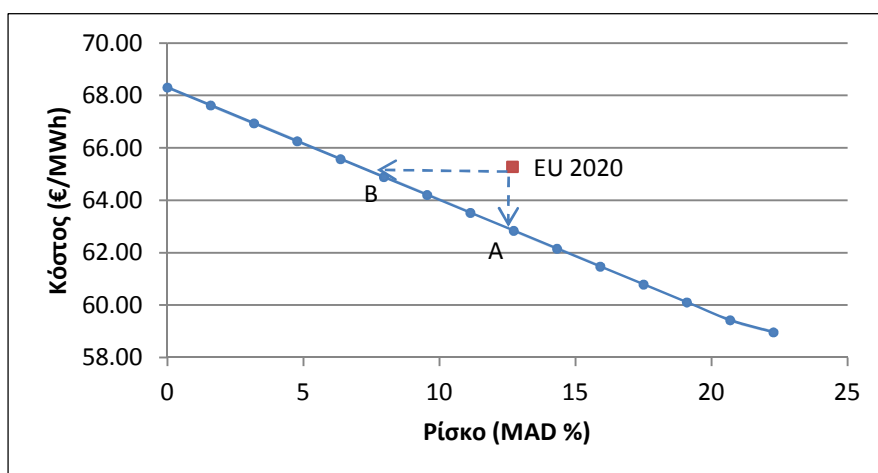
Ως σενάριο αναφοράς, με το οποίο θα συγκρίνουμε τα εναλλακτικά σενάρια στη συνέχεια, ορίζεται το σενάριο μέτριων τιμών καυσίμων σε συνδυασμό με ορισμένους περιορισμούς απόκλισης από το αναμενόμενο χαρτοφυλάκιο της ΕΕ. Σε πρώτη φάση, θα ληφθεί μόνο το κόστος των καυσίμων ως παράγοντας ρίσκου, ενώ στη συνέχεια θα γίνει ολοκληρωμένη ανάλυση ρίσκου και θα επιβληθούν και οι σχετικοί περιορισμοί για την ολοκλήρωση του σεναρίου αναφοράς. Το σενάριο αυτό θα αναφέρεται στη συνέχεια και ως Reference Scenario.

5.1.1 Ρίσκο λόγω τιμών καυσίμων

Σε πρώτο στάδιο, ως δεδομένα εισόδου για την απόδοση χρησιμοποιήθηκαν οι προβλέψεις του SETIS για το 2020 στο σενάριο που επικρατούν χαμηλές τιμές καυσίμων. Για τον υπολογισμό του ρίσκου, χρησιμοποιήθηκαν μόνο οι τιμές των καυσίμων, παραβλέποντας άλλους παράγοντες του κόστους, όπως το κόστος λειτουργίας και συντήρησης και το κόστος επένδυσης. Αυτό σημαίνει ότι οι ΑΠΕ λειτουργούν ως ακίνδυνο χρεόγραφο με μηδενικό ρίσκο.

Στο παρακάτω γράφημα η μπλε καμπύλη αντιπροσωπεύει τα αποδοτικά χαρτοφυλάκια. Όπως εξηγήσαμε και στο θεωρητικό μέρος, η καμπύλη αυτή ονομάζεται αποδοτικό μέτωπο. Χαρτοφυλάκια με συνδυασμούς κόστους/ρίσκου που βρίσκονται κάτω από αυτήν δεν είναι εφικτά, ενώ χαρτοφυλάκια με συνδυασμούς που βρίσκονται πάνω από αυτήν είναι μεν εφικτά, δεν είναι όμως αποδοτικά. Ένα χαρτοφυλάκιο είναι αποδοτικό, όταν δεν υπάρχουν χαρτοφυλάκια που προσφέρουν χαμηλότερο επίπεδο ρίσκου για ένα συγκεκριμένο κόστος ή χαμηλότερο κόστος για ένα συγκεκριμένο επίπεδο ρίσκου.

Το σημείο εκτός της γραμμής (EU2020) αντιστοιχεί στο υπολογισμένο κόστος και ρίσκο του χαρτοφυλακίου που αναμένει η ΕΕ με βάση τη στρατηγική που έχει χαράξει.



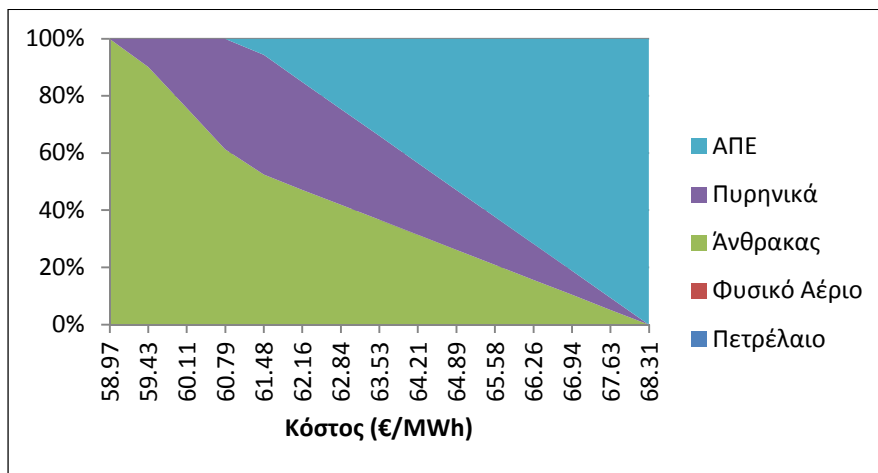
Γράφημα 5.1: Αποδοτικό μέτωπο με υπολογισμό ρίσκου βάση τιμών καυσίμου

Τα αποδοτικά χαρτοφυλάκια περιλαμβάνουν όπως βλέπουμε το χαρτοφυλάκιο μηδενικού ρίσκου, που αναφέρεται στην χρήση 100% τεχνολογιών ΑΠΕ, έχει όμως το υψηλότερο κόστος. Παρατηρούμε επίσης ότι το αναμενόμενο χαρτοφυλάκιο της ΕΕ για το 2020 δεν είναι αποδοτικό, καθώς εάν κινηθούμε προς τα κάτω (στην ευθεία ίσου ρίσκου), υπάρχει ένα άλλο χαρτοφυλάκιο (A) που παρουσιάζει το ίδιο ρίσκο με χαμηλότερο κόστος, ενώ αντίστοιχα εάν κινηθούμε προς τα αριστερά (στην ευθεία ίσου κόστους), μπορούμε να βρούμε ένα χαρτοφυλάκιο με το ίδιο κόστος αλλά μικρότερο ρίσκο (B).

Το χαρτοφυλάκιο EU2020 παρουσιάζει κόστος 65.27€/MWh με ρίσκο που αντιστοιχεί σε MAD 12.68%. Το αποδοτικό χαρτοφυλάκιο A έχει ίση MAD με συνολικό κόστος 64.89€/MWh. Στην ίδια λογική, το αποδοτικό χαρτοφυλάκιο B παρουσιάζει το ίδιο κόστος με ρίσκο που αντιστοιχεί σε MAD 7.16%.

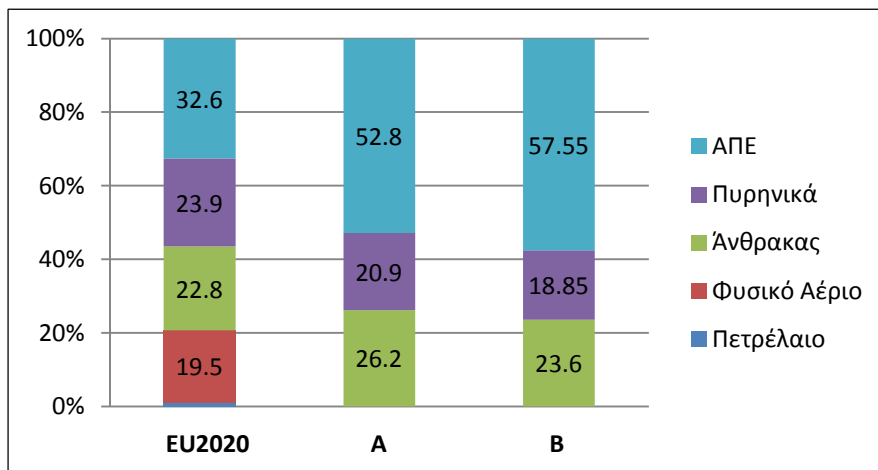
Στο επόμενο διάγραμμα φαίνεται η σύσταση των αποδοτικών χαρτοφυλακίων, δηλαδή τα ποσοστά που αντιστοιχούν σε κάθε τεχνολογία. Στον οριζόντιο άξονα βλέπουμε με ποιο τρόπο μεταβάλλεται η σύσταση αυτή καθώς αυξάνει το κόστος του χαρτοφυλακίου. Παράλληλα αυξάνει φυσικά και το ποσοστό ρίσκου.

Παρατηρούμε ότι τα αποδοτικά χαρτοφυλάκια που προέκυψαν αποτελούνται μόνο από Άνθρακα, Πυρηνικά και ΑΠΕ. Λαμβάνοντας υπόψη ως μοναδικό παράγοντα ρίσκου το κόστος καυσίμου, οι τεχνολογίες που βασίζονται σε καύσιμα με μεγάλη μεταβλητότητα στις τιμές (Πετρέλαιο, Φυσικό Αέριο) αποκλείστηκαν από τα αποδοτικά χαρτοφυλάκια.



Γράφημα 5.2: Συστάσεις αποδοτικών χαρτοφυλακίων με υπολογισμό ρίσκου βάση τιμών καυσίμου

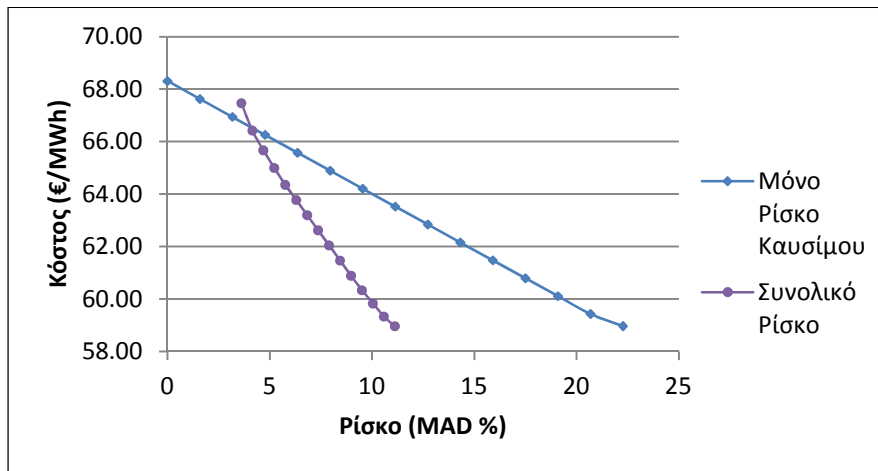
Η σύγκριση των συστάσεων του χαρτοφυλακίου EU2020 και των δυο αντίστοιχων αποδοτικών χαρτοφυλακίων (ελάχιστου κόστους και ελάχιστου ρίσκου) φαίνεται στο παρακάτω γράφημα. Τα αναλυτικά ποσοστά του μίγματος της ηλεκτροπαραγωγής συμπεριλαμβάνονται στο διάγραμμα.



Γράφημα 5.3: Σύγκριση σύστασης χαρτοφυλακίου EU2020 με συστάσεις αποδοτικών χαρτοφυλακίων

5.1.2 Υπολογισμός Ρίσκου από όλους τους παράγοντες κόστους

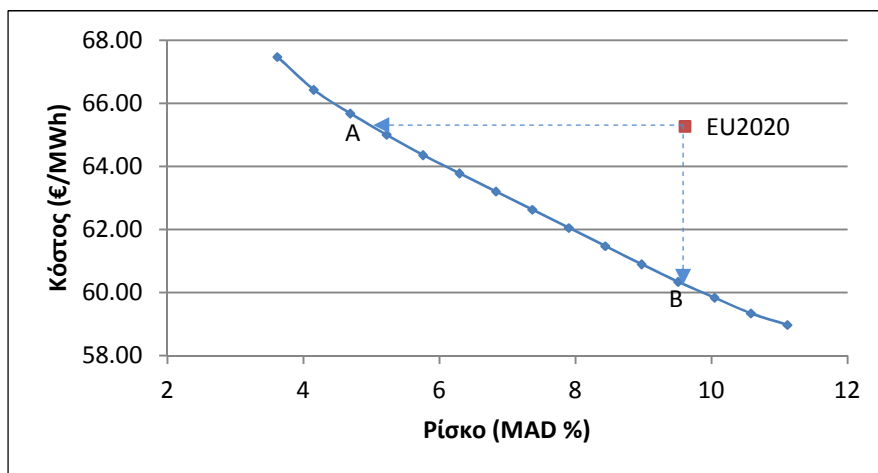
Στο επόμενο βήμα, διατηρώντας τα δεδομένα εισόδου για το κόστος ίδια, τα δεδομένα που εισάγουμε για το ρίσκο αντιπροσωπεύουν τη συμπεριφορά όλων των κατηγοριών του κόστους, δηλαδή κόστος καυσίμου, κόστος λειτουργίας και συντήρησης, κόστος επένδυσης και κόστος εκπομπών CO₂. Το νέο αποδοτικό μέτωπο παρουσιάζεται στο παρακάτω γράφημα, σε σύγκριση με το αποδοτικό μέτωπο με μόνο παράγοντα ρίσκου το κόστος καυσίμου.



Γράφημα 5.4: Αποδοτικά μέτωπα (i) με υπολογισμό ρίσκου βάση τιμών καυσίμου (ii) με ολοκληρωμένο υπολογισμό ρίσκου

Παρατηρούμε ότι το νέο αποδοτικό μέτωπο κινείται σε περιοχές χαμηλότερου ρίσκου (MAD) από το προηγούμενο. Αυτό οφείλεται στην υπερεκτίμηση του ρίσκου που είχε γίνει, αφού το κόστος καυσίμου είναι η κατηγορία κόστους με το υψηλότερο ρίσκο. Καθώς εισέρχονται κι οι υπόλοιπες κατηγορίες κόστους στον υπολογισμό του ρίσκου, τα αποδοτικά χαρτοφυλάκια παρουσιάζουν χαμηλότερο συνολικό ρίσκο.

