



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ  
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

---

ΣΤΟΧΑΣΤΙΚΗ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΕΠΕΝΔΥΤΙΚΩΝ ΑΠΟΦΑΣΕΩΝ  
ΗΛΕΚΤΡΟΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΚΑΙ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ  
ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

---

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

ΤΟΥ

Νικολάου Α. Τασσιού

Αθήνα, Φεβρουάριος 2016





# ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ

ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

---

## ΣΤΟΧΑΣΤΙΚΗ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΕΠΕΝΔΥΤΙΚΩΝ ΑΠΟΦΑΣΕΩΝ ΗΛΕΚΤΡΟΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΚΑΙ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

---

### ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

ΤΟΥ

Νικολάου Α. Τασιού

**Συμβουλευτική Επιτροπή:** Π. Κάπρος, Καθηγητής ΕΜΠ (επιβλέπων)  
Κ. Βουρνάς, Καθηγητής ΕΜΠ  
Σ. Κορρές, Καθηγητής ΕΜΠ

Εγκρίθηκε από την επταμελή εξεταστική επιτροπή την: 23 / 02/ 2016

.....  
Π. Κάπρος,  
Καθηγητής ΕΜΠ

.....  
Κ. Βουρνάς,  
Καθηγητής ΕΜΠ

.....  
Γ. Κορρές,  
Καθηγητής ΕΜΠ

.....  
Γ. Παπαβασιλοπουλος,  
Καθηγητής ΕΜΠ

.....  
Ε. Κακαράς,  
Καθηγητής ΕΜΠ

.....  
Σ. Παπαθανασίου,  
Αν. Καθηγητής ΕΜΠ

.....  
Π. Γεωργιάκης,  
Επικ. Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Φεβρουάριος 2016

.....  
Νικόλαος Α. Τασιός

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

Copyright © Νικόλαος Α. Τασιός, 2016

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

*Στην Οικογένειά μου*



# Πρόλογος

Η διδακτορική διατριβή εκπονήθηκε στη Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Εθνικού Μετσοβίου Πολυτεχνείου, στο εργαστήριο Ενέργειας-Οικονομίας-Περιβάλλοντος (E3MLab), το διάστημα Σεπτέμβριος 2006 – Ιανουάριος 2016.

Φτάνοντας στο τέλος αυτής της διαδρομής, που δεν είναι παρά η αρχή της επόμενης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους ανθρώπους που συνέβαλλαν με ποικίλους τρόπους στην πραγματοποίησή της.

Η διατριβή πραγματοποιήθηκε υπό την επίβλεψη, τη συνεχή παρακολούθηση και καθοδήγηση του Καθηγητή κ. Π. Κάπρου, στον οποίο θα ήθελα να εκφράσω τις πιο θερμές μου ευχαριστίες. Η συνεργασία με τον κ. Κάπρο αποτέλεσε μεγάλη εμπειρία και του χρωστώ τον τρόπο σκέψης και εργασίας, τόσο σε ακαδημαϊκό όσο και σε επαγγελματικό επίπεδο, που μου εμφύσησε. Θα ήθελα, επίσης, να ευχαριστήσω τον Καθηγητή Κ. Βουρνά και τον Καθηγητή Γ. Κορρέ που αποτέλεσαν μέλη της τριμελούς συμβουλευτικής επιτροπής.

Θα ήθελα, ακόμα, να ευχαριστήσω θερμά τον Καθηγητή Γ. Παπαβασιλόπουλο, τον Καθηγητή Ε. Κακαρά για την τιμή που μου έκαναν να είναι μέλη της πενταμελούς επιτροπής εξέτασης της διατριβής μου., καθώς και τον Αν. Καθηγητή Σ. Παπαθανασίου και τον Επικ. Καθηγητή Π. Γεωργιάκη για την τιμή που μου έκαναν να είναι μέλη της επταμελούς επιτροπής εξέτασης της παρούσης διατριβής.

Θα ήθελα τέλος να εκφράσω τις θερμότερες ευχαριστίες μου σε όλα τα μέλη του εργαστηρίου οι οποίοι συνέβαλαν με τον τρόπο τους στην επίτευξη αυτού του αποτελέσματος.

Αθήνα, Φεβρουάριος 2016,  
Νικόλαος Α. Τασιός





# Περίληψη

Οι επιχειρήσεις που δραστηριοποιούνται στον τομέα της ηλεκτροπαραγωγής αντιμετωπίζουν δύσκολες αποφάσεις σχετικά με το είδος και το μέγεθος των επενδύσεων. Η έκθεση της επιχείρησης στον ανταγωνισμό των αγορών ηλεκτρικής ενέργειας, η μεγάλη διάρκεια ζωής του σταθμού (η ανάκτηση του κεφαλαίου εξαρτάται από την λειτουργία σε αρκετά μελλοντικά έτη από την κατασκευή του σταθμού) καθώς και η μη αντιστρεψιμότητα των επενδύσεων συντελούν στην άποψη ότι η πλήρης ανάκτηση του επενδυμένου κεφαλαιουχικού κόστους είναι αβέβαιη. Επιπλέον, η επιχείρηση αντιμετωπίζει αβεβαιότητες που σχετίζονται με την περιβαλλοντική πολιτική, με τη ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας και τις διεθνείς τιμές των καυσίμων.

Συνεπώς καθίσταται αναγκαία η έρευνα με στόχο την προσαρμογή και επέκταση των μαθηματικών εργαλείων βελτιστοποίησης που συμβατικά χρησιμοποιούνται για τη μελέτη σκοπιμότητας και προγραμματισμού επενδύσεων στην ηλεκτροπαραγωγή. Οι συμβατικές μεθοδολογίες των εργαλείων αυτών παρουσιάζουν έλλειμμα τόσο στην αναπαράσταση και διαχείριση της αβεβαιότητας εντός της βελτιστοποίησης, όσο και στα κριτήρια απόφασης με βάση τα οποία καθοδηγείται η μαθηματική βελτιστοποίηση, καθώς επίσης και αναπαράστασης αυτών σε συνθήκες ολιγοπωλιακού ανταγωνισμού.

Το αντικείμενο της παρούσας διατριβής αφορά τη στοχαστική μοντελοποίηση των επενδυτικών αποφάσεων ηλεκτροπαραγωγής και την προσομοίωση σε μαθηματικό υπόδειγμα της ανάπτυξης συστήματος, προτείνοντας και δοκιμάζοντας αριθμητικά εμπειρικές μεθοδολογίες μοντελοποίησης της αβεβαιότητας και των επιχειρηματικών αποφάσεων με έντονη αποφυγή κινδύνου στο πλαίσιο ατελούς ανταγωνισμού.

Αρχικά, γίνεται κωδικοποίηση του πλήρους υποδείγματος βέλτιστης ανάπτυξης συστήματος και λειτουργίας ηλεκτρικού συστήματος σε μακροχρόνιο ορίζοντα, ακολουθώντας το αιτιοκρατικό πρότυπο. Στη συνέχεια, γίνεται κωδικοποίηση και ενσωμάτωση των αβεβαιοτήτων που αφορούν σε πολλούς παράγοντες, όπως το κόστος αγοράς καυσίμων και το κόστος αγοράς δικαιωμάτων εκπομπών CO<sub>2</sub>, και εξελίσσονται με το χρόνο. Έγινε η υπόθεση ότι τα στοχαστικά μεγέθη ακολουθούν γνωστές κατανομές.

Ακολουθως, κωδικοποιήθηκε μεγάλο εύρος των τυποποιημένων συμπεριφορών απόφασης υπό συνθήκες κινδύνου και αβεβαιότητας. Η κωδικοποίηση και η εμπειρική δοκιμή πολλών εναλλακτικών προτύπων απόφασης υπό συνθήκες αβεβαιότητας στο πλαίσιο του ηλεκτρικού συστήματος και της αγοράς, επέτρεψε στην έρευνα να προτείνει αξιολόγηση των προτύπων αυτών σχετικά με την καταλληλότητά τους στην αναπαράσταση των επενδυτικών αποφάσεων υπό διάφορους τύπους συμπεριφορών αποφυγής κινδύνου και ιδιαίτερα όταν η συμπεριφορά επιδιώκει περιορισμό της ζημίας παρά μεγιστοποίηση του κέρδους. Ειδικότερα κωδικοποιήθηκαν συμπεριφορές ουδέτερες στον κίνδυνο όπως είναι τα υποδείγματα που χρησιμοποιούν την μέση τιμή. Κωδικοποιήθηκαν συμπεριφορές που λαμβάνουν υπόψιν την μέση τιμή και την διακύμανση του προς βελτιστοποίηση μεγέθους (προσέγγιση Markowitz) καθώς και συμπεριφορές που εξασφαλίζουν «ανοσία» (immunity) σε όλα τα δυνατά ενδεχόμενα.

Επιπλέον, η έρευνα υλοποίησε αριθμητικά μοντέλα μεγάλου μεγέθους με εφαρμογή στις χώρες της ΕΕ και ορίζοντα το 2050. Η εμπειρική μελέτη χρησιμοποίησε πολλές παραλλαγές των μοντέλων που αναπτύχθηκαν στη διατριβή με τρόπο ώστε να μελετηθεί η ευαισθησία των αποτελεσμάτων (επενδύσεων ηλεκτροπαραγωγής) για διάφορες χώρες υπό διαφορετικές συνθήκες ανταγωνισμού στην αγορά, αβεβαιοτήτων και τύπων απόφασης εξαρτώμενης από διαφορετικές συμπεριφορές έναντι του κινδύνου. Η έρευνα μελέτησε συγκριτικά τα αποτελέσματα όλων των παραλλαγών του μοντέλου και των περιπτώσεων εφαρμογής με σκοπό να επιβεβαιώσει και αριθμητικά τη συσχέτιση του τρόπου μαθηματικής κωδικοποίησης των επενδυτικών αποφάσεων υπό διάφορες συνθήκες αβεβαιότητας με το εύρος των τυποποιημένων συμπεριφορών έναντι του κινδύνου. Η εμπειρική αυτή ανάλυση δικαιολογεί τα συμπεράσματα που εξάγονται σχετικά με την καταλληλότητα καθεμίας μαθηματικής κωδικοποίησης εν σχέση με τους τύπους συμπεριφοράς.