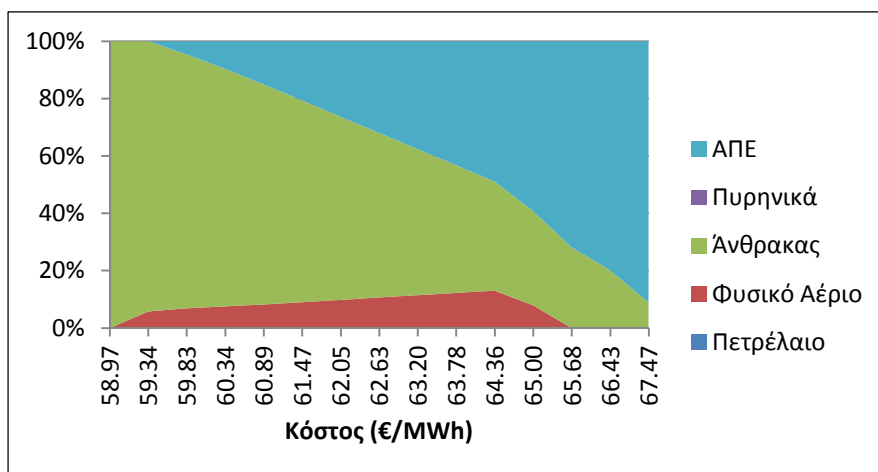
Σε σχέση με το αναμενόμενο χαρτοφυλάκιο της ΕΕ το 2020, μπορούμε και πάλι να βρούμε το αποδοτικό χαρτοφυλάκιο με το ίδιο ρίσκο (MAD) και ελάχιστο κόστος (χαρτοφυλάκιο Α), αλλά και το αποδοτικό χαρτοφυλάκιο με το ίδιο κόστος και ελάχιστη MAD (χαρτοφυλάκιο Β), όπως βλέπουμε στο παρακάτω γράφημα.



Γράφημα 5.5: Αποδοτικό μέτωπο με ολοκληρωμένο υπολογισμό ρίσκου

Το χαρτοφυλάκιο EU2020 παρουσιάζει το ίδιο κόστος με πριν 65.27€/MWh με χαμηλότερο όμως ρίσκο 9.61%. Το αποδοτικό χαρτοφυλάκιο με το ίδιο ρίσκο έχει συνολικό κόστος 60.24€/MWh. Στην ίδια λογική, το αποδοτικό χαρτοφυλάκιο με το ίδιο κόστος παρουσιάζει ρίσκο 5.01%.

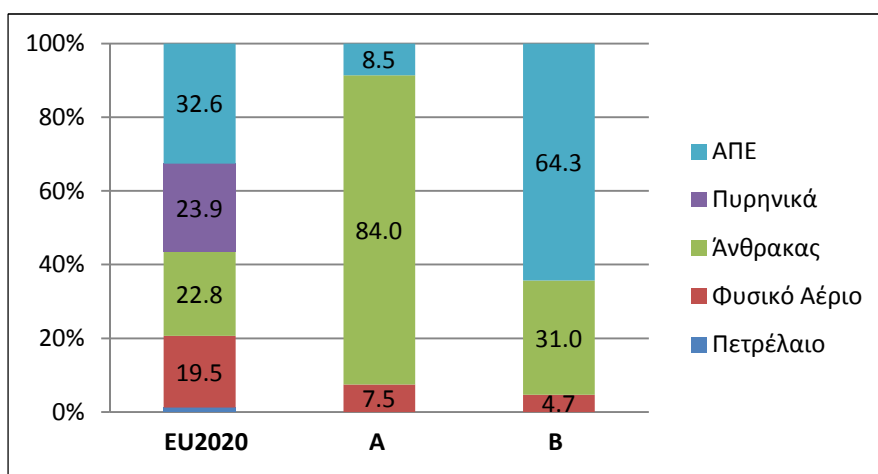
Η νέα σύσταση των αποδοτικών χαρτοφυλακίων παρουσιάζει επίσης ενδιαφέρον, όπως βλέπουμε στο επόμενο γράφημα.



Γράφημα 5.6: Συστάσεις αποδοτικών χαρτοφυλακίων με ολοκληρωμένο υπολογισμό ρίσκου

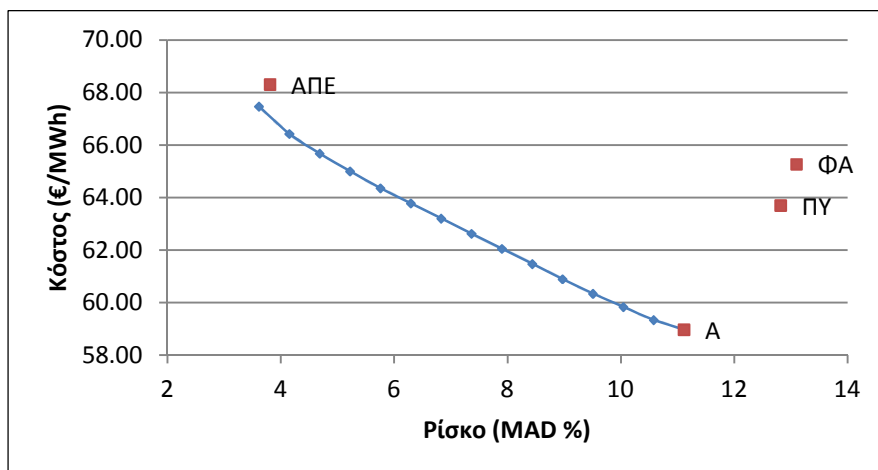
Παρατηρούμε ότι η εισαγωγή του ρίσκου που αντιστοιχεί στο κόστος λειτουργίας και συντήρησης, στο κόστος επένδυσης, καθώς και στο κόστος εκπομπής CO₂, οδήγησε στην απομάκρυνση των πυρηνικών από τα αποδοτικά χαρτοφυλάκια, ενώ παράλληλα το φυσικό αέριο εισέρχεται στη σύσταση, πιθανώς λόγω του χαμηλότερου ρίσκου στην επένδυση. Εξάλλου, τα πυρηνικά είναι μια τεχνολογία που το ρίσκο της δεν αντιπροσωπεύεται ικανοποιητικά από το κόστος καυσίμου (του ουρανίου), αφού το ποσοστό συμμετοχής του στο συνολικό κόστος είναι πολύ μικρό, ενώ μεγάλο είναι το κόστος λειτουργίας (λόγω των διαδικασιών εμπλουτισμού και επεξεργασίας του ουρανίου πριν την είσοδο στον αντιδραστήρα), αλλά και το κόστος επένδυσης.

Και πάλι, η σύγκριση των συστάσεων του χαρτοφυλακίου EU2020 και των δυο αντίστοιχων αποδοτικών χαρτοφυλακίων (ελάχιστου κόστους και ελάχιστου ρίσκου) φαίνεται στο παρακάτω γράφημα.



Γράφημα 5.7: Σύγκριση σύστασης χαρτοφυλακίου EU2020 με συστάσεις αποδοτικών χαρτοφυλακίων

Πριν προχωρήσουμε στις συστάσεις των αποδοτικών χαρτοφυλακίων, θα είχε ενδιαφέρον η αναπαράσταση στο γράφημα με το νέο αποδοτικό μέτωπο των χαρτοφυλακίων που αποτελούνται μόνο από μια τεχνολογία, ώστε να γίνει εμφανές το όφελος που επιτυγχάνεται από την επιτυχημένη διαφοροποίηση τεχνολογιών, λόγω της επίδρασης χαρτοφυλακίου.



Γράφημα 5.8: Αποδοτικό μέτωπο και μη διαφοροποιημένα χαρτοφυλάκια

Στο παραπάνω γράφημα, παρουσιάζονται τα χαρτοφυλάκια που αποτελούνται κατά 100% από μια τεχνολογία. Το χαρτοφυλάκιο ΦΑ αντιστοιχεί σε 100% Φυσικό Αέριο, το Α σε 100% Άνθρακα, το ΠΥ σε 100% Πυρηνικά, ενώ το ΑΠΕ σε 100% ΑΠΕ. Το χαρτοφυλάκιο που αποτελείται κατά 100% από πετρέλαιο δε συμπεριλήφθηκε στο διάγραμμα διότι βρίσκεται σε περιοχή πολύ μακριά από τα άλλα, με κόστος 133.91€/MWh και MAD 17.93%.

Με αυτή την αναπαράσταση, γίνεται εμφανές το πώς μέσω της κατάλληλης διαφοροποίησης καταλήγουμε σε συνδυασμούς με τις βέλτιστες ιδιότητες. Είναι για παράδειγμα εντυπωσιακό, ότι το χαρτοφυλάκιο με την χαμηλότερη MAD παρουσιάζει ρίσκο που είναι χαμηλότερο από το ρίσκο κάθε τεχνολογίας, όταν την μελετάμε ξεχωριστά.

5.1.3 Εισαγωγή Περιορισμών

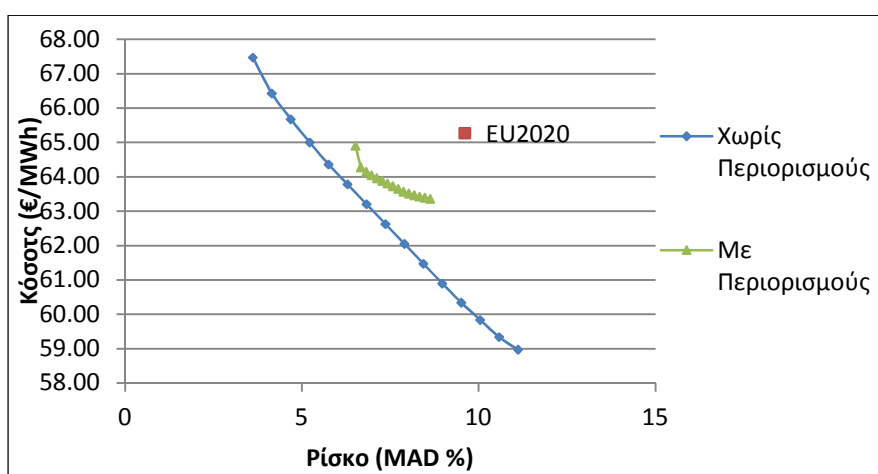
Βέβαια, τα σενάρια που έχουμε δει μέχρι στιγμής δεν είναι πραγματοποιήσιμα, αφού δε λαμβάνουν υπόψη το υπάρχον πλαίσιο για την ηλεκτροπαραγωγή στην ΕΕ. Για παράδειγμα, η πλήρης αποδέσμευση της ΕΕ από τη χρήση πυρηνικής ενέργειας μέχρι το 2020 είναι κάτι ανέφικτο, λόγω της μεγάλης διάρκειας και του μεγάλου κόστους της διαδικασίας παροπλισμού των πυρηνικών εργοστασίων.

Για την εξαγωγή πιο ρεαλιστικών αποτελεσμάτων τέθηκαν περιορισμοί (άνω και κάτω όρια) στα ποσοστά συνεισφοράς κάθε τεχνολογίας στο συνολικό ενεργειακό μίγμα. Συγκεκριμένα, επιτράπηκε η απόκλιση κατά 10 ποσοστιαίες μονάδες από το αναμενόμενο ενεργειακό μίγμα της ΕΕ για το 2020.

Πίνακας 5.1: Άνω και κάτω όρια για τα ποσοστά συμμετοχής τεχνολογιών στο μίγμα

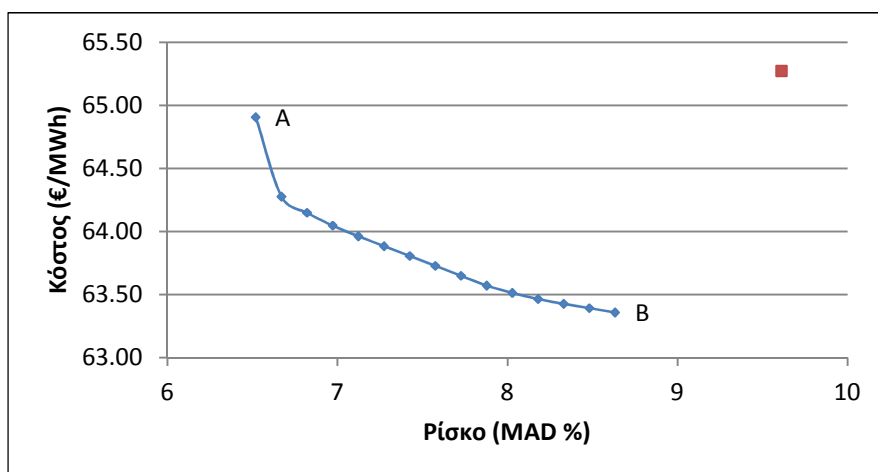
(%)	ΕΥ2020	Κάτω όριο	Άνω όριο
Πετρέλαιο	1.2	0	11.2
Φυσικό Αέριο	19.5	9.5	29.5
Άνθρακας	22.8	12.8	32.8
Πυρηνικά	23.9	13.9	33.9
ΑΠΕ	32.6	22.6	42.6

Όπως αναμενόταν, το αποδοτικό μέτωπο μετακινήθηκε σε περιοχές υψηλότερου ρίσκου και κόστους μετά την εισαγωγή των περιορισμών. Επίσης, παρατηρούμε ότι πλέον οι αποδοτικές επιλογές έχουν περιοριστεί κατά πολύ. Το κόστος των αποδοτικών χαρτοφυλακίων κυμαίνεται στα 63.36-64.91€/MWh, ενώ και για το ρίσκο οι επιλογές μας είναι περιορισμένες, αφού η MAD πρέπει να βρίσκεται ανάμεσα στις τιμές 6.52-8.63%.



Γράφημα 5.9: Αποδοτικά μέτωπα με ολοκληρωμένο υπολογισμό ρίσκου (i) χωρίς περιορισμούς (ii) με περιορισμούς

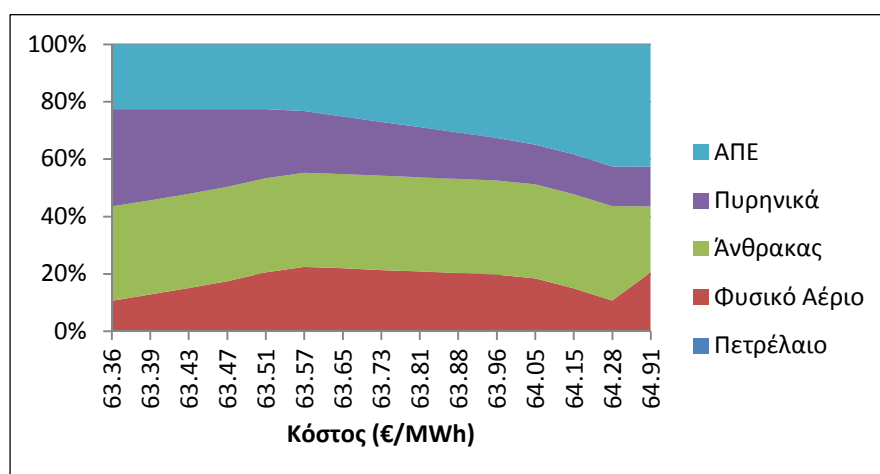
Το νέο αποδοτικό μέτωπο παρουσιάζεται σε μεγέθυνση στο επόμενο γράφημα.



Γράφημα 5.10: Αποδοτικό μέτωπο μετά την εισαγωγή περιορισμών

Σε αυτή την περίπτωση, το αναμενόμενο χαρτοφυλάκιο της ΕΕ για το 2020 (όμοια με πριν έχει κόστος 65.27€/MWh με MAD 9.61%) βρίσκεται πολύ μακριά από το αποδοτικό μέτωπο, αφού παρουσιάζει υψηλότερο ρίσκο από το μέγιστο ρίσκο και υψηλότερο κόστος από το υψηλότερο κόστος του αποδοτικού μετώπου. Αξίζει να αναφέρουμε ότι το αποδοτικό χαρτοφυλάκιο με το μέγιστο κόστος/ελάχιστο ρίσκο (Α) αντιστοιχεί σε 64.91€/MWh προς 6.52% ενώ αυτό με το ελάχιστο κόστος/μέγιστο ρίσκο (Β) δίνει 63.36€/MWh προς 8.63%.

Οι συστάσεις για το ενεργειακό μίγμα περιέχουν τώρα τέσσερις τεχνολογίες. Σε όλα τα αποδοτικά χαρτοφυλάκια εκτός από ένα⁶, ο Άνθρακας βρίσκεται στη μέγιστη επιτρεπτή τιμή (με ποσοστό συμμετοχής κατά 10 ποσοστιαίες μονάδες υψηλότερο από ότι στο χαρτοφυλάκιο EU2020), γεγονός που υποδεικνύει ότι η αύξηση της συμμετοχής των τεχνολογιών του άνθρακα στο ενεργειακό μίγμα της ΕΕ θα μείωνε αισθητά το συνολικό κόστος, αλλά και το ρίσκο του χαρτοφυλακίου.



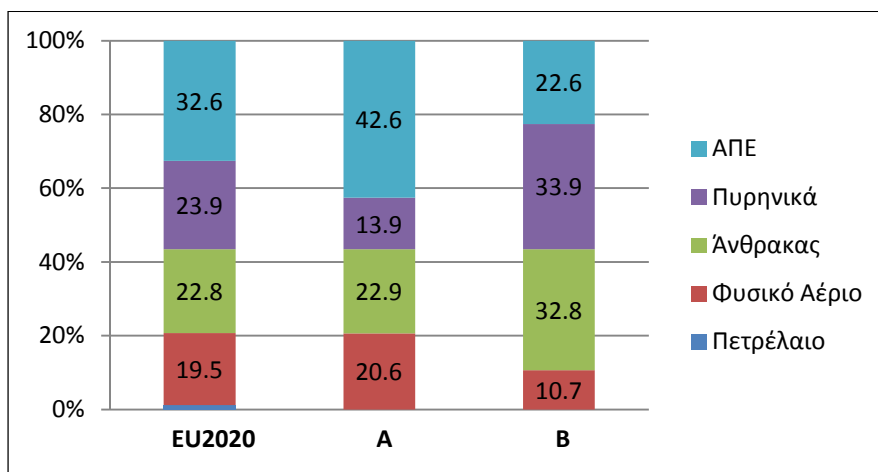
Γράφημα 5.11: Συστάσεις αποδοτικών χαρτοφυλακίων μετά την εισαγωγή περιορισμών

Στο παρακάτω γράφημα μπορούμε να δούμε τις διαφορές ανάμεσα στο χαρτοφυλάκιο EU2020, στο χαρτοφυλάκιο με το μέγιστο κόστος/ελάχιστο ρίσκο (Α) και στο χαρτοφυλάκιο με το ελάχιστο κόστος/μέγιστο ρίσκο (Β).

Παρατηρούμε ότι το χαρτοφυλάκιο Α έχει το μέγιστο επιτρεπόμενο ποσοστό ΑΠΕ και το ελάχιστο επιτρεπόμενο ποσοστό Πυρηνικών. Αντίθετα, το χαρτοφυλάκιο Β περιέχει το ελάχιστο επιτρεπόμενο ποσοστό ΑΠΕ και το μέγιστο επιτρεπόμενο ποσοστό Πυρηνικών.

Τα αποτελέσματα αυτά συμφωνούν με τα αποτελέσματα των Awerbuch και Yang στην έρευνα του 2007 [29], αναζωπυρώνοντας τη διαμάχη ΑΠΕ και Πυρηνικών. Έχουμε να κάνουμε με δύο τεχνολογίες με αντίθετα χαρακτηριστικά κόστους/ρίσκου: οι μεν ΑΠΕ προσφέρουν χαμηλό ρίσκο με υψηλό κόστος, ενώ τα πυρηνικά είναι μια τεχνολογία χαμηλού κόστους αλλά υψηλού ρίσκου.

⁶ Η μοναδική εξαίρεση είναι το χαρτοφυλάκιο ελάχιστου ρίσκου, στο οποίο το ποσοστό του Άνθρακα υφίσταται μια μείωση ενώ αυξάνει το ποσοστό του Φυσικού Αερίου.



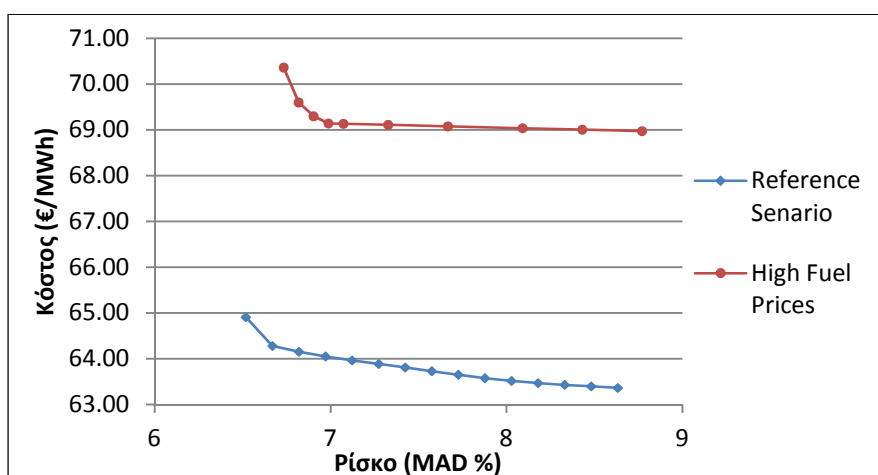
Γράφημα 5.12: Σύγκριση σύστασης χαρτοφυλακίου EU2020 με συστάσεις αποδοτικών χαρτοφυλακίων

Αξίζει πάντως να αναφερθεί ότι στα δεδομένα της έρευνας μας δε συμπεριλαμβάνονται οι κίνδυνοι και το μεγάλο κόστος της απόθεσης των ραδιενεργών αποβλήτων ή ενός πυρηνικού ατυχήματος.

5.2 Σενάριο Υψηλών Τιμών Καυσίμων

Διατηρώντας τα τελευταία αποτελέσματα (χαμηλές τιμές καυσίμων, συνολικός υπολογισμός ρίσκου, επιβολή περιορισμών) ως σενάριο αναφοράς (Reference Scenario) προχωρούμε στον υπολογισμό του αποτελεσματικού μέτρου για το σενάριο των υψηλών τιμών καυσίμων.

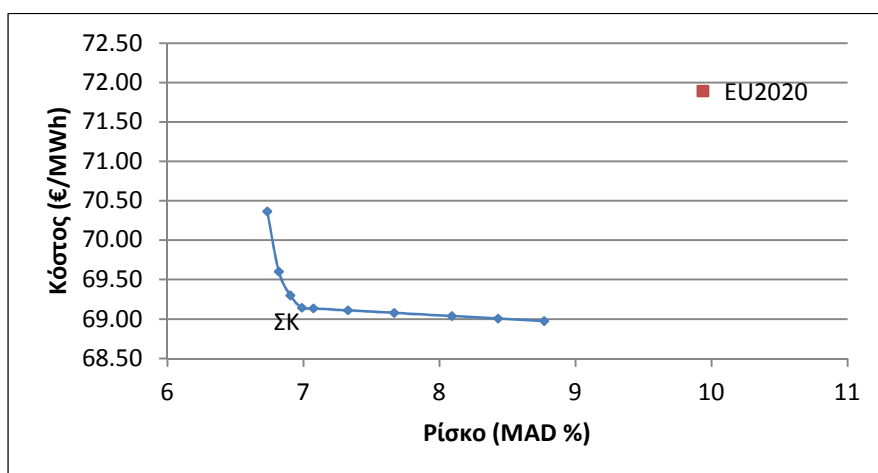
Στα αποτελέσματα μας, παρατηρούμε ότι στην περίπτωση που το 2020 επικρατήσουν υψηλές τιμές καυσίμων, το αποδοτικό μέτρο δεν παρουσιάζει αισθητές μεταβολές ως προς το ρίσκο, αλλά εμφανίζει κυρίως πολύ μεγαλύτερα κόστη.



Γράφημα 5.13: Αποδοτικά μέτρα (i) για το σενάριο αναφοράς (ii) για το σενάριο υψηλών τιμών καυσίμων

Σε μια πιο προσεκτική ανάλυση των αποδοτικών χαρτοφυλακίων σε αυτή την περίπτωση, είναι εμφανές από επειδή το αποδοτικό μέτρο παρουσιάζει

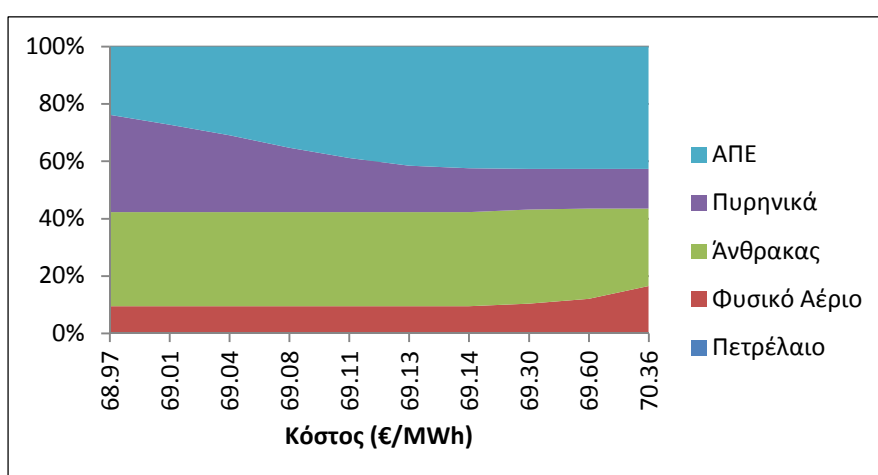
αποτελείται από δύο κομμάτια με πολύ απότομη κλίση, τα αποδοτικά χαρτοφυλάκια που συμφέρουν περισσότερο είναι κοντά στο σημείο καμπής της καμπύλης. Επάνω από το σημείο αυτό βρίσκονται χαρτοφυλάκια που προσφέρουν μεν μικρότερο ρίσκο αυξάνουν όμως κατά πολύ το κόστος, ενώ τα χαρτοφυλάκια στα δεξιά του σημείου αυτού προσφέρουν κόστος που είναι οριακά χαμηλότερο, αυξάνοντας όμως αισθητά το ρίσκο (MAD).



Γράφημα 5.14: Αποδοτικό μέτωπο για το σενάριο υψηλών τιμών καυσίμων

Βλέπουμε ότι και σε αυτό το σενάριο, το αναμενόμενο χαρτοφυλάκιο της ΕΕ σύμφωνα με τον υπάρχοντα σχεδιασμό βρίσκεται πολύ μακριά από τους αποδοτικούς συνδυασμούς. Ενδεικτικά, το αποδοτικό χαρτοφυλάκιο που βρίσκεται στο σημείο καμπής (ΣΚ) αντιστοιχεί σε 69.14€/MWh προς 6.99% έναντι του EU2020 με 71.89€/MWh προς 9.94%.

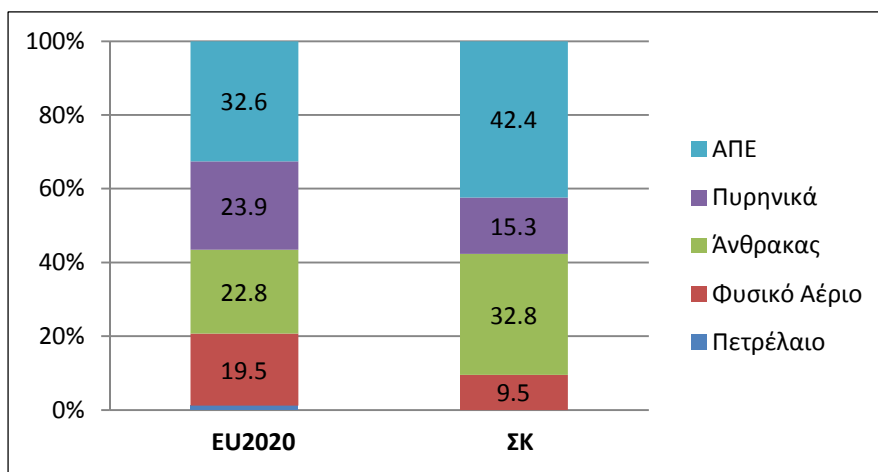
Οι συστάσεις των αποδοτικών χαρτοφυλακίων που υπολογίστηκαν κυμαίνονται με τον τρόπο που φαίνεται στο παρακάτω γράφημα.



Γράφημα 5.15: Συστάσεις αποδοτικών χαρτοφυλακίων για το σενάριο υψηλών τιμών καυσίμων

Παρατηρούμε ότι ο Άνθρακας βρίσκεται στο υψηλότερο επιτρεπτό ποσοστό τους στα περισσότερα αποδοτικά χαρτοφυλάκια, όπως και πριν. Για λόγους σύγκρισης, παρουσιάζουμε το ενεργειακό μίγμα του χαρτοφυλακίου EU2020 και του

αποδοτικού χαρτοφυλακίου που βρίσκεται επάνω στο σημείο καμπής του αποδοτικού μετώπου.

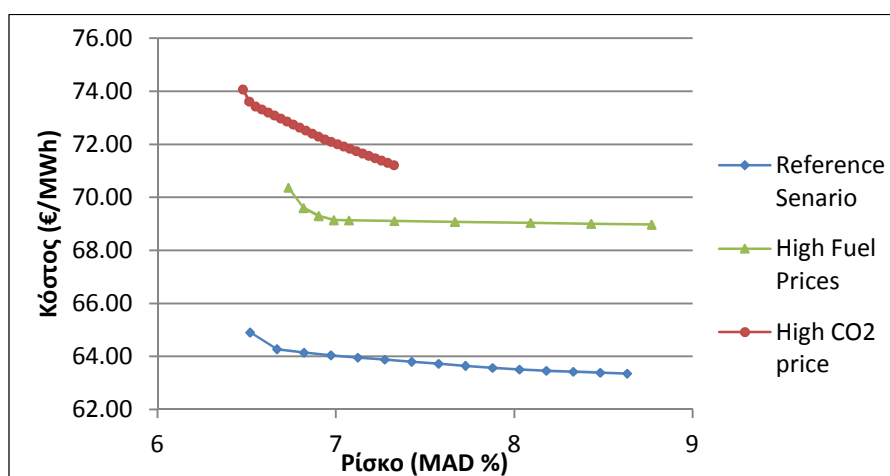


Γράφημα 5.16: Σύγκριση σύστασης χαρτοφυλακίου EU2020 με τη σύσταση του αποδοτικού χαρτοφυλακίου ΣΚ

Αξίζει να παρατηρήσουμε ότι στο αποδοτικό χαρτοφυλάκιο, τα ποσοστά των ΑΠΕ και του Άνθρακα βρίσκονται στο υψηλότερο επιτρεπτό ποσοστό, ενώ αντίθετα το Φυσικό Αέριο έχει μειωθεί στο ελάχιστο δυνατό, αφού το κόστος του έχει αυξηθεί πλέον αισθητά. Και σε αυτή την περίπτωση, το Πετρέλαιο δε συμμετέχει σε κανένα αποδοτικό χαρτοφυλάκιο.