## Πίνακας Περιεχομένων

1	Παρουσίαση Ερευνητικού Προβλήματος - Εισαγωγή.....	27
1.1	Εισαγωγή.....	27
1.2	Σκοπός της διατριβής.....	31
1.3	Δομή της διατριβής.....	37
1.4	Πρωτοτυπία – Συνεισφορά διατριβής.....	39
1.5	Μελλοντικές προοπτικές.....	40
2	Βιβλιογραφία - Ιστορική αναδρομή .....	43
2.1	Σύντομο ιστορικό .....	43
2.1.1	Μέθοδοι αξιολόγησης κινδύνου .....	43
2.1.2	Περίοδοι επίλυσης των υποδειγμάτων .....	49
2.1.3	Κατηγορίες υποδειγμάτων αναπαράστασης ενεργειακού συστήματος ...	50
3	Μαθηματική εισαγωγή.....	57
3.1	Στοχαστικές μεταβλητές .....	57
3.2	Στοχαστικές ανελίξεις.....	57
3.2.1	Ιδιότητα Martingale στοχαστικής ανελίξης.....	58
3.2.2	Κίνηση Brown.....	59
3.2.3	Γεωμετρική Κίνηση Brown (Geometric Brownian Motion – GBM).....	60
3.3	Παραγωγή αντιπροσωπευτικών δειγμάτων των πιθανοτικών παραμέτρων με χρήση κανονικών κατανομών.....	60
3.4	Παραγωγή αντιπροσωπευτικών δειγμάτων των πιθανοτικών παραμέτρων με χρήση στοχαστικών ανελίξεων .....	64
3.5	Μετασχηματισμός προβλημάτων σε μορφή μεικτής συμπληρωματικότητας - Η έννοια της συμπληρωματικότητας.....	67
4	Αιτιοκρατικό υπόδειγμα αναπαράστασης ηλεκτρικού τομέα.....	71
4.1	Εισαγωγή.....	71
4.2	Συμβολισμοί.....	75
4.2.1	Σύνολα .....	75
4.2.2	Παράμετροι.....	76
4.2.3	Μεταβλητές του προβλήματος .....	79

4.3	Το Μοντέλο Κατανομής Μονάδων .....	80
4.3.1	Χρονική διακύμανση φορτίου και άλλων παραμέτρων.....	81
4.3.2	Χειρισμός των χρονικών περιόδων στην επίλυση του μοντέλου .....	83
4.3.3	Περιορισμοί δυναμικότητας μονάδων ηλεκτροπαραγωγής.....	84
4.3.4	Περιορισμοί διαθεσιμότητας ενεργειακών πόρων .....	86
4.3.5	Περιορισμοί για μονάδες συμπαραγωγής .....	87
4.3.6	Περιορισμοί για μονάδες αντλησιοταμίευσης και συστήματα αποθήκευσης 89	
4.3.7	Περιορισμοί κυκλικής λειτουργίας ηλεκτροπαραγωγικών μονάδων .....	90
4.3.8	Περιορισμοί λειτουργίας συστήματος .....	91
4.3.9	Γενικοί περιορισμοί .....	92
4.3.10	Υπόδειγμα Ηλεκτρικού Δικτύου .....	93
4.3.11	Αντικειμενική συνάρτηση – Διαχρονική συνάρτηση κέρδους από την παραγωγή και προσφορά ηλεκτρισμού .....	103
4.3.12	Ύπαρξη και μοναδικότητα λύσης.....	107
4.4	Μοντελοποίηση ατελούς ανταγωνισμού – ισορροπία κατά Nash-Cournot...	108
4.4.1	Μακροχρόνιος βέλτιστος αριθμός συμμετρικών επιχειρήσεων λειτουργίας στην αγορά.....	112
5	Εισαγωγή αβεβαιοτήτων .....	115
5.1	Παράγοντες αβεβαιότητας .....	115
6	Λήψη Απόφασης σε περιβάλλον με αβεβαιότητα.....	119
6.1	Ορισμοί.....	119
6.2	Συνάρτηση χρησιμότητας και κανόνας αναμενόμενης χρησιμότητας .....	121
6.2.1	Συνάρτηση χρησιμότητας επί των ενδεχομένων .....	124
6.3	Αποστροφή κινδύνου.....	127
6.4	Μετρικές εκτίμησης συμπεριφοράς αποφασίζοντα σε σχέση με τον κίνδυνο 128	
6.5	Στοχαστική επικράτηση .....	129
7	Αξιολόγηση της πιθανοτικής κατανομής της αντικειμενικής συνάρτησης με χρήση της μεθόδου αναμενόμενης τιμής της κατανομής (Expected Value) .....	131
7.1	Εισαγωγή.....	131

7.2	Ανάπτυξη του μαθηματικού υποδείγματος αναμενόμενης τιμής .....	133
7.3	Ισοδυναμία στοχαστικής βελτιστοποίησης με χρήση μέσης τιμής με αντίστοιχο αιτιοκρατικό.....	136
7.4	Αγορά υπό καθεστώς ατελούς ανταγωνισμού.....	138
8	Αξιολόγηση της πιθανοτικής κατανομής της αντικειμενικής συνάρτησης με χρήση της προσέγγισης του Markowitz .....	139
8.1	Εισαγωγή.....	139
8.2	Ανάπτυξη του μαθηματικού υποδείγματος βέλτιστης ανάπτυξης και λειτουργίας ηλεκτρικού τομέα σύμφωνα με την προσέγγιση Markowitz για την αντιμετώπιση της αβεβαιότητας.....	143
8.2.1	Ύπαρξη και μοναδικότητα λύσης.....	146
8.3	Μοντελοποίηση ατελούς ανταγωνισμού – ισορροπία κατά Nash-Cournot στο υπόδειγμα αντιμετώπισης της αβεβαιότητας σύμφωνα με την προσέγγιση Markowitz	149
8.3.1	Επίδραση της αβεβαιότητας στην βέλτιστη λύση του ατελούς ανταγωνισμού ισορροπία κατά Nash-Cournot στο πρόβλημα σύμφωνα με την προσέγγιση Markowitz .....	151
9	Αξιολόγηση της πιθανοτικής κατανομής της αντικειμενικής συνάρτησης με χρήση της μεθόδου μεγιστοποίησης της πιθανότητας αποφυγής ζημίας (Avoidance of Failure) .....	155
9.1	Εισαγωγή.....	155
9.2	Υπόδειγμα προβλήματος αξιολόγησης κινδύνου με τη μέθοδο της μεγιστοποίησης της πιθανότητας αποφυγής ζημίας.....	157
9.3	Εύρεση αιτιοκρατικού ισοδύναμου υποδείγματος.....	158
9.4	Ανάπτυξη του πιθανοτικού υποδείγματος.....	160
9.4.1	Ύπαρξη και μοναδικότητα λύσης.....	162
9.5	Ανάπτυξη του αιτιοκρατικού ισοδύναμου υποδείγματος .....	164
9.6	Σύγκριση βέλτιστης λύσης της μεθόδου αξιολόγησης της πιθανοτικής κατανομής της αντικειμενικής συνάρτησης με χρήση της προσέγγισης του Markowitz με τη βέλτιστη λύση της μεθόδου μεγιστοποίησης της πιθανότητας αποφυγής ζημίας	167
9.7	Μοντελοποίηση ατελούς ανταγωνισμού στο υπόδειγμα μεγιστοποίησης αποφυγής ζημίας – ισορροπία κατά Nash-Cournot.....	169

9.7.1	Επίδραση της αβεβαιότητας στην βέλτιστη λύση του ατελούς ανταγωνισμού ισορροπία κατά Nash-Cournot στο πρόβλημα μεγιστοποίησης πιθανότητας αποφυγής ζημίας .....	173
10	Αξιολόγηση της πιθανοτικής κατανομής της αντικειμενικής συνάρτησης με χρήση της μεθόδου Αξίας σε Κίνδυνο (Value at Risk – VaR) με κατώφλι πιθανότητας $\alpha$ .....	175
10.1	Εισαγωγή .....	176
10.2	Ανάπτυξη του πιθανοτικού υποδείγματος .....	177
10.3	Ανάπτυξη του αιτιοκρατικού ισοδύναμου υποδείγματος.....	177
10.4	Σύγκριση των μεθόδων αξιολόγησης κινδύνου με χρήση της Αξίας σε Κίνδυνο και με χρήση της προσέγγισης του Markowitz .....	180
10.5	Ύπαρξη και μοναδικότητα λύσης .....	180
10.6	Πλεονεκτήματα – μειονεκτήματα της μεθοδολογίας υπολογισμού της Αξίας σε Κίνδυνο.....	181
10.6.1	Πλεονεκτήματα.....	181
10.6.2	Μειονεκτήματα.....	181
10.7	Αξιολόγηση της πιθανοτικής κατανομής της αντικειμενικής συνάρτησης με χρήση της μεθόδου της Αναμενόμενης Αξίας σε Κίνδυνο (Conditional Value at Risk – CvaR) με κατώφλι πιθανότητας $\alpha$ .....	182
10.7.1	Ανάπτυξη του πιθανοτικού υποδείγματος.....	184
10.7.2	Ανάπτυξη του αιτιοκρατικού ισοδύναμου υποδείγματος.....	184
10.7.3	Σύγκριση των μεθόδων αξιολόγησης κινδύνου με χρήση της Αναμενόμενης Αξίας σε Κίνδυνο και με χρήση της προσέγγισης του Markowitz.....	185
10.8	Σύγκριση μεθοδολογίας αξιολόγησης κινδύνου με χρήση της Αναμενόμενης Αξίας σε Κίνδυνο και με χρήση της Αξίας σε Κίνδυνο .....	186
11	Αξιολόγηση επενδύσεων με χρήση της μεθοδολογίας των δικαιωμάτων προαίρεσης (real option theory).....	187
11.1	Εισαγωγή .....	187
11.2	Αξιολόγηση των επενδύσεων με τη χρήση δικαιωμάτων προαίρεσης (Real Options Approach).....	188
11.3	Ανάπτυξη του υποδείγματος αξιολόγησης των επενδύσεων με τη μέθοδο των δικαιωμάτων προαίρεσης .....	195