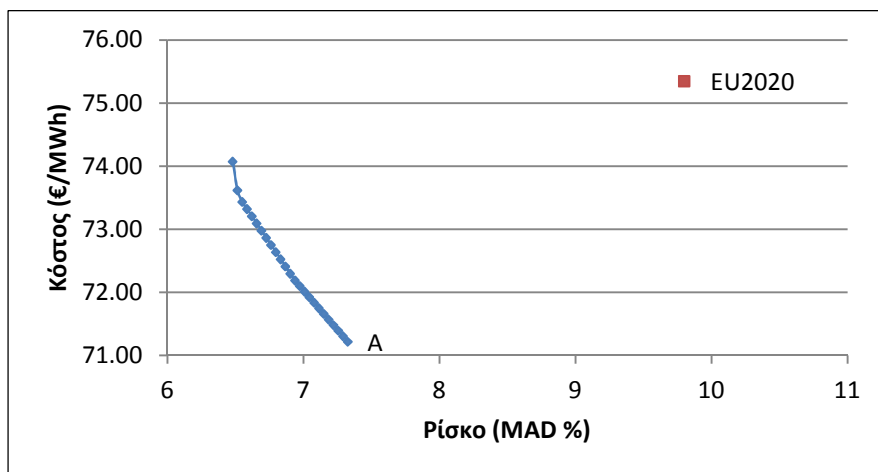
5.3 Σενάριο Υψηλού Κόστους CO₂

Στη συνέχεια, μελετήθηκε το σενάριο υψηλής τιμής CO₂. Στο αποδοτικό μέτωπο που προκύπτει, παρατηρούμε ότι στην περίπτωση που το 2020 επικρατήσει υψηλή τιμή CO₂, οι εναλλακτικοί αποδοτικοί συνδυασμοί αυξάνουν το κόστος ακόμα περισσότερο και δεν προσφέρουν μεγάλη ποικιλία ως προς το ρίσκο, αφού έχουμε δυνατότητα για αποδοτικά χαρτοφυλάκια με MAD 6.48-7.33%.



Γράφημα 5.17: Αποδοτικά μέτωπα (i) για το σενάριο αναφοράς (ii) για το σενάριο υψηλών τιμών καυσίμων (iii) για το σενάριο υψηλής τιμής CO₂

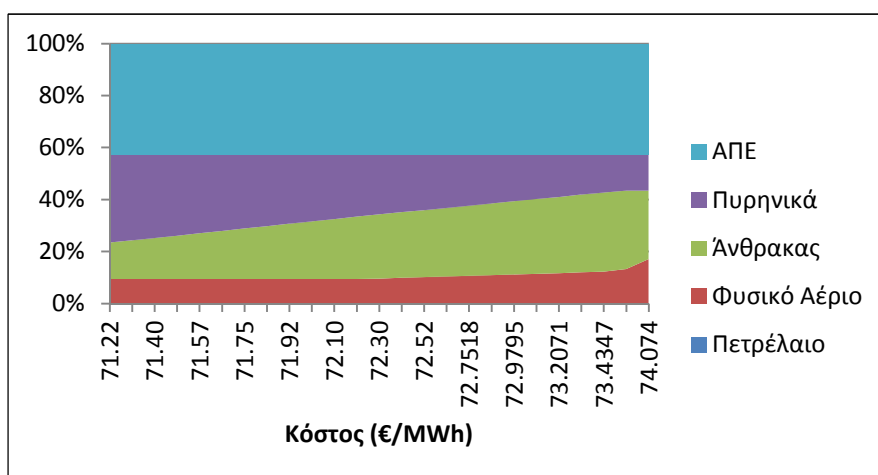
Σε σύγκριση με το χαρτοφυλάκιο EU2020, είναι εμφανές ότι είναι εφικτή μια μεγάλη μείωση όχι μόνο του ρίσκου αλλά και του κόστους. Επειδή το αποδοτικό μέτωπο παρουσιάζει πολύ απότομη κλίση, συμπεραίνουμε ότι είναι προτιμότερα τα χαρτοφυλάκια στο κάτω μέρος του, μιας και όσο ανεβαίνουμε κινούμαστε σε περιοχές αρκετά υψηλότερου κόστους, χωρίς να μειώνεται αντίστοιχα πολύ η MAD.



Γράφημα 5.18: Αποδοτικό μέτωπο για το σενάριο υψηλής τιμής CO₂

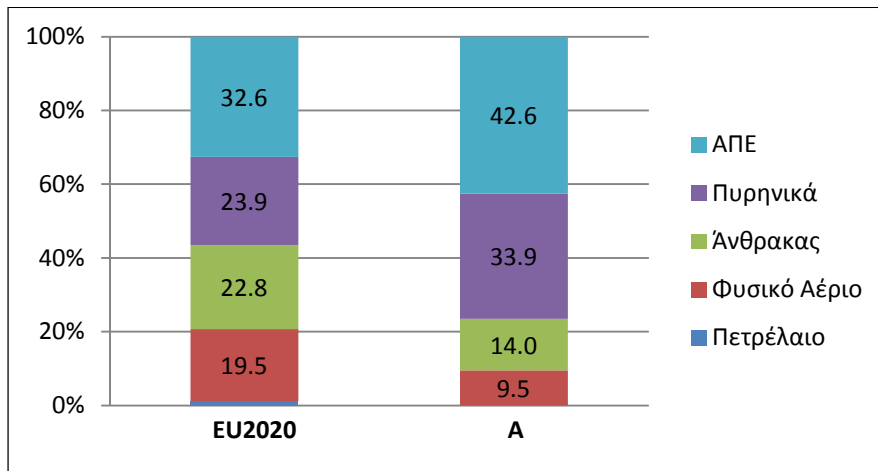
Για την αριθμητική σύγκριση, το χαρτοφυλάκιο ελάχιστου κόστους (A) αντιστοιχεί σε 74.07€/MWh προς 6.48% έναντι του EU2020 με 71.89€/MWh προς 9.94%.

Οι συστάσεις των αποδοτικών χαρτοφυλακίων που υπολογίστηκαν κυμαίνονται με τον τρόπο που φαίνεται στο παρακάτω γράφημα.



Γράφημα 5.19: Συστάσεις αποδοτικών χαρτοφυλακίων για το σενάριο υψηλής τιμής CO₂

Για λόγους σύγκρισης, παρουσιάζουμε τη σύσταση του χαρτοφυλακίου EU2020 και του αποδοτικού χαρτοφυλακίου που βρίσκεται στο σημείο μέγιστου ρίσκου/ελάχιστου κόστους του αποδοτικού μετώπου.



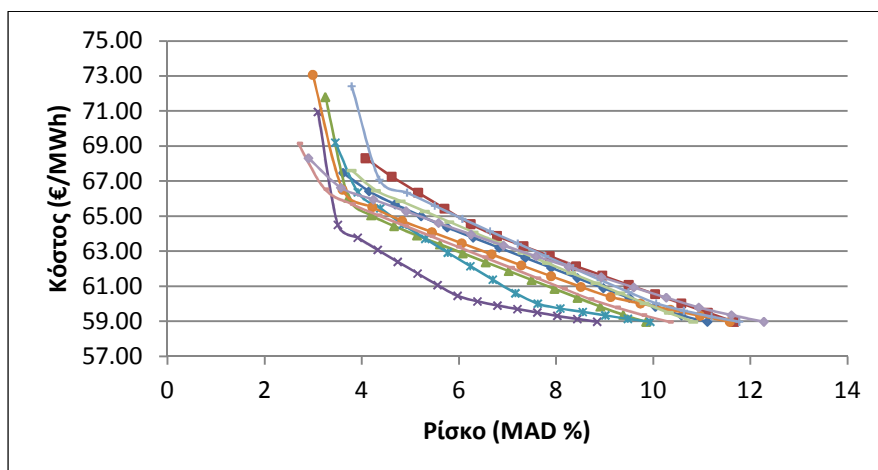
Γράφημα 5.20: Σύγκριση σύστασης χαρτοφυλακίου EU2020 με τη σύσταση του αποδοτικού χαρτοφυλακίου A

Παρατηρούμε ότι και σε αυτό το σενάριο, το ποσοστό των ΑΠΕ στο αποδοτικό χαρτοφυλάκιο που επιλέξαμε βρίσκεται στο υψηλότερο επιτρεπτό ποσοστό, σε συνδυασμό όμως εδώ με υψηλό ποσοστό πυρηνικών. Το Φυσικό Αέριο, παρόμοια με πριν, έχει μειωθεί στο ελάχιστο δυνατό.

5.4 Ευστάθεια αποτελεσμάτων

Στη συνέχεια, έγινε μια προσπάθεια να αξιολογηθεί η ευαισθησία της μεθόδου που ακολουθήθηκε για την παραγωγή δεδομένων από τους πίνακες συνδιακύμανσης με τη δειγματοληψία Monte Carlo.

Με δέκα διαφορετικές χρονοσειρές (που προέκυψαν από τη διαδικασία που περιγράφηκε νωρίτερα) ως δεδομένα εισόδου υπολογίστηκαν τα αντίστοιχα αποδοτικά μέτωπα για το σενάριο αναφοράς, με και χωρίς τους περιορισμούς για το ενεργειακό μίγμα.

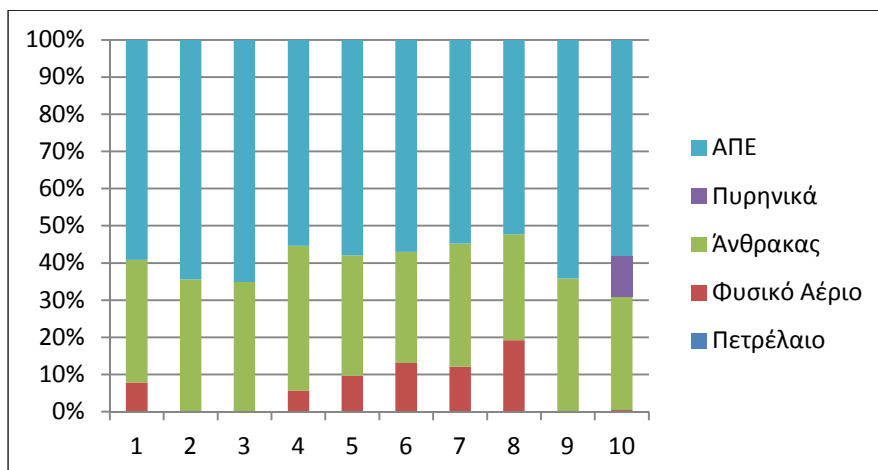


Γράφημα 5.21: Αποδοτικά μέτωπα χωρίς περιορισμούς για 10 διαφορετικές χρονοσειρές

Στην περίπτωση του σεναρίου χωρίς περιορισμούς παρατηρούμε ότι οι τα αποδοτικά μέτωπα παρουσιάζουν σε γενικές γραμμές μια κοινή συμπεριφορά με

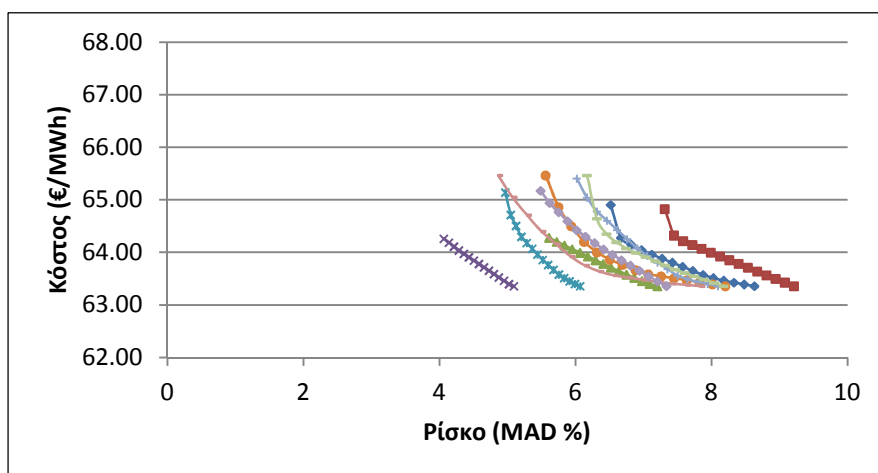
μικρές αποκλίσεις στο υπολογισμένο κόστος της τάξης του 1.5%, μεγάλες όμως αποκλίσεις στο υπολογισμένο ρίσκο των χαρτοφυλακίων, περίπου 20%.

Αξίζει να δούμε ενδεικτικά και τις συστάσεις των χαρτοφυλακίων που προκύπτουν για κόστος 63€/MWh. Είναι εμφανές ότι τα αποτελέσματα εμφανίζουν μεγάλες αποκλίσεις ως προς την επαναλήψιμότητά τους.



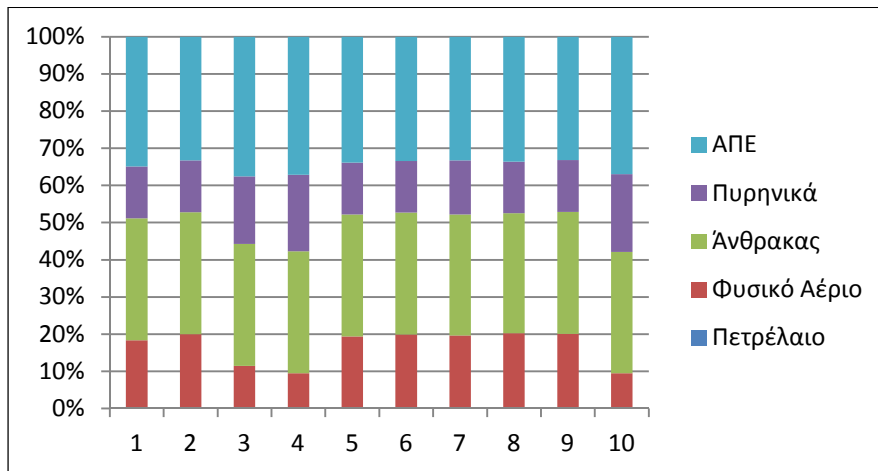
Γράφημα 5.22: Σύγκριση συστάσεων αποδοτικών χαρτοφυλακίων ίσου κόστους χωρίς περιορισμούς για δέκα διαφορετικές χρονοσειρές

Όταν εισάγουμε και τους περιορισμούς στο σενάριο, οι αποκλίσεις στο υπολογισμένο ρίσκο χαρτοφυλακίου σχεδόν διπλασιάζονται, ενώ το κόστος χαρτοφυλακίου κυμαίνεται σε παρόμοιες τιμές.



Γράφημα 5.23: Αποδοτικά μέτωπα με περιορισμούς για 10 διαφορετικές χρονοσειρές

Για κόστος 64€/MWh, προκύπτουν οι συστάσεις που φαίνονται στο παρακάτω γράφημα.



Γράφημα 5.24: Σύγκριση συστάσεων αποδοτικών χαρτοφυλακίων ίσου κόστους με περιορισμούς για δέκα διαφορετικές χρονοσειρές

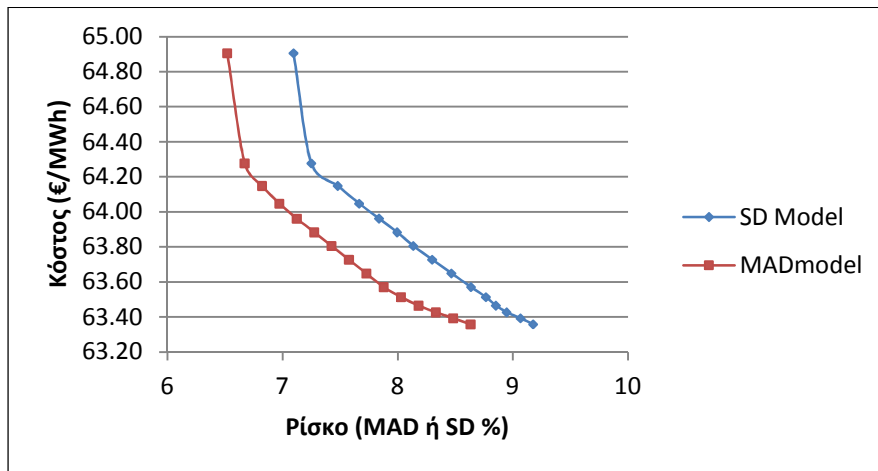
Συμπεραίνουμε ότι η παραγωγή των χρονοσειρών με χρήση των συντελεστών συσχέτισης είναι μια μέθοδος που δεν παράγει επαναλήψιμα αποτελέσματα, ειδικά για το συνολικό ρίσκο χαρτοφυλακίου, αλλά και για τις συστάσεις των αποδοτικών χαρτοφυλακίων.

Αυτό οφείλεται, όπως αναφέραμε και νωρίτερα, στο μεγάλο μέγεθος του επιθυμητού πίνακα συσχέτισης και το μικρό μέγεθος των χρονοσειρών που παραγάγαμε. Συγκεκριμένα, σύμφωνα με τη βιβλιογραφία [58], κριτήριο είναι ο λόγος $r = \frac{n}{T}$, όπου n είναι ο αριθμός των διαθέσιμων τεχνολογιών και T το μέγεθος των χρονοσειρών που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό του συνολικού πίνακα συνδιακύμανσης. Προφανώς, καθώς $r \rightarrow 0$, ο πίνακας που υπολογίζεται προσεγγίζει τον ζητούμενο πίνακα συνδιακύμανσης. Στην παρούσα μελέτη, έχουμε $r = \frac{5}{21} = 0.238$, μια τιμή που είναι πάνω από τη μέγιστη επιτρεπτή, αφού ο θόρυβος θεωρείται ότι πέφτει σε αποδεκτά σημεία για $r < 0.20$.

5.5 Σύγκριση με το μοντέλο μέσης τιμής-διακύμανσης

Σαν τελικό στάδιο της μελέτης, έγινε υπολογισμός των αποδοτικών χαρτοφυλακίων για το σενάριο αναφοράς με χρήση του μοντέλου μέσης τιμής-διακύμανσης (SD), ώστε να συγκρίνουμε τα αποτελέσματα που προκύπτουν με το μοντέλο MAD.

Το αποδοτικό μέτωπο έχει, όπως φαίνεται στο παρακάτω γράφημα, την ίδια μορφή και στις δύο περιπτώσεις.

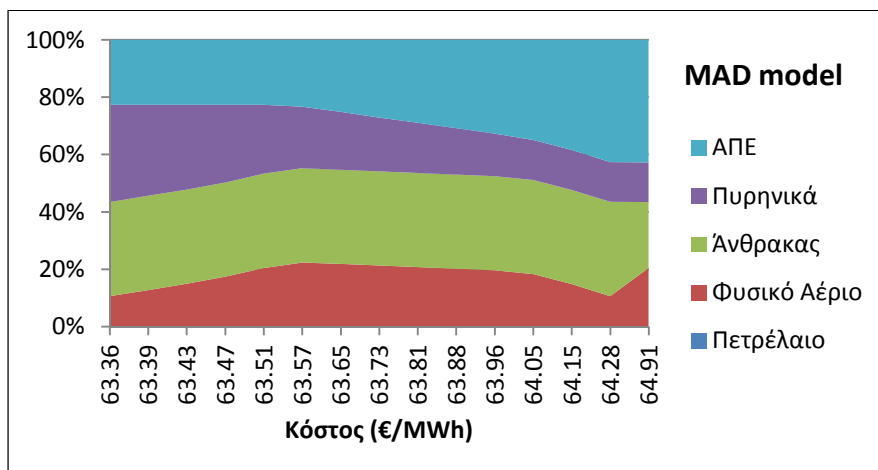


Γράφημα 5.25: Αποδοτικά μέτρωπα (i) με το μοντέλο MAD (ii) με το μοντέλο SD

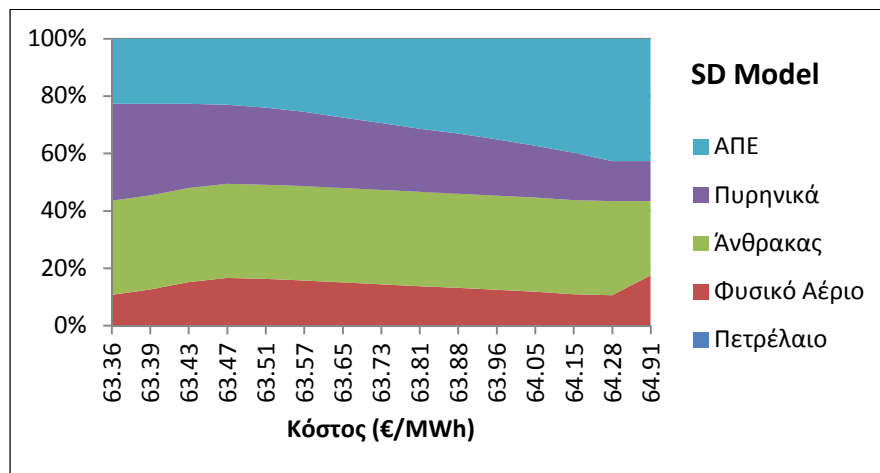
Σύμφωνα με τους Konno και Yamazaki, για χαρτοφυλάκια ίσου κόστους θα πρέπει να ισχύει $\frac{\sigma}{MAD} = \sqrt{\frac{\pi}{2}} = 1.2533$, αν το κόστος και το ρίσκο ακολουθούν πολυμεταβλητές κανονικές κατανομές [6]. Στη δική μας περίπτωση, ο λόγος $\frac{\sigma}{MAD}$ ήταν περίπου 1.0888. Η απόκλιση αυτή ήταν αναμενόμενη, αφού για τον μικρό αριθμό δειγμάτων που λάβαμε με τη δειγματοληψία Monte Carlo για κάθε χρονοσειρά ($T = 21$), δεν είναι ασφαλές να ισχυριστούμε ότι τα δεδομένα ρίσκου ακολουθούν την κανονική κατανομή.

Οι συστάσεις των αποδοτικών χαρτοφυλακίων που προκύπτουν από τις δύο μεθόδους παρουσιάζουν επίσης πολύ μικρές διαφορές μεταξύ τους, όπως μπορούμε να δούμε στα παρακάτω δύο γραφήματα.

Οι διαφορές οφείλονται στο διαφορετικό βάρος που δίνει το κάθε κριτήριο ελαχιστοποίησης για την απόκλιση από τη μέση τιμή. Συγκεκριμένα, το μοντέλο SD, επειδή υψώνει τις αποκλίσεις στο τετράγωνο, δίνει πολύ μεγαλύτερη βαρύτητα σε τιμές που βρίσκονται μακριά από τη μέση τιμή, σε αντίθεση με το μοντέλο MAD που συμπεριφέρεται πιο με αναλογικό τρόπο στις τιμές αυτές.



Γράφημα 5.26: Συστάσεις αποδοτικών χαρτοφυλακίων με το μοντέλο MAD



Γράφημα 5.27: Συστάσεις αποδοτικών χαρτοφυλακίων με το μοντέλο SD

5.6 Εξαγωγή άνω και κάτω ορίων για το κόστος χαρτοφυλακίου

Χρησιμοποιώντας στατιστικούς πίνακες, είναι πιθανόν να υπολογίσουμε άνω και κάτω όρια για το προσδοκώμενο συνολικό κόστος του χαρτοφυλακίου. Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία [59], για κανονική κατανομή και $n = 20$ (στην παρούσα μελέτη $n = 21$), το διάστημα εμπιστοσύνης είναι με ακρίβεια 95% το $[\bar{x} - c_d, \bar{x} + c_d]$, όπου $c_d = \frac{2.68}{\sqrt{21}} * MAD$. Οι υπολογισμοί άνω και κάτω ορίων μπορούν να διευκολύνουν την ποσοτικοποίηση της έννοιας του ρίσκου που κρύβεται πίσω από κάθε χαρτοφυλάκιο και κατά συνέπεια να διευκολύνουν τους φορείς χάραξης ενεργειακής πολιτικής στις διαδικασίες λήψης αποφάσεων.⁷

Για παράδειγμα, με βάση το σενάριο αναφοράς προτείνουμε νωρίτερα τα εναλλακτικά χαρτοφυλάκια μέγιστου κόστους και μέγιστου ρίσκου και τα συγκρίναμε με το χαρτοφυλάκιο του προσδοκώμενου ενεργειακού μίγματος της ΕΕ το 2020. Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται τα άνω και κάτω όρια για βεβαιότητα 95%.

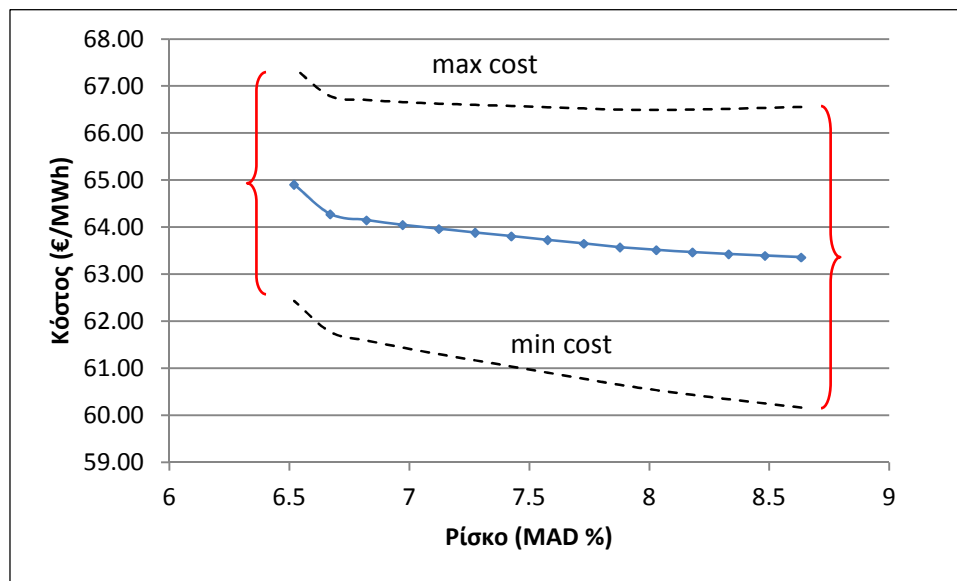
Πίνακας 5.2: Διαστήματα εμπιστοσύνης για τρία ενδεικτικά χαρτοφυλάκια

	Κόστος (€/MWh)	MAD(%)	Κάτω όριο (€/MWh)	Άνω όριο (€/MWh)
Μέγ. Κόστος	64.91	6.52	62.43	67.39
Μέγ. Ρίσκο	63.36	8.53	60.20	66.52
ΕΥ2020	65.27	9.61	61.60	68.94

Τα παραπάνω αποτελέσματα μπορούν να παρουσιαστούν και γραφικά. Στο παρακάτω γράφημα, παρουσιάζεται το αποδοτικό μέτωπο (μεσαία καμπύλη), ενώ παράλληλα φαίνονται τα διαστήματα εμπιστοσύνης (καμπύλες εκατέρωθεν του αποδοτικού μετώπου).

⁷ Η προσέγγιση αυτή προτάθηκε αρχικά από τους Jansen et al. [18]

Παρατηρούμε ότι, όπως είναι αναμενόμενο, για τα χαρτοφυλάκια που βρίσκονται δεξιότερα, τα διαστήματα εμπιστοσύνης μεγαλώνουν, αφού έχουν μεγαλύτερο ρίσκο.



Γράφημα 5.28: Αποδοτικό μέτωπο και διαστήματα εμπιστοσύνης

6. ΣΥΖΗΤΗΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Τα αποτελέσματα της μελέτης μπορούν να χωριστούν σε δύο μέρη. Στο πρώτο μέρος, θα αναφερθούν οι παρατηρήσεις και οι προτάσεις που μπορούν να γίνουν σε σχέση με την ενεργειακή πολιτική της ΕΕ στον τομέα της ηλεκτροπαραγωγής. Στο δεύτερο μέρος, θα αναφερθούμε στην αποτελεσματικότητα της μεθόδου και του μοντέλου που χρησιμοποιήσαμε.

6.1 Αποτελέσματα σχετικά με την Ενεργειακή Πολιτική της ΕΕ

Με βάση τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την παραπάνω μελέτη, μπορούμε να προτείνουμε ορισμένες γενικές κατευθύνσεις σχετικά με τη χάραξη της Κοινοτικής Ενεργειακής Πολιτικής. Σε γενικές γραμμές, οι προτάσεις μας συμφωνούν με αυτές των Awerbuch και Berger [10] αλλά και των Awerbuch και Yang [29].