11.3.1	Ετησιοποίηση κεφαλαιουχικού κόστους .....	198
11.4	Ανάπτυξη υποδείγματος ενεργειακού σχεδιασμού με αξιολόγηση των επενδύσεων με τη χρήση δικαιωμάτων προαίρεσης (Real Options Approach).....	199
11.5	Μοντελοποίηση ατελούς ανταγωνισμού – ισορροπία κατά Nash-Cournot	205
12	Ανάπτυξη υποδείγματος πολλών σταδίων αβεβαιότητας για την αναπαράσταση του ηλεκτρικού τομέα .....	213
12.1	Προβλήματα n – σταδίων.....	215
12.1.1	Παραγωγή πιθανοτικών κατανομών σύμφωνα με τις βασικές αρχές της στατιστικής κατά Bayes (Bayesian statistics).....	218
12.2	Ανάπτυξη του πιθανοτικού υποδείγματος .....	219
12.3	Ανάλυση υποδείγματος πολλών σταδίων αβεβαιότητας.....	225
13	Παρουσίαση αποτελεσμάτων .....	227
13.1	Εισαγωγή .....	227
13.2	Αποτελέσματα επίλυσης υποδείγματος που αναπαριστά τον ηλεκτρικό τομέα της Ελλάδας .....	229
13.2.1	Αιτιοκρατικό υπόδειγμα .....	229
13.2.2	Σενάρια μοντελοποίησης της αβεβαιότητας .....	233
13.2.3	Σενάριο πολύ μεγάλης αβεβαιότητας.....	244
13.2.4	Υπόδειγμα δύο σταδίων .....	247
13.3	Αποτελέσματα επίλυσης υποδείγματος που αναπαριστά τον ηλεκτρικό τομέα της Πολωνίας .....	248
13.3.1	Αιτιοκρατικό υπόδειγμα .....	248
13.3.2	Σενάρια μοντελοποίησης της αβεβαιότητας .....	251
13.3.3	Σενάριο πολύ μεγάλης αβεβαιότητας.....	263
13.3.4	Υπόδειγμα δύο σταδίων .....	267
13.4	Αποτελέσματα επίλυσης υποδείγματος που αναπαριστά τον ηλεκτρικό τομέα της Γερμανίας .....	268
13.4.1	Αιτιοκρατικό υπόδειγμα .....	268
13.4.2	Σενάρια μοντελοποίησης της αβεβαιότητας .....	270
13.4.3	Σενάριο πολύ μεγάλης αβεβαιότητας.....	274
13.4.4	Υπόδειγμα δύο σταδίων .....	277

13.5	Αποτελέσματα επίλυσης υποδείγματος που αναπαριστά τον ηλεκτρικό τομέα της Ισπανίας.....	279
13.5.1	Αιτιοκρατικό υπόδειγμα.....	279
13.5.2	Σενάρια μοντελοποίησης της αβεβαιότητας.....	280
13.5.3	Σενάριο πολύ μεγάλης αβεβαιότητας.....	287
13.5.4	Υπόδειγμα δύο σταδίων.....	290
13.6	Αποτελέσματα επίλυσης υποδείγματος που αναπαριστά τον ηλεκτρικό τομέα της Ιταλίας.....	291
13.6.1	Αιτιοκρατικό υπόδειγμα.....	291
13.6.2	Σενάρια μοντελοποίησης της αβεβαιότητας.....	292
13.6.3	Σενάριο πολύ μεγάλης αβεβαιότητας.....	299
13.6.4	Υπόδειγμα δύο σταδίων.....	302
14	Σύνοψη – Συμπεράσματα.....	305
15	Βιβλιογραφία.....	317







## Κατάλογος σχημάτων

Γράφημα 1: Καμπύλη παραγωγής ηλεκτρισμού – ατμού ίσης κατανάλωσης καυσίμου μονάδας συμπαραγωγής.....	87
Γράφημα 2: Χώρος εφικτών λύσεων του πιθανοτικού περιορισμού.....	147
Γράφημα 3: Μορφές της κανονικής κατανομής με διαφορετική μέση τιμή και τυπική απόκλιση.....	159
Γράφημα 4: Γραφική απεικόνιση της Αξίας σε Κίνδυνο ( $VaR\alpha$ ) με κατώφλι πιθανότητας $\alpha$ ενός πιθανοτικού μεγέθους που ακολουθεί κανονική κατανομή.....	176
Γράφημα 5: Δύο κατανομές με ίδια Αξία σε Κίνδυνο με κατώφλι πιθανότητας $\alpha$ ( $VaR\alpha$ ).....	181
Γράφημα 6: Χαρτοφυλάκιο κόστους, η Αξία σε Κίνδυνο και η CVaR (Sarykalin, Serraino, & Uryasev, 2008).....	183
Γράφημα 7: Παραγόμενη ενέργεια σε GWh ανά κατηγορίες σταθμών ηλεκτροπαραγωγής όπως προέκυψε από την επίλυση του αιτιοκρατικού υποδείγματος αγοράς που αναπαριστά τον ηλεκτρικό τομέα της Ελλάδας στον οποίο δραστηριοποιείται επιχείρηση υπό καθεστώς τέλειου ανταγωνισμού.....	229
Γράφημα 8: Εγκατεστημένη ισχύς σε GW ανά κατηγορίες σταθμών ηλεκτροπαραγωγής όπως προέκυψε από την επίλυση του αιτιοκρατικού υποδείγματος αγοράς που αναπαριστά τον ηλεκτρικό τομέα της Ελλάδας στον οποίο δραστηριοποιείται επιχείρηση υπό καθεστώς τέλειου ανταγωνισμού.....	230
Γράφημα 9: Εγκατεστημένη ισχύς σε GW ανά κατηγορίες σταθμών ηλεκτροπαραγωγής όπως προέκυψε από την επίλυση του αιτιοκρατικού υποδείγματος αγοράς που αναπαριστά τον ηλεκτρικό τομέα της Ελλάδας στον οποίο δραστηριοποιείται επιχείρηση υπό καθεστώς ατελούς ανταγωνισμού.....	231
Γράφημα 10: Παραγόμενη ενέργεια σε GWh ανά κατηγορίες σταθμών ηλεκτροπαραγωγής όπως προέκυψε από την επίλυση του αιτιοκρατικού υποδείγματος αγοράς που αναπαριστά τον ηλεκτρικό τομέα της Ελλάδας στον οποίο δραστηριοποιείται επιχείρηση υπό καθεστώς ατελούς ανταγωνισμού.....	232
Γράφημα 11: Παραγόμενη ενέργεια σε GWh από σταθμούς στερεών καυσίμων όπως προέκυψε από την επίλυση του υποδείγματος μεγιστοποίησης της πιθανότητας αποφυγής ζημίας για την αγορά που αναπαριστά τον ηλεκτρικό τομέα της Ελλάδας.....	234
Γράφημα 12: Παραγόμενη ενέργεια σε GWh από σταθμούς αερίων καυσίμων όπως προέκυψε από την επίλυση του υποδείγματος μεγιστοποίησης της πιθανότητας αποφυγής ζημίας για την αγορά που αναπαριστά τον ηλεκτρικό τομέα της Ελλάδας.....	235

Γράφημα 13: Παραγόμενη ενέργεια σε GWh από σταθμούς αερίων καυσίμων όπως προέκυψε από την επίλυση του υποδείγματος μεγιστοποίησης της πιθανότητας αποφυγής ζημίας για την αγορά που αναπαριστά τον ηλεκτρικό τομέα της Ελλάδας στον οποίο δραστηριοποιείται επιχείρηση υπό καθεστώς ατελούς ανταγωνισμού .....	237
Γράφημα 14: Παραγόμενη ενέργεια σε GWh από σταθμούς στερεών καυσίμων όπως προέκυψε από την επίλυση του υποδείγματος με χρήση της προσέγγισης του Markowitz για την αγορά που αναπαριστά τον ηλεκτρικό τομέα της Ελλάδας .....	238
Γράφημα 15: Παραγόμενη ενέργεια σε GWh από σταθμούς αερίων καυσίμων όπως προέκυψε από την επίλυση του υποδείγματος με χρήση της προσέγγισης του Markowitz για την αγορά που αναπαριστά τον ηλεκτρικό τομέα της Ελλάδας .....	239
Γράφημα 17: Εγκατεστημένη ισχύς σε GW ανά κατηγορίες σταθμών ηλεκτροπαραγωγής όπως προέκυψε από την επίλυση του υποδείγματος δύο σταδίων για την αγορά που αναπαριστά τον ηλεκτρικό τομέα της Ελλάδας .....	248
Γράφημα 18: Παραγόμενη ενέργεια σε GWh ανά κατηγορίες σταθμών ηλεκτροπαραγωγής όπως προέκυψε από την επίλυση του αιτιοκρατικού υποδείγματος αγοράς που αναπαριστά τον ηλεκτρικό τομέα της Πολωνίας στον οποίο δραστηριοποιείται επιχείρηση υπό καθεστώς τέλειου ανταγωνισμού .....	249
Γράφημα 19: Εγκατεστημένη ισχύς σε GW ανά κατηγορίες σταθμών ηλεκτροπαραγωγής όπως προέκυψε από την επίλυση του αιτιοκρατικού υποδείγματος αγοράς που αναπαριστά τον ηλεκτρικό τομέα της Πολωνίας στον οποίο δραστηριοποιείται επιχείρηση υπό καθεστώς τέλειου ανταγωνισμού .....	250
Γράφημα 20: Εγκατεστημένη ισχύς σε GW ανά κατηγορίες σταθμών ηλεκτροπαραγωγής όπως προέκυψε από την επίλυση του αιτιοκρατικού υποδείγματος αγοράς που αναπαριστά τον ηλεκτρικό τομέα της Πολωνίας στον οποίο δραστηριοποιείται επιχείρηση υπό καθεστώς ατελούς ανταγωνισμού .....	251
Γράφημα 21: Παραγόμενη ενέργεια σε GWh από σταθμούς στερεών καυσίμων όπως προέκυψε από την επίλυση του υποδείγματος μεγιστοποίησης της πιθανότητας αποφυγής ζημίας για την αγορά που αναπαριστά τον ηλεκτρικό τομέα της Πολωνίας στον οποίο δραστηριοποιείται επιχείρηση υπό καθεστώς τέλειου ανταγωνισμού .....	252
Γράφημα 22: Παραγόμενη ενέργεια σε GWh από σταθμούς αερίων καυσίμων όπως προέκυψε από την επίλυση του υποδείγματος μεγιστοποίησης της πιθανότητας αποφυγής ζημίας για την αγορά που αναπαριστά τον ηλεκτρικό τομέα της Πολωνίας .....	253
Γράφημα 23: Παραγόμενη ενέργεια σε GWh από σταθμούς ΑΠΕ όπως προέκυψε από την επίλυση του υποδείγματος μεγιστοποίησης της πιθανότητας αποφυγής ζημίας για την αγορά που αναπαριστά τον ηλεκτρικό τομέα της Πολωνίας στον οποίο δραστηριοποιείται επιχείρηση υπό καθεστώς τέλειου ανταγωνισμού .....	254
Γράφημα 24: Παραγόμενη ενέργεια σε GWh από σταθμούς αερίων καυσίμων όπως προέκυψε από την επίλυση του υποδείγματος μεγιστοποίησης της πιθανότητας αποφυγής ζημίας για την αγορά που αναπαριστά τον ηλεκτρικό τομέα της Πολωνίας στον οποίο δραστηριοποιείται επιχείρηση υπό καθεστώς ατελούς ανταγωνισμού .....	256
Γράφημα 25: Παραγόμενη ενέργεια σε GWh από σταθμούς στερεών καυσίμων όπως προέκυψε από την επίλυση του υποδείγματος με χρήση της προσέγγισης του Markowitz για την αγορά που αναπαριστά τον ηλεκτρικό τομέα της Πολωνίας .....	258

- Γράφημα 26: Εγκατεστημένη ισχύς σε GW ανά κατηγορίες σταθμών ηλεκτροπαραγωγής όπως προέκυψε από την επίλυση του υποδείγματος με τη μέθοδο δικαιωμάτων προαίρεσης στο σενάριο χαμηλής αβεβαιότητας για τις τιμές άνθρακα, φυσικού αερίου και μεγάλης αβεβαιότητας για τις τιμές δικαιωμάτων εκπομπών για την αγορά που αναπαριστά τον ηλεκτρικό τομέα της Πολωνίας ..... 262
- Γράφημα 27: Παραγόμενη ενέργεια σε GWh ανά τύπο σταθμού όπως προέκυψε από την επίλυση του υποδείγματος με τη μέθοδο δικαιωμάτων προαίρεσης στο σενάριο μεγάλης αβεβαιότητας για τις τιμές άνθρακα, φυσικού αερίου και δικαιωμάτων εκπομπών για την αγορά που αναπαριστά τον ηλεκτρικό τομέα της Πολωνίας ..... 263
- Γράφημα 28: Εγκατεστημένη ισχύς σε GW ανά τύπο σταθμού όπως προέκυψε από την επίλυση του υποδείγματος δύο σταδίων για την αγορά που αναπαριστά τον ηλεκτρικό τομέα της Πολωνίας .... 268
- Γράφημα 29: Παραγόμενη ενέργεια σε GWh ανά κατηγορίες σταθμών ηλεκτροπαραγωγής όπως προέκυψε από την επίλυση του αιτιοκρατικού υποδείγματος αγοράς που αναπαριστά τον ηλεκτρικό τομέα της Γερμανίας στον οποίο δραστηριοποιείται επιχείρηση υπό καθεστώς τέλειου ανταγωνισμού ..... 269
- Γράφημα 30: Εγκατεστημένη ισχύς σε GW ανά κατηγορίες σταθμών ηλεκτροπαραγωγής όπως προέκυψε από την επίλυση του αιτιοκρατικού υποδείγματος αγοράς που αναπαριστά τον ηλεκτρικό τομέα της Γερμανίας στον οποίο δραστηριοποιείται επιχείρηση υπό καθεστώς τέλειου ανταγωνισμού ..... 269
- Γράφημα 31: Παραγόμενη ενέργεια σε GWh από σταθμούς στερεών καυσίμων όπως προέκυψε από την επίλυση του υποδείγματος μεγιστοποίησης της πιθανότητας αποφυγής ζημίας για την αγορά που αναπαριστά τον ηλεκτρικό τομέα της Γερμανίας ..... 271
- Γράφημα 32: Εγκατεστημένη ισχύς σε GW σταθμών αερίων καυσίμων όπως προέκυψε από την επίλυση των υποδειγμάτων στο σενάριο χαμηλής αβεβαιότητας για τις τιμές άνθρακα, φυσικού αερίου και μεγάλης αβεβαιότητας για τις τιμές δικαιωμάτων εκπομπών για την αγορά που αναπαριστά τον ηλεκτρικό τομέα της Γερμανίας ..... 273
- Γράφημα 33: Παραγόμενη ενέργεια σε GWh ανά κατηγορίες σταθμών ηλεκτροπαραγωγής όπως προέκυψε από την επίλυση του αιτιοκρατικού υποδείγματος αγοράς που αναπαριστά τον ηλεκτρικό τομέα της Ισπανίας στον οποίο δραστηριοποιείται επιχείρηση υπό καθεστώς τέλειου ανταγωνισμού ..... 279
- Γράφημα 34: Εγκατεστημένη ισχύς σε GW ανά κατηγορίες σταθμών ηλεκτροπαραγωγής όπως προέκυψε από την επίλυση του αιτιοκρατικού υποδείγματος αγοράς που αναπαριστά τον ηλεκτρικό τομέα της Ισπανίας στον οποίο δραστηριοποιείται επιχείρηση υπό καθεστώς τέλειου ανταγωνισμού ..... 280
- Γράφημα 35: Εγκατεστημένη ισχύς σε GW των σταθμών αερίων καυσίμων όπως προέκυψε από την επίλυση των υποδειγμάτων στο σενάριο χαμηλής αβεβαιότητας για τις τιμές άνθρακα, φυσικού αερίου και μεγάλης αβεβαιότητας για τις τιμές δικαιωμάτων εκπομπών για την αγορά που αναπαριστά τον ηλεκτρικό τομέα της Ισπανίας ..... 281
- Γράφημα 36: Παραγόμενη ενέργεια σε GWh ανά κατηγορίες σταθμών ηλεκτροπαραγωγής όπως προέκυψε από την επίλυση του υποδείγματος μεγιστοποίησης της πιθανότητας αποφυγής ζημίας για την αγορά που αναπαριστά τον ηλεκτρικό τομέα της Ισπανίας στον οποίο δραστηριοποιείται επιχείρηση υπό καθεστώς τέλειου ανταγωνισμού ..... 282