- *Η ενεργειακή πολιτική της ΕΕ μπορεί να βελτιωθεί μέσω της εφαρμογής της ΣΘΧ*

Τα αποτελέσματα της μελέτης μας κατέδειξαν ότι με βάση τη ΣΘΧ το ηλεκτροπαραγωγικό μίγμα στο οποίο στοχεύει η ΕΕ για το 2020 δε συνιστά ένα αποδοτικό χαρτοφυλάκιο. Αυτό σημαίνει, ότι υπάρχουν συνδυασμοί τεχνολογιών που παρέχουν χαμηλότερο κόστος για το ίδιο ποσοστό αποδεκτού ρίσκου ή άλλοι με χαμηλότερο ρίσκο για το ίδιο ύψος αποδεκτού κόστους.

- *Ενδείκνυται η εισαγωγή μεγαλύτερου ποσοστού ΑΠΕ*

Τα αποτελέσματα μας για όλα τα σενάρια έδειξαν σε γενικές γραμμές ότι η αύξηση του ποσοστού των ΑΠΕ στο μίγμα ηλεκτροπαραγωγής οδήγησε σε πιο αποδοτικά χαρτοφυλάκια.

Σε δεύτερο επίπεδο, σημαντικός ήταν και ο ρόλος των τεχνολογιών Άνθρακα και Πυρηνικών. Πάντως, σε όλες τις περιπτώσεις, η ηλεκτροπαραγωγή από πετρέλαιο απορρίφθηκε εντελώς, αφού δεν εισήλθε ούτε σε μικρή αναλογία στα αποδοτικά χαρτοφυλάκια. Το Πετρέλαιο θα αποτελέσει στο μέλλον προφανώς μια τεχνολογία υψηλού κόστους και αρκετά υψηλού ρίσκου.

- *Τα Πυρηνικά και οι ΑΠΕ είναι αποδοτικές τεχνολογίες με αντίστροφα χαρακτηριστικά*

Τα Πυρηνικά, όπως και οι ΑΠΕ, συμμετείχαν με υψηλό ποσοστό σε μεγάλο αριθμό αποδοτικών χαρτοφυλακίων, σπάνια όμως συγχρόνως. Σε γενικές γραμμές, οι εναλλακτικές χαμηλού ρίσκου περιείχαν υψηλότερα ποσοστά ΑΠΕ, ενώ οι εναλλακτικές χαμηλού κόστους περιείχαν υψηλότερα ποσοστά Πυρηνικών. Η

απόφαση της προώθησης της μίας ή της άλλης τεχνολογίας θα πρέπει να ληφθεί συνεπώς με βάση άλλα κριτήρια.

- *Οι ΑΠΕ και ο Άνθρακας θα προστατεύσουν το χαρτοφυλάκιο σε περίπτωση που επικρατήσουν υψηλές τιμές καυσίμων ή αυστηροί περιορισμοί για το CO₂*

Με βάση τα αποτελέσματα που προέκυψαν και για το δύο εναλλακτικά σενάρια, η εισαγωγή μεγαλύτερου ποσοστού ΑΠΕ αλλά και Άνθρακα στο ηλεκτροπαραγωγικό μίγμα θα οδηγήσει σε πιο αποδοτικά χαρτοφυλάκια για το 2020, μειώνοντας όχι μόνο το κόστος αλλά και το ρίσκο.

Αξίζει να σημειωθεί ότι η αύξηση και για τις δύο τεχνολογίες άγγιξε τους περιορισμούς που είχαμε θέσει, δηλαδή ποσοστό μεγαλύτερο κατά 10 ποσοστιαίες μονάδες από αυτό που αντιστοιχεί στο χαρτοφυλάκιο EU2020.

6.2 Αποτελέσματα σχετικά με τη μέθοδο και τη μοντελοποίηση

Από την μελέτη για το ηλεκτροπαραγωγικό μίγμα της ΕΕ οδηγηθήκαμε και σε ορισμένα συμπεράσματα για την ακρίβεια και την ευαισθησία του μοντέλου που εφαρμόστηκε στα δεδομένα εισόδου.

- *Το ρίσκο με βάση τις τιμές των καυσίμων δεν είναι απολύτως αντιπροσωπευτικό*

Ο υπολογισμός του συνολικού ρίσκου χαρτοφυλακίου με βάση το ρίσκο των καυσίμων και μόνο οδηγεί σε λανθασμένα συμπεράσματα ως προς την προτιμότερη αναλογία των τεχνολογιών ορυκτών καυσίμων. Συγκεκριμένα, υποτιμήθηκε το ρίσκο των Πυρηνικών, αφού η μεταβολές στο κόστος του ουρανίου δεν αντιπροσωπεύουν το πραγματικό ρίσκο της τεχνολογίας. Όταν συνυπολογίστηκε το ρίσκο που προκύπτει από τις υπόλοιπες κατηγορίες που λαμβάνουν μέρος στο σχηματισμό του κόστους (Κόστος Λειτουργίας, Κόστος Επένδυσης, Κόστος Εκπομπών CO₂), παρατηρήθηκε δραστική μείωση του ποσοστού των Πυρηνικών και αντικατάσταση τους από τον Άνθρακα.

- *Η παραγωγή δεδομένων με δειγματοληψία Monte Carlo οδηγεί σε αποτελέσματα με μεγάλες αποκλίσεις ως προς την επαναληψιμότητα για χρονοσειρές περιορισμένου μεγέθους*

Όπως είδαμε, για τη μελέτη αυτή έγινε παραγωγή τυχαίων χρονοσειρών με βάση τις προδιαγραφές διακύμανσης και συνδιακύμανσης που προτείνονται στη βιβλιογραφία. Με βάση τα αποτελέσματα, είναι φανερό ότι η μέθοδος αυτή μπορεί να αποδίδει δείγματα με μικρές αποκλίσεις από τις προδιαγραφές, μόνο όταν μιλάμε για μεγάλες χρονοσειρές, δηλαδή τουλάχιστον 25 έτη.

- Το μοντέλο μέσης τιμής-MAD δίνει ίδια αποτελέσματα με το μοντέλο μέσης τιμής-διακύμανσης(SD)

Συνολικά, το μοντέλο που προτάθηκε (όπου το ρίσκο εκφράζεται μέσω της MAD) δεν παρουσίασε σημαντικές αποκλίσεις στα αποτελέσματα σε σχέση με το συνηθισμένο μοντέλο μέσης τιμής-διακύμανσης (όπου το ρίσκο εκφράζεται μέσω της SD).

7. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΜΕΛΕΤΗΣ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗΣ ΕΡΕΥΝΑΣ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία, έγινε μια προσπάθεια εφαρμογής της Σύγχρονης Θεωρίας Χαρτοφυλακίου (ΣΘΧ) στον ενεργειακό σχεδιασμό, και συγκεκριμένα στη διαμόρφωση του μίγματος της ηλεκτροπαραγωγής στην Ευρωπαϊκή Ένωση. Το μοντέλο που εφαρμόστηκε βασίστηκε σε προηγούμενες μελέτες, προτάθηκαν όμως και ορισμένες αλλαγές.

Μέσα από τη μελέτη μας αναδείχθηκε η αξία της ΣΘΧ στον ενεργειακό σχεδιασμό. Με την κατάλληλη εισαγωγή δεδομένων στο μοντέλο, προέκυψε ένα αποδοτικό μέτωπο, δηλαδή ένα σύνολο συνδυασμών που ικανοποιούν τα κριτήρια ελαχιστοποίησης του κόστους αλλά και του ρίσκου.

Παρόλο που τα αποτελέσματα μας δε μπορούν να θεωρηθούν ακριβή, καθώς κάναμε πολλές απλουστεύσεις και αποφύγαμε την εισαγωγή λεπτομερών δεδομένων εισόδου, μπορούμε να πούμε ότι αναδεικνύουν τα οφέλη που μπορούν να προκύψουν από την αύξηση του ποσοστού συμμετοχής των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας στο ηλεκτροπαραγωγικό μίγμα της ΕΕ. Επίσης, σημαντικό ρόλο στην περίπτωση της αύξησης των τιμών των καυσίμων ή της ύπαρξης αυστηρών περιορισμών για τις εκπομπές CO₂ μπορεί να παίξει η τεχνολογία της ηλεκτροπαραγωγής από άνθρακα. Τέλος, τίθεται το ερώτημα της επιλογής ανάμεσα σε μίγματα που περιέχουν περισσότερα Πυρηνικά/λιγότερες ΑΠΕ και επιτυγχάνουν χαμηλότερο κόστος με υψηλότερο ρίσκο, ή μίγματα με λιγότερα Πυρηνικά/περισσότερες ΑΠΕ που αποφέρουν υψηλότερο κόστος με χαμηλότερο ρίσκο.

Στην έρευνα μας θεωρήθηκαν μόνο πέντε τεχνολογίες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, με βάση την πηγή της ενέργειας. Θα ήταν ενδιαφέρον η έρευνα να επεκταθεί σε περισσότερες τεχνολογίες. Στις προτάσεις μας για συνέχιση της έρευνας, συμπεριλαμβάνεται φυσικά και η βελτίωση των δεδομένων εισόδου για το μοντέλο. Αυτό σημαίνει αφενός πιο αξιόπιστες μελλοντικές προβλέψεις για τα κόστη και αφετέρου πιο αναλυτικά ιστορικά δεδομένα για τον υπολογισμό του ρίσκου. Επίσης, δεδομένου ότι τα ιστορικά στοιχεία πολλές φορές δεν επαρκούν για σωστούς υπολογισμούς, προτείνεται να συμπεριληφθούν στις διαδικασίες υπολογισμού του ρίσκου, όπου κρίνεται απαραίτητο, και οι γνώσεις ειδικών στα θέματα της ενεργειακής πολιτικής, ώστε τα αποτελέσματα να έχουν περισσότερη αξιοπιστία.

Το μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε στη μελέτη αυτή βασίστηκε στην αντίστοιχη μελέτη των Awerbuch και Berger [10], είχε όμως δύο βασικές τροποποιήσεις: πρώτον, χρησιμοποιήθηκε σαν κριτήριο του ρίσκου η μέση απόλυτη απόκλιση (MAD) έναντι της διακύμανσης, κατά τα πρότυπα των Konno και Yamazaki [6] και

δεύτερον, έγινε παραγωγή χρονοσειρών με δειγματοληψία Monte Carlo για τον υπολογισμό της MAD που πληρούσαν τις προϋποθέσεις που θέτονται στη βιβλιογραφία.

Η μέθοδος μας έδωσε αποτελέσματα ανάλογα με αυτά της μελέτης των Awerbuch και Berger, πράγμα που σημαίνει ότι η MAD αποτελεί ένα εξίσου καλό κριτήριο για το ρίσκο. Το μοντέλο όμως παρουσίασε μεγάλη ευαισθησία στις διαφορετικές χρονοσειρές που παράγει η δειγματοληψία Monte Carlo, κυρίως λόγω του μικρού μεγέθους των χρονοσειρών που χρησιμοποιήθηκαν.

Το μοντέλο μας μπορεί να αποτελέσει μια βάση για μια πιο αναλυτική μελέτη, η οποία θα λαμβάνει υπόψη της περισσότερες παραμέτρους, όπως για παράδειγμα δεδομένα για τις καμπύλες φορτίου των διαφόρων τεχνολογιών. Επίσης, θα είχε ενδιαφέρον η προσαρμογή του μοντέλου, ώστε με παράλληλη μοντελοποίηση της αγοράς, να μπορεί να παρέχει αποτελέσματα από την πλευρά των επενδυτών στον τομέα της ενέργειας, οι οποίοι στοχεύουν όχι στην ελαχιστοποίηση του κόστους, αλλά στη μεγιστοποίηση του κέρδους τους. Σε επόμενη μελέτη, θα μπορούσε επίσης να δοκιμαστεί η εφαρμογή και άλλων παραλλαγών του βασικού μοντέλου μέσης τιμής-διακύμανσης, που έχουν ήδη εφαρμοστεί στα χρηματοοικονομικά, όπως για παράδειγμα ο διαχωρισμός του ρίσκου σε «ρίσκο προς τα πάνω» (upside risk), δηλαδή πιθανά οφέλη, και «ρίσκο προς τα κάτω» (downside risk), δηλαδή πιθανές απώλειες, ώστε να ελαχιστοποιηθούν μόνο οι δεύτερες. Τέλος, προτείνεται η ανάπτυξη ενός μοντέλου που θα μπορεί να ανατροφοδοτείται συνεχώς με νέα δεδομένα που προκύπτουν και θα στοχεύει στη βραχυχρόνια εξισορρόπηση του μίγματος προς αποδοτικότερα χαρτοφυλάκια.

8. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] S. Awerbuch and M. Berger, "Applying Portfolio Theory to EU Electricity Planning and Policy-making," IEA/EET, Paris, Working Paper EEt/2003/03, 2003.
- [2] H. Konno and H. Yamazaki, "Mean-Absolute Deviation Portfolio Optimization Model and Its Applications to Tokyo Stock Market," *Management Science*, vol. 37, no. 5, pp. 519-531, May 1991.
- [3] H. Markowitz, "Portfolio Selection," *Journal of Finance*, no. 7, 1952.
- [4] F. Fabozzi, F. Gupta, and H. Markowitz, "The legacy of Modern Portfolio Theory," *The Journal of Investing*, pp. 7-22, Fall 2002.
- [5] W. Sharpe, "Capital Asset Prices: A Theory of Market Equilibrium under Conditions of Risk," *The Journal of Finance*, vol. 19, no. 3, pp. 425-442, September 1964.
- [6] J. F. Fabozzi, H. M. Markowitz, and F. Gupta, "Portfolio Selection," in *Handbook of Finance*, J. F. Fabozzi, Ed.: John Wiley & Sons, Inc., 2008.
- [7] E. J. Elton, J. M. Gruber, and M. W. Padberg, "Simple Criteria for Optimal Portfolio Selection," *The Journal of Finance*, vol. 31, no. 5, pp. 1341-1357, December 1976.
- [8] R. Sauter and S. Awerbuch, "Oil Price Volatility and Economic Activity: A Survey and Literature Review," IEA, Paris, Research Paper 2003.
- [9] J. D. Hamilton, "Oil and the Macroeconomy since World War II," *Journal of Political Economy*, vol. 91, no. 2, pp. 228-248, 1983 April.
- [10] IEA. (2012, February) [Online]. http://www.eia.gov/oiaf/economy/energy_price.html
- [11] S. Awerbuch, "Investing in photovoltaics: risk, accounting and the value of new technology," *Energy Policy*, no. 28, pp. 1023-1035, 2000.
- [12] S. Awerbuch, "Getting It Right: The Real Cost Impacts of a Renewables Portfolio Standard," *Fortnightly Magazine*, February 2000.
- [13] M. Berger, S. Awerbuch, and R. Hass, "Versorgungssicherheit und Diversifizierung der Energieversorgung in der EU," Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie, Wien, 2003.
- [14] Z. Bodie, A. Kane, and A. J. Marcus, *Investments*, 5th ed.: McGraw Hill, 2002.