- Γράφημα 37: Παραγόμενη ενέργεια σε GWh από σταθμούς αερίων καυσίμων όπως προέκυψε από την επίλυση του υποδείγματος με χρήση της προσέγγισης του Markowitz για την αγορά που αναπαριστά τον ηλεκτρικό τομέα της Ισπανίας..... 284
- Γράφημα 38: Παραγόμενη ενέργεια σε GWh ανά τύπο σταθμού όπως προέκυψε από την επίλυση του υποδείγματος με χρήση της αξίας σε κίνδυνο στο οποίο προσομοιώνεται αγορά που αναπαριστά τον ηλεκτρικό τομέα της Ισπανίας στον οποίο δραστηριοποιείται επιχείρηση υπό καθεστώς τέλειου ανταγωνισμού ..... 285
- Γράφημα 39: Εγκατεστημένη ισχύς σε GW ανά τύπο σταθμού όπως προέκυψε από την επίλυση του υποδείγματος αξιολόγησης των επενδύσεων με τη μέθοδο των δικαιωμάτων προαίρεσης στο σενάριο χαμηλής αβεβαιότητας για τις τιμές άνθρακα, φυσικού αερίου και αγοράς δικαιωμάτων εκπομπών για την αγορά που αναπαριστά τον ηλεκτρικό τομέα της Ισπανίας στον οποίο δραστηριοποιείται επιχείρηση υπό καθεστώς τέλειου ανταγωνισμού..... 287
- Γράφημα 40: Παραγόμενη ενέργεια σε GWh ανά τύπο σταθμού όπως προέκυψε από την επίλυση του αιτιοκρατικού υποδείγματος αγοράς που αναπαριστά τον ηλεκτρικό τομέα της Ιταλίας στον οποίο δραστηριοποιείται επιχείρηση υπό καθεστώς τέλειου ανταγωνισμού ..... 291
- Γράφημα 41: Εγκατεστημένη ισχύς σε GW ανά τύπο σταθμού όπως προέκυψε από την επίλυση του αιτιοκρατικού υποδείγματος αγοράς που αναπαριστά τον ηλεκτρικό τομέα της Ιταλίας στον οποίο δραστηριοποιείται επιχείρηση υπό καθεστώς τέλειου ανταγωνισμού ..... 292
- Γράφημα 42: Παραγόμενη ενέργεια σε GWh από σταθμούς αερίων καυσίμων όπως προέκυψε από την επίλυση του υποδείγματος μεγιστοποίησης της πιθανότητας αποφυγής ζημίας για την αγορά που αναπαριστά τον ηλεκτρικό τομέα της Ιταλίας ..... 293
- Γράφημα 43: Παραγόμενη ενέργεια σε GWh ανά τύπο σταθμού όπως προέκυψε από την επίλυση του υποδείγματος με χρήση της προσέγγισης Markowitz στο σενάριο χαμηλής αβεβαιότητας για τις τιμές άνθρακα, φυσικού αερίου και μεγάλης αβεβαιότητας για τις τιμές δικαιωμάτων εκπομπών για την αγορά που αναπαριστά τον ηλεκτρικό τομέα της Ιταλίας στον οποίο δραστηριοποιείται επιχείρηση υπό καθεστώς τέλειου ανταγωνισμού ..... 295
- Γράφημα 44: Εγκατεστημένη ισχύς σε GW ανά τύπο σταθμού όπως προέκυψε από την επίλυση του υποδείγματος με χρήση της προσέγγισης Markowitz στο σενάριο χαμηλής αβεβαιότητας για τις τιμές άνθρακα και μεγάλης αβεβαιότητας για τις τιμές φυσικού αερίου και αγοράς δικαιωμάτων εκπομπών για την αγορά που αναπαριστά τον ηλεκτρικό τομέα της Ιταλίας στον οποίο δραστηριοποιείται επιχείρηση υπό καθεστώς τέλειου ανταγωνισμού..... 296
- Γράφημα 45: Παραγόμενη ενέργεια σε GWh ανά τύπο σταθμού όπως προέκυψε από την επίλυση του υποδείγματος με χρήση της αξίας σε κίνδυνο στο σενάριο χαμηλής αβεβαιότητας για τις τιμές άνθρακα, φυσικού αερίου και μεγάλης αβεβαιότητας για τις τιμές δικαιωμάτων εκπομπών για την αγορά που αναπαριστά τον ηλεκτρικό τομέα της Ιταλίας στον οποίο δραστηριοποιείται επιχείρηση υπό καθεστώς τέλειου ανταγωνισμού ..... 297
- Γράφημα 46: Εγκατεστημένη ισχύς σε GW ανά τύπο σταθμού όπως προέκυψε από την επίλυση του υποδείγματος αξιολόγησης των επενδύσεων με τη μέθοδο των δικαιωμάτων προαίρεσης στο σενάριο χαμηλής αβεβαιότητας για τις τιμές άνθρακα και αγοράς δικαιωμάτων εκπομπών και μεγάλης αβεβαιότητας για τις τιμές φυσικού αερίου για την αγορά που αναπαριστά τον ηλεκτρικό τομέα της Ιταλίας στον οποίο δραστηριοποιείται επιχείρηση υπό καθεστώς τέλειου ανταγωνισμού ..... 298

## Κατάλογος πινάκων

Πίνακας 3-1: Εποπτική απεικόνιση των συσχετίσεων μεταξύ των στοχαστικών μεγεθών για δύο διαφορετικά έτη .....	61
Πίνακας 3-2. Εποπτικός Πίνακας Συσχετίσεων .....	62
Πίνακας 3-3. Εποπτικός Πίνακας διακύμανσης – συν διακύμανσης.....	62
Πίνακας 13-1: Ζητούμενη ενέργεια του αιτιοκρατικού υποδείγματος ανάλογα την κατάσταση της αγοράς θεωρώντας ως μέτρο σύγκρισης την ζητούμενη ενέργεια του τέλει ανταγωνισμού το έτος 2020.....	233
Πίνακας 13-2: Παραγόμενη ενέργεια σε TWh ανά τύπο σταθμού όπως προέκυψε από την επίλυση του υποδείγματος με χρήση της προσέγγισης του Markowitz στο σενάριο χαμηλής αβεβαιότητας για τις τιμές άνθρακα, φυσικού αερίου και υψηλής αβεβαιότητας για τις τιμές αγοράς δικαιωμάτων εκπομπών για την αγορά που αναπαριστά τον ηλεκτρικό τομέα της Ελλάδας στον οποίο δραστηριοποιείται επιχείρηση υπό καθεστώς ατελούς ανταγωνισμού.....	241
Πίνακας 13-3: Εγκατεστημένη ισχύς (σε GW) ανά τύπο σταθμού όπως προέκυψε από την επίλυση του υποδείγματος αξίας σε κίνδυνο στο σενάριο χαμηλής αβεβαιότητας για τις τιμές άνθρακα και μεγάλης αβεβαιότητας για τις τιμές φυσικού αερίου και δικαιωμάτων εκπομπών για την αγορά που αναπαριστά τον ηλεκτρικό τομέα της Ελλάδας.....	242
Πίνακας 13-4: Παραγόμενη ενέργεια (σε TWh) ανά τύπο σταθμού όπως προέκυψε από την επίλυση του υποδείγματος αξιολόγησης των επενδύσεων με τη μέθοδο των δικαιωμάτων προαίρεσης στο σενάριο χαμηλής αβεβαιότητας για τις τιμές άνθρακα, φυσικού αερίου και δικαιωμάτων εκπομπών για την αγορά που αναπαριστά τον ηλεκτρικό τομέα της Ελλάδας.....	243
Πίνακας 13-5: Ζητούμενη ενέργεια του υποδείγματος αξιολόγησης με τη μέθοδο των δικαιωμάτων προαίρεσης ανάλογα την κατάσταση της αγοράς θεωρώντας ως μέτρο σύγκρισης την ζητούμενη ενέργεια του έτους 2020 όπως προέκυψε από την επίλυση του υποδείγματος αξιολόγησης με τη μέθοδο των δικαιωμάτων προαίρεσης σε αγορά υπό καθεστώς τέλει ανταγωνισμού.....	244
Πίνακας 13-6: Διαχρονική ισχύς επενδύσεων επέκτασης – ανακαίνισης ήδη εγκατεστημένων μονάδων (σε GW) όπως προέκυψε από την επίλυση του υποδείγματος μεγιστοποίησης της πιθανότητας αποφυγής ζημίας στο σενάριο μεγάλης αβεβαιότητας όπως παρουσιάστηκε στην υποενότητα 13.2.2 και πολύ μεγάλης αβεβαιότητας για την αγορά που αναπαριστά τον ηλεκτρικό τομέα της Ελλάδας .....	245
Πίνακας 13-7: Διαχρονική ισχύς επενδύσεων επέκτασης – ανακαίνισης ήδη εγκατεστημένων μονάδων (σε GW) όπως προέκυψε από την επίλυση του υποδείγματος με χρήση της προσέγγισης του Markowitz στο σενάριο μεγάλης αβεβαιότητας όπως παρουσιάστηκε στην υποενότητα 13.2.2 και πολύ μεγάλης αβεβαιότητας για την αγορά που αναπαριστά τον ηλεκτρικό τομέα της Ελλάδας ....	246

Πίνακας 13-8: Διαχρονική ισχύς επενδύσεων επέκτασης – ανακαίνισης ήδη εγκατεστημένων μονάδων (σε GW) όπως προέκυψε από την επίλυση του υποδείγματος δικαιωμάτων προαίρεσης στο σενάριο μεγάλης αβεβαιότητας που παρουσιάστηκε στην υποενότητα 13.2.2 και πολύ μεγάλης αβεβαιότητας για την αγορά που αναπαριστά τον ηλεκτρικό τομέα της Ελλάδας .....	246
Πίνακας 13-9: Εγκατεστημένη ισχύς αεριοστρόβιλων (σε GW) όπως προέκυψε από την επίλυση του υποδείγματος δικαιωμάτων προαίρεσης στο σενάριο μεγάλης αβεβαιότητας που παρουσιάστηκε στην υποενότητα 13.2.2 και πολύ μεγάλης αβεβαιότητας για την αγορά που αναπαριστά τον ηλεκτρικό τομέα της Ελλάδας .....	247
Πίνακας 13-10: Διαχρονική ισχύς επενδύσεων επέκτασης – ανακαίνισης ήδη εγκατεστημένων μονάδων όπως προέκυψε από την επίλυση του υποδείγματος δύο σταδίων και των υπολοίπων υποδειγμάτων στο σενάριο πολύ μεγάλης αβεβαιότητας για την αγορά που αναπαριστά τον ηλεκτρικό τομέα της Ελλάδας όπως παρουσιάστηκαν στην ενότητα 13.2.3 (σε GW) .....	247
Πίνακας 13-11: Τιμή ηλεκτρισμού του υποδείγματος με αντικειμενική συνάρτηση την μεγιστοποίηση πιθανότητας αποφυγής ζημίας ανάλογα την κατάσταση της αγοράς (€/KWh).....	257
Πίνακας 13-12: Ζητούμενη ενέργεια του υποδείγματος με αντικειμενική συνάρτηση την μεγιστοποίηση πιθανότητας αποφυγής ζημίας ανάλογα την κατάσταση της αγοράς θεωρώντας ως μέτρο σύγκρισης την ζητούμενη ενέργεια του έτους 2020 όπως προέκυψε από την επίλυση του υποδείγματος με αντικειμενική συνάρτηση την μεγιστοποίηση πιθανότητας αποφυγής ζημίας σε αγορά υπό καθεστώς τέλειου ανταγωνισμού.....	257
Πίνακας 13-13: Παραγόμενη ενέργεια σε TWh ανά τύπο σταθμού όπως προέκυψε από την επίλυση του υποδείγματος με χρήση της προσέγγισης του Markowitz στο σενάριο χαμηλής αβεβαιότητας για τις τιμές άνθρακα, φυσικού αερίου και υψηλής αβεβαιότητας για τις τιμές αγοράς δικαιωμάτων εκπομπών για την αγορά που αναπαριστά τον ηλεκτρικό τομέα της Πολωνίας στον οποίο δραστηριοποιείται επιχείρηση υπό καθεστώς ατελούς ανταγωνισμού.....	260
Πίνακας 13-14: Εγκατεστημένη ισχύς (σε GW) ανά τύπο σταθμού όπως προέκυψε από την επίλυση του υποδείγματος αξίας σε κίνδυνο στο σενάριο χαμηλής αβεβαιότητας για τις τιμές άνθρακα και φυσικού αερίου και μεγάλης αβεβαιότητας για τις τιμές αγοράς δικαιωμάτων εκπομπών για την αγορά που αναπαριστά τον ηλεκτρικό τομέα της Πολωνίας στον οποίο δραστηριοποιείται επιχείρηση υπό καθεστώς ατελούς ανταγωνισμού.....	261
Πίνακας 13-15: Εγκατεστημένη ισχύς αεριοστρόβιλων (σε GW) όπως προέκυψε από την επίλυση του υποδείγματος μεγιστοποίησης της πιθανότητας αποφυγής ζημίας στο σενάριο μεγάλης αβεβαιότητας που παρουσιάστηκε στην υποενότητα 13.3.2 και πολύ μεγάλης αβεβαιότητας για την αγορά που αναπαριστά τον ηλεκτρικό τομέα της Πολωνίας .....	264
Πίνακας 13-16: Διαχρονική ισχύς επενδύσεων επέκτασης – ανακαίνισης ήδη εγκατεστημένων μονάδων (σε GW) όπως προέκυψε από την επίλυση του υποδείγματος μεγιστοποίησης της πιθανότητας αποφυγής ζημίας στο σενάριο μεγάλης αβεβαιότητας όπως παρουσιάστηκε στην υποενότητα 13.3.2 και πολύ μεγάλης αβεβαιότητας για την αγορά που αναπαριστά τον ηλεκτρικό τομέα της Πολωνίας.....	265
Πίνακας 13-17: Διαχρονική ισχύς επενδύσεων επέκτασης – ανακαίνισης ήδη εγκατεστημένων μονάδων (σε GW) όπως προέκυψε από την επίλυση του υποδείγματος με χρήση της προσέγγισης του Markowitz στο σενάριο μεγάλης αβεβαιότητας όπως παρουσιάστηκε στην υποενότητα 13.3.2 και πολύ μεγάλης αβεβαιότητας για την αγορά που αναπαριστά τον ηλεκτρικό τομέα της Πολωνίας..	265



Πίνακας 13-18: Διαχρονική ισχύς επενδύσεων επέκτασης – ανακαίνισης ήδη εγκατεστημένων μονάδων (σε GW) όπως προέκυψε από την επίλυση του υποδείγματος δικαιωμάτων προαίρεσης στο σενάριο μεγάλης αβεβαιότητας που παρουσιάστηκε στην υποενότητα 13.3.2 και πολύ μεγάλης αβεβαιότητας για την αγορά που αναπαριστά τον ηλεκτρικό τομέα της Πολωνίας.....	266
Πίνακας 13-19: Περικοπές φορτίου (σε GWh) όπως προέκυψε από την επίλυση του υποδείγματος δικαιωμάτων προαίρεσης στο σενάριο μεγάλης αβεβαιότητας που παρουσιάστηκε στην υποενότητα 13.3.2 και πολύ μεγάλης αβεβαιότητας για την αγορά που αναπαριστά τον ηλεκτρικό τομέα της Πολωνίας.....	267
Πίνακας 13-20: Διαχρονική ισχύς επενδύσεων επέκτασης – ανακαίνισης ήδη εγκατεστημένων μονάδων όπως προέκυψε από την επίλυση του υποδείγματος δύο σταδίων και των υπολοίπων υποδειγμάτων στο σενάριο πολύ μεγάλης αβεβαιότητας για την αγορά που αναπαριστά τον ηλεκτρικό τομέα της Πολωνίας (σε GW).....	267
Πίνακας 13-21: Εγκατεστημένη ισχύς αεριοστρόβιλων (σε GW) όπως προέκυψε από την επίλυση του υποδείγματος μεγιστοποίησης της πιθανότητας αποφυγής ζημίας στο σενάριο μεγάλης αβεβαιότητας που παρουσιάστηκε στην υποενότητα 13.2.2 και πολύ μεγάλης αβεβαιότητας για την αγορά που αναπαριστά τον ηλεκτρικό τομέα της Γερμανίας .....	275
Πίνακας 13-22: Διαχρονική ισχύς επενδύσεων επέκτασης – ανακαίνισης ήδη εγκατεστημένων μονάδων (σε GW) όπως προέκυψε από την επίλυση του υποδείγματος με χρήση της προσέγγισης του Markowitz στο σενάριο μεγάλης αβεβαιότητας όπως παρουσιάστηκε στην υποενότητα 13.4.2 και πολύ μεγάλης αβεβαιότητας για την αγορά που αναπαριστά τον ηλεκτρικό τομέα της Γερμανίας.....	276
Πίνακας 13-23: Εγκατεστημένη ισχύς αεριοστρόβιλων (σε GW) όπως προέκυψε από την επίλυση του υποδείγματος δικαιωμάτων προαίρεσης στο σενάριο μεγάλης αβεβαιότητας που παρουσιάστηκε στην υποενότητα 13.2.2 και πολύ μεγάλης αβεβαιότητας για την αγορά που αναπαριστά τον ηλεκτρικό τομέα της Γερμανίας.....	277
Πίνακας 13-24: Διαχρονική ισχύς επενδύσεων επέκτασης – ανακαίνισης ήδη εγκατεστημένων μονάδων (σε GW) όπως προέκυψε από την επίλυση του υποδείγματος δικαιωμάτων προαίρεσης στο σενάριο μεγάλης αβεβαιότητας που παρουσιάστηκε στην υποενότητα 13.4.2 και πολύ μεγάλης αβεβαιότητας για την αγορά που αναπαριστά τον ηλεκτρικό τομέα της Γερμανίας.....	277
Πίνακας 13-25: Διαχρονική ισχύς επενδύσεων επέκτασης – ανακαίνισης ήδη εγκατεστημένων μονάδων όπως προέκυψε από την επίλυση του υποδείγματος δύο σταδίων και των υπολοίπων υποδειγμάτων στο σενάριο πολύ μεγάλης αβεβαιότητας για την αγορά που αναπαριστά τον ηλεκτρικό τομέα της Γερμανίας (σε GW).....	278
Πίνακας 13-26: Διαχρονική ισχύς επενδύσεων επέκτασης – ανακαίνισης ήδη εγκατεστημένων μονάδων (σε GW) όπως προέκυψε από την επίλυση του υποδείγματος μεγιστοποίησης της πιθανότητας αποφυγής ζημίας στο σενάριο μεγάλης αβεβαιότητας όπως παρουσιάστηκε στην υποενότητα 13.5.2 και πολύ μεγάλης αβεβαιότητας για την αγορά που αναπαριστά τον ηλεκτρικό τομέα της Ισπανίας.....	288
Πίνακας 13-27: Διαχρονική ισχύς επενδύσεων επέκτασης – ανακαίνισης ήδη εγκατεστημένων μονάδων (σε GW) όπως προέκυψε από την επίλυση του υποδείγματος με χρήση της προσέγγισης του Markowitz στο σενάριο μεγάλης αβεβαιότητας όπως παρουσιάστηκε στην υποενότητα 13.5.2 και πολύ μεγάλης αβεβαιότητας για την αγορά που αναπαριστά τον ηλεκτρικό τομέα της Ισπανίας ...	289
Πίνακας 13-28: Διαχρονική ισχύς επενδύσεων επέκτασης – ανακαίνισης ήδη εγκατεστημένων μονάδων (σε GW) όπως προέκυψε από την επίλυση του υποδείγματος δικαιωμάτων προαίρεσης στο	