- [15] A. C. Stirling, "Diversity and ignorance in electricity supply investment: Addressing the solution rather than the problem," *Energy Policy*, vol. 22, no. 3, pp. 195–216, March 1994.
- [16] D. Bar-Lev and S. Katz, "A Portfolio Approach to Fossil Fuel Procurement in the Electric Utility Industry," *Journal of Finance*, vol. 31, no. 3, pp. 226-39, June 1976.
- [17] H. B. Humphreys and K. T. McClain, "Reducing the Impacts of Energy Price Volatility Through Dynamic Portfolio Selection," *The Energy Journal*, vol. 19, no. 3, pp. 107-132, 1998.
- [18] J. C. Jansen, L. W.M. Beurskens, and X. van Tilburg, "Application of portfolio analysis to the Dutch generating mix," ECN, Project Report 77677.01.02, 2006.
- [19] S. Awerbuch, J. C. Jansen, and L. W. Beurskens, "Building Capacity for Portfolio-Based Energy Planning in Developing Countries," ECN, 77565, 2004.
- [20] S. Awerbuch, J. C. Jansen, and L. Beurskens, "Portfolio-Based Electricity Generation Planning and the Role of Renewables in Enhancing Energy Security in Tunisia," 2005.
- [21] S. Awerbuch, J. C. Jansen, and T. Drennen, "The Cost of Geothermal Energy in the Western US Region: A Portfolio-Based Approach," Sandia National Laboratories, Albuquerque, New Mexico and Livermore, California, SAND2005-5173, 2005.
- [22] P. DeLaquil, S. Awerbuch, and K. Stroup, "A Portfolio-Risk Analysis of Electricity Supply Options in the Commonwealth of Virginia," Chesapeake Climate Action Network, 2005.
- [23] S. Awerbuch, "Portfolio-Based Electricity Generation Planning: Policy Implications for Renewables and Energy Security," *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, no. 11, pp. 697-710, 2006.
- [24] B. Krey and P. Zweifel, "Efficient Electricity Portfolios for Switzerland and the United States," Socioeconomic Institute, University of Zurich, Zurich, Working Paper 0602, 2006.
- [25] Y.-H. Huang and J.-H. Wu, "A portfolio risk analysis on electricity supply planning," *Energy Policy*, no. 36, pp. 627-641, 2008.
- [26] D. Gotham, K. Muthuraman, P. Preckel, R. Rardin, and S. Ruangpattan, "A load factor based mean-variance analysis for fuel diversification," *Energy Economics*, no. 31, pp. 249-256, 2009.
- [27] E. McLoughlin and M. Bazilian, "Application of Portfolio Analysis to the Irish Electricity Generating Mix in 2020," Sustainable Energy Ireland (SEI), 2006.

- [28] R. Doherty, H. Outred, and M. O'Malley, "Establishing the Role That Wind Generation May Have in Future Generation Portfolios," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 21, no. 3, pp. 1415-1422, August 2006.
- [29] S. Awerbuch and S. Yang, "Efficient electricity generating portfolios for Europe: maximising energy security and climate change mitigation," *EIB Papers*, vol. 12, no. 2, pp. 8-37, 2007.
- [30] B. White, "A Mean-Variance Portfolio Optimization of California's Generation Mix to 2020," California Energy Commission, CEC-300-2007-009-D, 2007.
- [31] S. Awerbuch, "The Role of Wind Generation in Enhancing Scotland's Energy Diversity and Security," Airtricity, Greenock, 2006.
- [32] L. Zhu and Y. Fan, "Optimization of China's generating portfolio and policy implications based on portfolio theory," *Energy*, no. 35, pp. 1391-1402, 2010.
- [33] N. Rodoulis, "Evaluation of Cyprus' Electricity Generation Planning Using Mean-Variance Portfolio Theory," *Cyprus Economic Policy Review*, vol. 4, no. 2, pp. 25-42, 2010.
- [34] G. A. Marrero and F. J. Ramos-Real, "Electricity generation cost in isolated systems: The Complementarities of natural gas and renewables in the Canary Islands," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, no. 14, pp. 2808-2818, 2010.
- [35] M. Dornan and F. Jotzo, "Electricity Generation in Fiji: Assessing the Impact of Renewable Technologies on Costs and Financial Risk," Australian Agricultural and Resource Economics Society, Melbourne, 2011.
- [36] A. von Zon and S. Fuss, "Investing in Energy Conversion Technologies - An Optimum Vintage Portfolio Selection Approach," MERIT, Maastricht University, 2005-013, 2005.
- [37] A. van Zon and S. Fuss, "Irreversible Investment and Uncertainty in Energy Conversion: a Clay-Clay Vintage Portfolio Selection Approach," University of Maastricht, 2006.
- [38] S. Fuss, J. Szolgayova, N. Khabarov, and M. Obersteiner, "Renewables and climate change mitigation: Irreversible energy investment under uncertainty and portfolio effects," *Energy Policy*, no. Article in Press, 2010.
- [39] F. Kienzle and G. Andersson, "Efficient Multi-Energy Generation Portfolios for the Future," Zurich, Research Project 2007.
- [40] E. Delarue, C. De Jonghe, R. Belmans, and W. D'haeseleer, "Applying portfolio theory to the electricity sector: Energy versus Power," *Energy Economics*, no. 33, pp. 12-23, May 2010.

- [41] F. A. Roques, D. M. Newbery, and W. J. Nuttall, "Fuel mix diversification incentives in liberalized electricity markets: A Mean-Variance Portfolio theory approach," *Energy Economics*, no. 30, pp. 1831-1849, 2008.
- [42] F. Roques, C. Hiroux, and M. Saguan, "Optimal wind power deployment in Europe-A portfolio approach," *Energy Policy*, no. 38, pp. 3245-3256, 2010.
- [43] R. Madlener and C. Wenk, "Efficient Investment Portfolios for the Swiss Electricity Supply Sector," fcn, Aachen, Working Paper 2/2008, 2008.
- [44] G. Westner and R. Madlener, "The benefit of regional diversification of cogeneration investments in Europe: A mean-variance portfolio analysis," *Energy Policy*, no. 38, pp. 7911-7920, 2010.
- [45] International Energy Agency, "World Energy Outlook," 2009.
- [46] BP, "BP Energy Outlook 2030," 2010.
- [47] BP, "Statistical Review of World Energy," 2011. [Online].
<http://www.bp.com/statisticalreview>
- [48] IPCC, "Climate Change 2007: Summary for Policymakers," 2007.
- [49] Ευρωπαϊκή Επιτροπή, "Δύο φορές το 20 έως το 2020, Η κλιματική αλλαγή και η ευκαιρία της Ευρώπης," 2008.
- [50] Επιτροπή των Ευρωπαϊκών Κοινοτήτων, "Πράσινη Βίβλος, Ευρωπαϊκή στρατηγική για αειφόρο, ανταγωνιστική και ασφαλή ενέργεια," , 2006.
- [51] P. Capros, L. Mantzos, N. Tasios, A. DeVita, and N. Kouvaritakis, "EU Energy Trends to 2030 - Update 2009," Directorate General for Energy - European Commission, 2010.
- [52] M. Ehrgott and S. Ruzika, "Improved ϵ -Constraint Method for Multiobjective Programming," *Journal of Optimization Theory and Applications*, vol. 138, no. 3, pp. 375-396, September 2008.
- [53] G. Mavrotas. (2012, February) Generation of efficient solutions in Multiobjective Mathematical Programming problems using GAMS. Effective implementation of the ϵ -constraint method. Document. [Online]. www.gams.com/modlib/adddocs/epscom.pdf
- [54] SETIS. European Commission. (2012, February) Strategic Energy Technology Information Systems. [Online]. <http://setis.ec.europa.eu/>
- [55] "Europe's current and future energy position. Demand – resources - investments," Commission of the European Communities, Brussels, SEC(2008) 2871, 2008.

- [56] Energy Information Administration (EIA). Uranium Prices 1949-2010. Spreadsheet. [Online]. <http://www.eia.gov/nuclear>
- [57] A. Eydeland and K. Wolyniec, *Energy and Power Risk Management: New Developments in Modeling, Pricing, and Hedging*. Hoboken, New Jersey, USA: John Wiley & Sons, Inc, 2003.
- [58] S. Pafka and I. Kondor, "Noisy Covariance Matrices and Portfolio Optimization II," preprint cond-mat/0111503, February 2002.
- [59] Erna M. J. Herrey, "Confidence Intervals Based on the Mean Absolute Deviation of a Normal Sample," *Journal of the American Statistical Association*, vol. 60, no. 309, pp. 257-269, March 1965.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ

Π.1 Κώδικας GAMS

Παρουσιάζεται ενδεικτικά ο κώδικας GAMS που χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό του αποδοτικού μετώπου στην περίπτωση του σεναρίου αναφοράς.

```
$inlinecom [ ]
$eolcom //

$title Example model definitions

SETS
K criteria /1*2/
*DK descriptive attributes (not used as objective functions) /1*3/
T observations /1*21/
I technologies /1*5/

TABLE dr(I,T) the T-th deviation from mean of the I-th technology
$include "c:\gams\input\risk_RB.txt" ;
;
Parameter r(I) the expected cost of the technologies
/
$include "c:\gams\input\cost_RB.txt" ;
/ ;

Parameter dir(K) direction of the objective functions
/
1 -1
2 -1
/ ;

Parameter ubobj(K) upper bound for the objective functions
/
1 INF
2 INF
/ ;

Parameter lbobj(K) lower bound for the objective functions
/
1 -1
2 -INF
/ ;

;
scalar
lb lower bound for share in portfolio /0.01/
ub upper bound for share in portfolio /100.00/
```

```

minstocks lower bound for stocks in the portfolio /1/
maxstocks upper bound for stocks in the portfolio /5/
numstock number of stocks in the portfolio
earlyex number of early exits from the loops
elapsed_time elapsed time for payoff and e-constraint
pareto_num number of Pareto optimal solutions
start start time
finish finish time
numloop number of loops in e-constraint
;

POSITIVE VARIABLES
W(I) the share of stock I in the portfolio
Y(T) auxiliary variable for the MAD definition according to Konno and Yamazaki 1991

free variables
Z(K) value of the objective functions
*DZ(DK) descriptive attributes (not objective functions)
;

BINARY VARIABLES
B(I) the existence of stock I in the portfolio
;

EQUATIONS
*DECLARATION OF EQUATIONS
*definition of objective functions
EQ_OBJ1    objective function 1 (return)
EQ_OBJ2    objective function 2 (mad)

*General constraints
EQ_LO(I)    lower bound for share in portfolio for stock I
EQ_UP(I)    upper bound for share in portfolio for stock I
EQ_SUMBJLO  lower bound for number of stocks in the portfolio
EQ_SUMBJUP  upper bound for number of stocks in the portfolio

*specific constraints

*auxiliary constraints
EQ_SUMXJ    sum of shares equals 1

EQ_MAD1(T)  auxiliary equation for the definition of MAD
EQ_MAD2(T)  auxiliary equation for the definition of MAD
;

```



```

*DESCRIPTION OF EQUATIONS
*definition of objective functions
EQ_OBJ1..  sum(I,W(I)*r(I))=e=Z('1');
EQ_OBJ2..  sum(T,Y(T))/card(T)=e=Z('2');

*General constraints
EQ_LO(I)..  W(I) - lb*B(I) =g= 0 ;
EQ_UP(I)..  W(I) - ub*B(I) =l= 0 ;
EQ_SUMBJLO.. sum(I,B(I))=g= minstocks ;
EQ_SUMBJUP.. sum(I,B(I))=l= maxstocks ;

*specific constraints

*auxiliary constraints
EQ_SUMXJ..  sum(I, W(I))=e= 1 ;

EQ_MAD1(T).. sum(I,W(I)*dr(I,T))+ Y(T) =g= 0;
EQ_MAD2(T).. sum(I,W(I)*dr(I,T))- Y(T) =l= 0;

*bounds on objective functions
Z.up(K)=ubobj(K);
Z.lo(K)=lbobj(K);
*bounds on specific stocks
W.lo('1')=0.0;
W.up('1')=0.112;
W.lo('2')=0.095;
W.up('2')=0.295;
W.lo('3')=0.128;
W.up('3')=0.328;
W.lo('4')=0.139;
W.up('4')=0.339;
W.lo('5')=0.226;
W.up('5')=0.426;

model fpo /all/ ;

*****
$STitle eps-constraint method

Set k1(k) the first element of k, km1(k) all but the first elements of k;
k1(k)$ (ord(k)=1) = yes; km1(k)=yes; km1(k1) = no;
Set kk(k)  active objective function in constraint allobj
Parameter
  rhs(k)  right hand side of the constrained obj functions in eps-constraint
  maxobj(k) maximum value from the payoff table

```

```

minobj(k) minimum value from the payoff table
Variables
  a_objval auxiliary variable for the objective function
  obj      auxiliary variable during the construction of the payoff table
Positive Variables
  sl(k)    slack or surplus variables for the eps-constraints
Equations
  con_obj(k) constrained objective functions
  augm_obj augmented objective function to avoid weakly efficient solutions
  allobj   all the objective functions in one expression;

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

* We optimize the first objective function and put the others as constraints
* the second term is for avoiding weakly efficient points
augm_obj..
  sum(k1,dir(k1)*z(k1))+1e-6*sum(km1,sl(km1)/(maxobj(km1)-minobj(km1))) =e=
a_objval;

allobj.. sum(kk, dir(kk)*z(kk)) =e= obj;

Model mod_payoff / fpo, allobj / ;
Model mod_epsmethod / fpo, con_obj, augm_obj / ;

option limrow=0, limcol=0, solprint=off, solvelink=2;
option optcr=0.000;

$ontext
mod_payoff.optfile=1;
mod_epsmethod.optfile=1;
file opt /"C:\Documents and Settings\user\My
Documents\gamssdir\projdir\cplex.opt"/;
put opt;
put 'mipstart 0' /
put 'mipemphasis 2' /
putclose opt;
$offtext

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

start=jnow;

* Generate payoff table applying lexicographic optimization
loop(kp,
  kk(kp)=yes;

```

```

repeat
  solve mod_payoff using mip maximizing obj;
  if (mod_payoff.modelstat<>1 and mod_payoff.modelstat<>8, abort 'no optimal
solution for mod_payoff');
  payoff(kp, kk) = z.l(kk);
  z.fx(kk) = z.l(kk); // freeze the value of the last objective optimized
  kk(k++1) = kk(k); // cycle through the objective functions
until kk(kp);
kk(kp) = no;
* release the fixed values of the objective functions for the new iteration
z.up(k) = ubobj(k);
z.lo(k) = lbobj(k);
);

display payoff;
minobj(k)=smin(kp, payoff(kp, k));
maxobj(k)=smax(kp, payoff(kp, k));

option optcr=0.000;

*$set fname p.scr
File fx / c:\gams\output\portfolio.out_RB2.txt/;
File rhsx / c:\gams\output\rhs_portfolio.out_RB2.txt /;
fx.pw=2000;

PUT fx ' PAYOFF TABLE' / ;
loop (kp,
  loop(k, put (payoff(kp, k)):12:4);
  put /;
);
put fx /;

$if not set gridpoints $set gridpoints 10

Set g grid points /1*15/
grid(k, g) grid
Parameter
  gridrhs(k, g) rhs of eps-constraint at grid point
  maxg(k) maximum point in grid for objective k
  posg(k) grid position of objective
  firstOffMax, lastZero some counters
  numk(k) ordinal value of k starting with 1
  numg(g) ordinal value of g starting with 0;
lastZero=1; loop(km1, numk(km1)=lastZero; lastZero=lastZero+1); numg(g) = ord(g)-
1;

```

```

grid(km1,g) = yes; // Here we could define different grid intervals for different
objectives
maxg(km1) = smax(grid(km1,g), numg(g)); //used if different number of grid points
are set for objective km1
gridrhs(grid(km1,g))$(dir(km1)=-1) = maxobj(km1) -
numg(g)/maxg(km1)*(maxobj(km1)- minobj(km1));
gridrhs(grid(km1,g))$(dir(km1)=1) = minobj(km1) +
numg(g)/maxg(km1)*(maxobj(km1)- minobj(km1));
display gridrhs;

* Walk the grid points and take shortcuts if the model becomes infeasible
posg(km1) = 0;
earlyex=0;
pareto_num=0;
numloop=0;
put fx ' #      Return      MAD   Stck/Portf  ';
loop(l, put fx l.tl:6); put fx /;

repeat
  numloop=numloop+1;
  rhs(km1) = sum(grid(km1,g)$(numg(g)=posg(km1)), gridrhs(km1,g));
  loop((km1,g)$(numg(g)=posg(km1)),put rhsx gridrhs(km1,g):10:4);
  solve mod_epsmethod maximizing a_objval using mip;
  if (mod_epsmethod.modelstat<>1 and mod_epsmethod.modelstat<>8, // not
optimal is in this case infeasible
    put rhsx 'INF'/;
    lastZero = 0; loop(km1$(posg(km1)>0 and lastZero=0), lastZero=numk(km1));
//find the first non-zero posg
    posg(km1)$(numk(km1)<=lastZero) = maxg(km1); // skip all solves for more
demanding values of rhs(km1)
    earlyex=earlyex+1
  else
    put rhsx /;
    pareto_num:=pareto_num+1;
    put fx pareto_num:4:0;
    loop(k, put fx (Z.l(k)):12:4);
    numstock=sum(l,B.l(l));
    put numstock:12:0, ' ';
    loop(l, put W.l(l):6:3);
  * loop(j,if (B.l(j)=1, put ord(j):4:0, ' ',X.l(j):6:3));
  put /;
  );

* Proceed forward in the grid
firstOffMax = 0;
loop(km1$(posg(km1)<maxg(km1) and firstOffMax=0), posg(km1)=posg(km1)+1;
firstOffMax=numk(km1));

```

```

posg(km1)$ (numk(km1)<firstOffMax) = 0;
until sum(km1$(posg(km1)=maxg(km1)),1)=card(km1) and firstOffMax=0;

finish=jnow;

putclose rhsx;

put fx 'Number of solves in e-constraint: ', numloop:0:0/;
put fx 'Number of early exits from the loop: ', earlyex:0:0/;
*elapsed_time=mod_payoff.resusd+mod_epsmethod.resusd;
elapsed_time=(finish-start)*86400;
put fx 'Elapsed time: ',elapsed_time:7:2, ' seconds' / ;
putclose fx; // close the point file

```

Π.2 Προβλεπόμενα κόστη με βάση το SETIS-Calculator

Scenario	Plant type	Cost of electricity [€/MWhel]	Capital expenditure [€/MWhel]	Fixed OM expenditure [€/MWhel]	Fuel expenditure [€/MWhel]	Carbon expenditure [€/MWhel]	CO2 transport and storage expenditure [€/MWhel]	Other variable OM expenditure [€/MWhel]
R E F E R E N C E	Coal PFC	58.97	19.8	6.66	17.8	13.91	0	0.8
	Nat Gas GTCC	65.27	10.97	2.9	44.77	6.63	0	0
	Nuclear Gen III (III+)	63.7	42.97	10.3	9.83	0	0	0.6
	Oil IC	133.91	12.58	4.92	104.49	11.82	0	0.1
H I G H F U E L	Wind: Onshore Farm	68.31	59.06	9.25	0	0	0	0
	Coal PFC	66.66	19.8	6.66	25.5	13.91	0	0.8
	Nat Gas GTCC	84.24	10.97	2.9	63.74	6.63	0	0
	III (III+)	67.4	42.97	10.3	13.52	0	0	0.6
H I G H C O 2	Oil IC	157.38	12.58	4.92	127.96	11.82	0	0.1
	Onshore Farm	68.31	59.06	9.25	0	0	0	0
	Coal PFC	77.1	19.8	6.7	25.5	24.4	0	1
	Nat Gas GTCC	89.22	11	2.9	63.74	11.6	0	0
H I G H C O 2	Nuclear Gen III (III+)	67.4	43	10	13.52	0	0	1
	Oil IC	166.3	12.6	4.9	128	20.7	0	0
	Wind: Onshore Farm	68.31	59.1	9.3	0	0	0	0

Π.3 Παράδειγμα παραγωγής χρονοσειρών μέσω παραγοντοποίησης Cholesky και δειγματοληψίας Monte Carlo

Target Correlation Matrix (R)

	GAS	COAL	OIL	NUCLEAR	WIND
GAS	1	0.25	0.09	0.24	0
COAL	0.25	1	-0.18	0	-0.22
OIL	0.09	-0.18	1	-0.17	-0.58
NUCLEAR	0.24	0	-0.17	1	-0.07
WIND	0	-0.22	-0.58	-0.07	1

D (diagonal with variances)

	GAS	COAL	OIL	NUCLEAR	WIND
GAS	0.105	0	0	0	0
COAL	0	0.054	0	0	0
OIL	0	0	0.242	0	0
NUCLEAR	0	0	0	0.055	0
WIND	0	0	0	0	0.08

C=DxRxD

	GAS	COAL	OIL	NUCLEAR	WIND
GAS	0.011025	0.001418	0.002287	0.001386	0
COAL	0.001418	0.002916	-0.00235	0	-0.00095
OIL	0.002287	-0.00235	0.058564	-0.00226	-0.01123
NUCLEAR	0.001386	0	-0.00226	0.003025	-0.00031
WIND	0	-0.00095	-0.01123	-0.00031	0.0064

L (5x5)

	GAS	COAL	OIL	NUCLEAR	WIND
GAS	0.105	0	0	0	0
COAL	0.014	0.052	0	0	0
OIL	0.022	-0.051	0.236	0	0
NUCLEAR	0.013	-0.003	-0.012	0.052	0
WIND	0	-0.018	-0.052	-0.019	0.055

U (5x5)

	GAS	COAL	OIL	NUCLEAR	WIND
GAS	0.105	0.014	0.022	0.013	0
COAL	0	0.052	-0.051	-0.003	-0.018
OIL	0	0	0.236	-0.012	-0.052
NUCLEAR	0	0	0	0.052	-0.019
WIND	0	0	0	0	0.055

u (5x21)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
GAS	-0.554	-0.055	-0.114	1.910	0.852	-0.404	0.715	1.035	0.519	0.682	0.519	0.440	-1.286	0.361	-1.625	0.825	0.408	-0.582	-0.264	0.773	0.828
COAL	0.772	-2.187	-0.895	-0.430	-0.705	1.005	-1.506	-0.043	1.802	0.035	0.267	-0.373	-0.319	0.515	0.396	-1.418	0.442	-0.994	-1.101	2.497	0.220
OIL	1.430	-0.074	-0.103	-0.666	1.485	-0.133	-0.100	-1.165	-0.335	-0.231	0.283	2.338	-0.781	-2.080	-0.666	1.045	-0.752	0.498	0.748	1.626	-0.937
NUCLEAR	-0.795	-0.463	-0.873	-0.124	1.654	-0.361	-0.694	-0.191	1.103	0.428	0.265	1.928	-0.759	0.758	-0.848	1.432	-0.131	0.835	1.181	-0.345	-0.958
WIND	0.446	0.441	-1.056	2.478	1.003	0.225	0.366	-0.207	1.262	1.060	-0.803	0.088	0.942	-0.398	1.268	-0.532	0.142	-0.815	0.775	-0.790	-1.276

Lxu(10x21)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
GAS	-0.058	-0.006	-0.012	0.201	0.089	-0.042	0.075	0.109	0.055	0.072	0.054	0.046	-0.135	0.038	-0.171	0.087	0.043	-0.061	-0.028	0.081	0.087
COAL	0.032	-0.114	-0.048	0.004	-0.025	0.047	-0.068	0.012	0.101	0.011	0.021	-0.013	-0.035	0.032	-0.002	-0.062	0.029	-0.060	-0.061	0.141	0.023
OIL	0.286	0.093	0.019	-0.093	0.405	-0.092	0.069	-0.250	-0.159	-0.041	0.064	0.580	-0.196	-0.509	-0.213	0.337	-0.191	0.155	0.227	0.273	-0.214
NUCLEAR	-0.068	-0.017	-0.043	0.028	0.081	-0.025	-0.021	0.018	0.063	0.034	0.016	0.079	-0.046	0.068	-0.058	0.077	0.006	0.033	0.052	-0.035	-0.028
WIND	-0.049	0.076	-0.020	0.181	-0.041	0.008	0.066	0.054	0.033	0.062	-0.069	-0.147	0.113	0.063	0.113	-0.085	0.041	-0.069	0.001	-0.166	-0.007

Π.4 Χρονοσειρές

Τιμές Καυσίμων (Πηγή: BP, ΕΙΑ)

FUEL PRICES (Πηγή BP, EIA)																							
		1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010
Technology	Units	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
1/oil	US\$/barrel	18.23	23.73	20.00	19.32	16.97	15.82	17.02	20.67	19.09	12.72	17.97	28.50	24.44	25.02	28.83	38.27	54.52	65.14	72.39	97.26	61.67	79.50
2/gas	US\$/millionBTU	2.00	2.78	3.19	2.69	2.50	2.35	2.39	2.46	2.64	2.32	1.88	2.89	3.66	3.23	4.06	4.32	5.88	7.85	8.03	11.56	8.52	8.01
3/coal	US\$/tonne	42.08	43.48	42.80	38.53	33.68	37.18	44.50	41.25	38.92	32.00	28.79	35.99	39.03	31.65	43.60	72.08	60.54	64.11	88.79	147.67	70.66	92.50
4/nuclear	US\$/lbU3O8	18.12	14.84	14.28	13.04	12.81	10.19	10.99	13.73	12.75	12.20	11.76	11.32	10.40	10.34	10.83	11.92	14.01	18.59	33.21	43.29	44.33	45.03

FUEL HPRS																						
(%)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	
1/oil	30.17	-15.69	-3.41	-12.16	-6.80	7.58	21.46	-7.62	-33.40	41.32	58.57	-14.22	2.37	15.22	32.72	42.48	19.48	11.12	34.35	-36.59	28.90	
2/gas	38.75	14.90	-15.64	-7.25	-5.72	1.72	2.81	7.30	-12.11	-19.05	53.88	26.60	-11.77	25.75	6.27	36.21	33.57	2.22	44.06	-26.28	-5.99	
3/coal	3.33	-1.56	-9.98	-12.59	10.39	19.69	-7.30	-5.65	-17.78	-10.03	25.01	8.46	-18.92	37.75	65.33	-16.01	5.90	38.49	66.33	-52.15	30.91	
4/nuclear	-18.08	-3.78	-8.69	-1.77	-20.47	7.92	24.88	-7.15	-4.28	-3.59	-3.77	-8.13	-0.60	4.78	10.07	17.55	32.63	78.69	30.36	2.40	1.57	

Κόστος λειτουργίας και συντήρησης (O&M), επένδυσης και CO₂

O&M HPRs

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
GAS	2.76	3.69	6.06	24.37	-8.13	7.43	1.98	0.72	5.50	7.21	7.20	16.81	-2.94	18.66	-5.44	0.38	-7.37	9.69	-11.61	-13.01	-1.59
COAL	5.03	1.51	-1.06	3.97	-0.65	3.07	-2.68	0.16	-0.76	-6.80	4.54	4.28	-2.89	4.78	-3.22	2.79	2.22	2.90	-6.65	-3.65	2.44
OIL	-16.67	-10.55	39.50	13.09	-29.08	-29.91	-25.17	3.15	-2.97	24.20	22.96	-2.47	-7.26	17.24	41.05	-4.26	-12.83	11.71	3.91	6.47	38.46
NUCLEAR	0.76	1.44	1.04	5.51	-8.28	9.81	7.77	-2.93	2.76	-0.64	-0.67	-10.22	9.12	4.32	0.76	-6.21	-4.66	-0.06	-2.34	-8.34	-8.75
WIND	-3.42	9.87	-9.57	-1.10	2.65	5.48	-2.28	0.47	6.73	2.51	-5.97	13.85	3.61	-2.25	-11.20	3.74	3.97	-2.93	3.83	-4.94	-9.89

Investment HPRs

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
GAS	15.47	-14.89	-17.49	-13.03	5.93	-7.70	13.81	6.19	-9.77	-24.98	-15.37	-10.36	8.31	35.76	-6.63	5.72	21.61	-18.25	19.41	-24.08	5.11
COAL	20.00	12.12	-13.80	-22.19	-9.14	-20.67	-13.39	6.67	-11.52	-27.16	-28.79	-0.15	32.83	32.59	3.96	-8.83	-25.24	-6.31	23.88	-28.99	4.93
OIL	36.39	-7.83	-32.18	-15.71	0.67	3.28	9.30	25.38	-17.11	-25.00	-22.31	15.62	26.96	27.57	-25.79	-4.52	3.05	-1.75	40.99	-12.43	3.87
NUCLEAR	8.28	2.41	-16.09	-24.60	-3.41	-7.46	-5.43	-17.40	-22.25	-37.77	-29.02	-6.07	29.02	38.48	3.77	-4.66	23.50	20.26	34.99	-14.35	10.09
WIND	9.51	0.56	-3.87	-5.28	-1.72	-7.36	-0.88	-1.93	0.24	-10.44	-6.11	-1.19	6.38	9.96	-1.37	2.04	5.72	0.85	8.10	0.90	-1.10

CO2 HPRs

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
CO2	-10.39	-36.32	16.82	-6.08	6.16	9.10	15.23	-17.18	-24.71	72.19	3.86	-47.02	15.06	-9.04	40.15	-3.78	-26.02	1.47	-10.64	-17.77	47.00