---

σενάριο μεγάλης αβεβαιότητας που παρουσιάστηκε στην υποενότητα 13.5.2 και πολύ μεγάλης αβεβαιότητας για την αγορά που αναπαριστά τον ηλεκτρικό τομέα της Ισπανίας.....	289
Πίνακας 13-29: Εγκατεστημένη ισχύς αεριοστρόβιλων (σε GW) όπως προέκυψε από την επίλυση του υποδείγματος δικαιωμάτων προαίρεσης στο σενάριο μεγάλης αβεβαιότητας που παρουσιάστηκε στην υποενότητα 13.5.2 και πολύ μεγάλης αβεβαιότητας για την αγορά που αναπαριστά τον ηλεκτρικό τομέα της Ισπανίας.....	290
Πίνακας 13-30: Διαχρονική ισχύς επενδύσεων επέκτασης – ανακαίνισης ήδη εγκατεστημένων μονάδων όπως προέκυψε από την επίλυση του υποδείγματος δύο σταδίων και των υπολοίπων υποδειγμάτων στο σενάριο πολύ μεγάλης αβεβαιότητας για την αγορά που αναπαριστά τον ηλεκτρικό τομέα της Ισπανίας (σε GW).....	290
Πίνακας 13-31: Διαχρονική ισχύς επενδύσεων επέκτασης – ανακαίνισης ήδη εγκατεστημένων μονάδων (σε GW) όπως προέκυψε από την επίλυση του υποδείγματος μεγιστοποίησης της πιθανότητας αποφυγής ζημίας στο σενάριο μεγάλης αβεβαιότητας όπως παρουσιάστηκε στην υποενότητα 13.6.2 και πολύ μεγάλης αβεβαιότητας για την αγορά που αναπαριστά τον ηλεκτρικό τομέα της Ιταλίας.....	300
Πίνακας 13-32: Εγκατεστημένη ισχύς αεριοστρόβιλων (σε GW) όπως προέκυψε από την επίλυση του υποδείγματος μεγιστοποίησης της πιθανότητας αποφυγής ζημίας στο σενάριο μεγάλης αβεβαιότητας που παρουσιάστηκε στην υποενότητα 13.6.2 και πολύ μεγάλης αβεβαιότητας για την αγορά που αναπαριστά τον ηλεκτρικό τομέα της Ιταλίας.....	300
Πίνακας 13-33: Διαχρονική ισχύς επενδύσεων επέκτασης – ανακαίνισης ήδη εγκατεστημένων μονάδων (σε GW) όπως προέκυψε από την επίλυση του υποδείγματος με χρήση της προσέγγισης του Markowitz στο σενάριο μεγάλης αβεβαιότητας όπως παρουσιάστηκε στην υποενότητα 13.6.2 και πολύ μεγάλης αβεβαιότητας για την αγορά που αναπαριστά τον ηλεκτρικό τομέα της Ιταλίας.....	301
Πίνακας 13-34: Εγκατεστημένη ισχύς αεριοστρόβιλων (σε GW) όπως προέκυψε από την επίλυση του υποδείγματος με χρήση της προσέγγισης του Markowitz στο σενάριο μεγάλης αβεβαιότητας που παρουσιάστηκε στην υποενότητα 13.6.2 και πολύ μεγάλης αβεβαιότητας για την αγορά που αναπαριστά τον ηλεκτρικό τομέα της Ιταλίας.....	301
Πίνακας 13-35: Διαχρονική ισχύς επενδύσεων επέκτασης – ανακαίνισης ήδη εγκατεστημένων μονάδων (σε GW) όπως προέκυψε από την επίλυση του υποδείγματος δικαιωμάτων προαίρεσης στο σενάριο μεγάλης αβεβαιότητας που παρουσιάστηκε στην υποενότητα 13.6.2 και πολύ μεγάλης αβεβαιότητας για την αγορά που αναπαριστά τον ηλεκτρικό τομέα της Ιταλίας.....	302
Πίνακας 13-36: Εγκατεστημένη ισχύς αεριοστρόβιλων (σε GW) όπως προέκυψε από την επίλυση του υποδείγματος δικαιωμάτων προαίρεσης στο σενάριο μεγάλης αβεβαιότητας που παρουσιάστηκε στην υποενότητα 13.6.2 και πολύ μεγάλης αβεβαιότητας για την αγορά που αναπαριστά τον ηλεκτρικό τομέα της Ιταλίας.....	302
Πίνακας 13-37: Διαχρονική ισχύς επενδύσεων επέκτασης – ανακαίνισης ήδη εγκατεστημένων μονάδων όπως προέκυψε από την επίλυση του υποδείγματος δύο σταδίων και των υπολοίπων υποδειγμάτων στο σενάριο πολύ μεγάλης αβεβαιότητας για την αγορά που αναπαριστά τον ηλεκτρικό τομέα της Ιταλίας (σε GW).....	303

# Κεφάλαιο 1

## 1 Παρουσίαση Ερευνητικού Προβλήματος - Εισαγωγή

---

### 1.1 Εισαγωγή

Οι επενδύσεις σε μονάδες ηλεκτροπαραγωγής συνιστούν δύσκολες αποφάσεις για τις επιχειρήσεις. Οι λόγοι είναι κυρίως τρεις. Α) Η οικονομική δομή της ηλεκτροπαραγωγής είναι μεγάλης εντάσεως κεφαλαίου. Β) Η διάρκεια κατασκευής είναι μεγάλη και επίσης ο χρόνος ζωής των μονάδων είναι μεγάλος. Γ) Η επένδυση είναι μη αντιστρέψιμη.

Ως επιχείρηση η ηλεκτροπαραγωγή συμμετέχει σε ανταγωνιστικές αγορές (σήμερα πλέον σε περισσότερες από 150 χώρες). Επομένως η ανάκτηση του κόστους κεφαλαίου δεν είναι βέβαιη και δεν μπορεί να προ-εξοφληθεί. Μόνο μετά τη λειτουργία των μονάδων επί αρκετό χρονικό διάστημα (συνήθως ένα έτος), η επιχείρηση ηλεκτροπαραγωγής μπορεί να αποτιμήσει κατά πόσον εισέπραξε επαρκώς πέραν του μεταβλητού κόστους ώστε να ανακτήσει το κεφαλαιουχικό κόστος. Το ίδιο ισχύει και για το κόστος συντήρησης και λειτουργίας που αποτελούν πάγια κόστη. Ο χρηματοοικονομικός κίνδυνος (μη εξυπηρέτηση δανείων, μη ανάκτηση ιδίων κεφαλαίων) για την επιχείρηση ηλεκτροπαραγωγής είναι μεγαλύτερος όσο περισσότερο η οικονομική δομή της ηλεκτροπαραγωγής είναι μεγαλύτερης εντάσεως κεφαλαίου. Η ηλεκτροπαραγωγή υφίσταται επομένως κίνδυνο από την αβεβαιότητα που προέρχεται από την ανταγωνιστική λειτουργία των αγορών. Η αβεβαιότητα αυτή τείνει να δυσκολεύει επενδύσεις σε μονάδες μεγάλης εντάσεως κεφαλαίου.

Η μεγάλη διάρκεια κατασκευής και ο μακρύς χρόνος ζωής των μονάδων ηλεκτροπαραγωγής σημαίνουν ότι η επιχειρηματική απόφαση επένδυσης λαμβάνεται πολύ πριν από το χρόνο κατά τον οποίο η μονάδα θα ανακτήσει το κόστος κεφαλαίου. Με

την πάροδο του χρόνου η αβεβαιότητα πολλαπλασιάζεται και αφορά σε πλήθος συνθηκών που επηρεάζουν τα οικονομικά έσοδα των μονάδων, όπως το κόστος καυσίμων, η φορολογία, οι περιβαλλοντικές και άλλες ρυθμίσεις και περιορισμοί, η εξέλιξη των εν δυνάμει ανταγωνιστικών τεχνολογιών ηλεκτροπαραγωγής, αλλά και η ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας και οι λοιπές συνθήκες της ανταγωνιστικής αγοράς. Η ύπαρξη ανταγωνισμού συνήθως δεν επιτρέπει την ανάκτηση του κόστους κεφαλαίου σε σύντομο χρονικό διάστημα (δηλαδή μικρό συγκριτικά με το χρόνο ζωής της μονάδας). Δηλαδή η αγορά δεν επιτρέπει μεγάλες αποδόσεις κεφαλαίου σε ετήσια βάση και επομένως η επιχείρηση πρέπει να περιμένει σχεδόν μέχρι το τέλος ζωής των μονάδων για να ανακτήσει πλήρως το κόστος κεφαλαίου. Αλλά λόγω του μακρού αυτού χρόνου πολλαπλασιάζονται οι τεχνικές αβεβαιότητες (π.χ. βλάβη που οδηγεί σε διακοπή λειτουργίας ή σε μεγάλες δαπάνες αποκατάστασης), οι ρυθμιστικές αβεβαιότητες (περιβαλλοντικοί περιορισμοί, φορολογία, κλπ.) και οι αβεβαιότητες που σχετίζονται με τη ζήτηση και την αγορά.

Η επένδυση δεν είναι αντιστρέψιμη με την έννοια ότι δεν υφίσταται τρόπος να πωληθεί ο εξοπλισμός σε άλλους, εκτός της συγκεκριμένης αγοράς, εφόσον διαπιστωθεί ότι η επένδυση ήταν οικονομικά αποτυχημένη. Σε αυτήν την περίπτωση, η τυχόν πρόωρη διακοπή λειτουργίας της μονάδας οδηγεί απευθείας σε απώλεια του μέχρι τότε μη ανακτηθέντος τμήματος του κεφαλαίου. Ο επιχειρηματικός αυτός κίνδυνος αυξάνει αφενός όσο μεγαλύτερης εντάσεως κεφαλαίου είναι η τεχνολογία της μονάδας, αφετέρου όσο μεγαλύτερος είναι ο όγκος κεφαλαίων που απαιτήθηκαν για την κατασκευή της μονάδας. Ο όγκος κεφαλαίων είναι προφανώς ανάλογος του μοναδιαίου κόστους επένδυσης (ένταση κεφαλαίου) και της ηλεκτρικής ισχύος της μονάδας (MW). Λόγω αποδόσεων κλίμακας, τα μεγέθη ηλεκτρικής ισχύος των μονάδων είναι για ορισμένες τεχνολογίες ιδιαίτερα μεγάλα (π.χ. πυρηνικά εργοστάσια, συγκεντρωμένες μονάδες στερεών καυσίμων, κλπ.). Ο κίνδυνος της μη αντιστρεψιμότητας της επένδυσης αποτρέπει επομένως επενδύσεις σε τεχνολογίες που απαιτούν μεγάλο μέγεθος ηλεκτρικής ισχύος και οι οποίες ταυτόχρονα είναι και μεγάλης εντάσεως κεφαλαίου. Ο κίνδυνος της μη αντιστρεψιμότητας είναι σημαντικός για την επενδυτική απόφαση ανάλογα και με το οικονομικό μέγεθος της επιχείρησης. [Υποσημείωση: Για παράδειγμα, μία μικρή επένδυση σε φωτοβολταϊκή τεχνολογία είναι σχεδόν 100% εντάσεως κεφαλαίου, όμως όγκος των κεφαλαίων για την επένδυση είναι μικρός, επομένως ο κίνδυνος από τη μη αντιστρεψιμότητα μοιάζει μικρός. Αν όμως ο επενδυτής είναι ένας ιδιώτης που χρηματοδοτεί την επένδυση με βάση την αποταμίευσή του, τότε η μη αντιστρεψιμότητα μπορεί να είναι αποτρεπτική παρά τον μικρό όγκο των κεφαλαίων.] Αν ο ανταγωνισμός στην αγορά διενεργείται μεταξύ σχετικά μικρών ή μεσαίου μεγέθους επιχειρήσεων, η μη αντιστρεψιμότητα μπορεί να είναι αποτρεπτική των επενδύσεων, ιδίως αυτών που απαιτούν μεγάλο όγκο κεφαλαίων, περισσότερο από ό,τι σε μία αγορά

στην οποία ο ανταγωνισμός διενεργείται μεταξύ λίγων μεγάλων επιχειρήσεων. Η παρατήρηση αυτή εισάγει και τον παράγοντα της (ολιγοπωλιακής) δύναμης της επιχείρησης στην αγορά στο πλαίσιο της οποίας εξετάζεται η επενδυτική απόφαση. Η ολιγοπωλιακή δύναμη δίνει δυνατότητα τιμολόγησης σε επίπεδα μεγαλύτερα από αυτά του τέλει ανταγωνισμού, ενώ ταυτόχρονα η κάθε επιχείρηση είναι σχετικά μεγαλύτερη (συγκριτικά με τον τέλει ανταγωνισμό) λόγω του μικρού αριθμού επιχειρήσεων στην ολιγοπωλιακή αγορά. [Υποσημείωση: Για παράδειγμα, ο κίνδυνος μη αντιστρεψιμότητας θα αποτρέψει μια μικρή επιχείρηση στο πλαίσιο αγοράς έντονου ανταγωνισμού να λάβει απόφαση κατασκευής μονάδας μεγάλου όγκου κεφαλαίου (π.χ. μία πυρηνική μονάδα), ενώ ενδεχομένως ο κίνδυνος αυτός θα αποτρέψει λιγότερο μία μεγάλη επιχείρηση στο πλαίσιο ολιγοπωλιακής αγοράς.]

Συνυπάρχουν ταυτόχρονα οι τρεις λόγοι που καθιστούν δύσκολες τις αποφάσεις επένδυσης σε ηλεκτροπαραγωγικές μονάδες. Δηλαδή, η επιχείρηση ταυτόχρονα έχει αβεβαιότητα σε ετήσια βάση για την ανάκτηση του κόστους κεφαλαίου μέσω των αγορών, έχει τεχνική, ρυθμιστική και οικονομική αβεβαιότητα που πολλαπλασιάζεται με την πάροδο του μακρού χρόνου μέχρι την ανάκτηση του κόστους κεφαλαίου και συνεχώς ελλοχεύει ο κίνδυνος απώλειας του μη ανακτηθέντος κεφαλαίου από τυχόν διακοπή λειτουργίας της μονάδας επειδή η επενδυτική δαπάνη είναι η αναστρέψιμη.

Ο κίνδυνος ανεπανόρθωτης ζημίας της επιχείρησης ηλεκτροπαραγωγής είναι μεγαλύτερος όσο μεγαλύτερης εντάσεων κεφαλαίου είναι οι μονάδες της, όσο μεγαλύτερος είναι ο όγκος των επενδυμένων κεφαλαίων, όσο μικρότερου μεγέθους είναι η επιχείρηση και όσο εντονότερος είναι ο ανταγωνισμός στην αγορά.

Λόγω του συχνά μεγάλου κινδύνου ανεπανόρθωτης ζημίας της επιχείρησης λόγω τυχόν οικονομικά αποτυχημένων επενδυτικών αποφάσεων, οι επιχειρήσεις ηλεκτροπαραγωγής είναι συνήθως ιδιαίτερα συντηρητικές σχετικά με την ανάληψη ρίσκου. Δηλαδή, σχετικά με τις επενδυτικές αποφάσεις, συνήθως συμπεριφέρονται αποφεύγοντας έντονα τον κίνδυνο (*strong risk averse behavior*). Συνήθως δεν λαμβάνουν τις επενδυτικές αποφάσεις με βάση την παρούσα αξία του αναμενόμενου κέρδους (με βάση πιθανότητες) αλλά βασίζουν τις αποφάσεις σε ελαχιστοποίηση της τυχόν ζημίας ακολουθώντας επενδυτική στρατηγική για την οποία δεν θα «μετανιώσουν» εκ των υστέρων (*no regret strategy*). Έχει παρατηρηθεί, αντίθετα, ότι επιχειρήσεις με μονοπωλιακή ή μεγάλη ολιγοπωλιακή ισχύ (βεβαίως και αυτές που έχουν κρατική ιδιοκτησία ή καλύπτονται από μακροχρόνια συμβόλαια με το κράτος ή με εγγύηση του δημοσίου) ακολουθούν συμπεριφορές που είναι ουδέτερες ως προς τον κίνδυνο (ή ελαφρά αποφεύγουσες τον κίνδυνο) και βασίζουν τις επενδυτικές αποφάσεις τους στην παρούσα αξία του αναμενόμενου κέρδους ή οφέλους. Η ανάπτυξη του ανταγωνισμού στις αγορές ηλεκτρικής ενέργειας, η δημιουργία ενιαίας αγοράς στην ΕΕ

(μεγάλου μεγέθους κατά συνέπεια με μικρές σε μέγεθος επιχειρήσεις εν σχέσει με το μέγεθος της αγοράς) καθώς και οι αποκρατικοποιήσεις (ή η παύση χορήγησης εγγυήσεων του δημοσίου και μακροχρόνιων συμβολαίων εγγυημένων αμοιβών) ενισχύουν την τάση για επενδυτικές συμπεριφορές που αποφεύγουν τον κίνδυνο και οι οποίες λαμβάνονται με γνώμονα την ελαχιστοποίηση της τυχόν ζημίας.

Ταυτόχρονα με τους παράγοντες που σχετίζονται με τις αγορές ηλεκτρικής ενέργειας, πολλαπλασιάζονται και οι αβεβαιότητες που σχετίζονται με το περιβάλλον (κλιματική αλλαγή, η αντιμετώπιση της οποίας απαιτεί παύση ή μεγάλη μείωση της χρήσης ορυκτών καυσίμων), με τη φορολογία (π.χ. τιμές διοξειδίου του άνθρακα στο πλαίσιο του μηχανισμού αγοράς δικαιωμάτων εκπομπής – ETS), με τη ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας (ασταθής οικονομική ανάπτυξη ή αβέβαιη ανάπτυξη επί μακρόν, αλλά και μείωση της ζήτησης από την απευθείας χρήση ανανεώσιμων πηγών σε κατανεμημένη βάση) και τις διεθνείς τιμές των καυσίμων (μεγάλη διακύμανση των τιμών και προς τα επάνω αλλά και προς τα κάτω). [Υποσημείωση: Για παράδειγμα, η επένδυση σήμερα σε μια μεγάλη μονάδα στερεών καυσίμων θα συναντήσει κατά την 40-ετή διάρκεια ζωής της πολλαπλασιαζόμενες αβεβαιότητες που θα απορρέουν από την πολιτική για την κλιματική αλλαγή, τη ζήτηση λόγω των διακυμάνσεών της που μπορεί να μην είναι συμβατές με τη σχετικά αδρανή λειτουργία των μονάδων αυτών αλλά και τις διεθνείς τιμές του φυσικού αερίου λαμβανομένων υπόψη των μελλοντικών τιμών των αδειών εκπομπής διοξειδίου του άνθρακα. Όμως παρόμοια επικίνδυνη οικονομικά είναι και η επένδυση σε πυρηνική μονάδα, η οποία ναι μεν είναι συμβατή με τις πολιτικές για την κλιματική αλλαγή, αλλά μπορεί να επιφέρει ανεπανόρθωτη ζημία την επιχείρηση σε περίπτωση ατυχήματος, όπως έγινε στη Φουκουσίμα της Ιαπωνίας.]

Η εξάρτηση του επιχειρηματικού κινδύνου από τον όγκο και ένταση κεφαλαίων σαφώς συντείνει υπό τις παρούσες συνθήκες αβεβαιότητας στον μετασχηματισμό της ηλεκτροπαραγωγής προς μία δομή που θα κυριαρχείται από μικρού μεγέθους μονάδες και διεσπαρμένους οικονομικά επενδυτικούς πόρους (και βέβαια με διεσπαρμένη δομή και γεωγραφικά). Δεν είναι σήμερα (με βάση τις σήμερα ώριμες τεχνολογίες) δεδομένο ότι ένα τέτοιο σύστημα ηλεκτροπαραγωγής θα διασφαλίζει το ίδιο επίπεδο αξιοπιστίας της ηλεκτρικής τροφοδοσίας όπως το σημερινό σύστημα (αρκετά συγκεντρωτικό σε μονάδες μεγάλου όγκου κεφαλαίου). Επίσης δεν είναι δεδομένο ότι το μελλοντικό διεσπαρμένο σύστημα θα αποτελεί την βέλτιστη οικονομικά επέκταση του συστήματος ηλεκτροπαραγωγής (με βάση την παρούσα αξία του πλήρους κόστους). Τέλος, θα είναι αδύνατον να μην αναπτυχθούν ταυτόχρονα και συγκεντρωτικές μονάδες ηλεκτροπαραγωγής είτε για την εξισορρόπηση του συστήματος και τις εφεδρικές υπηρεσίες είτε λόγω αποδόσεων κλίμακας, όπως τα μεγάλα αιολικά έργα (π.χ. στη Βόρεια Θάλασσα) ή τα μεγάλα ηλιακά έργα (π.χ. σε Νότιες περιοχές μεγάλης

ηλιοφάνειας). Οι σχετικές αποφάσεις θα είναι επίσης επηρεασμένες από συμπεριφορά έντονης αποφυγής του κινδύνου και ενδεχομένως δεν θα μπορούν καν να ληφθούν σε αμιγώς ιδιωτική βάση και στο πλαίσιο ανταγωνιστικών αγορών.

Η εμφάνιση της διόγκωσης της αβεβαιότητας και της τάσης για συμπεριφορές που έντονα αποφεύγουν επιχειρηματικούς κινδύνους έχει ήδη συμβεί στην ΕΕ. Παρατηρείται εδώ και μερικά χρόνια μεγάλη στασιμότητα στις επενδύσεις ηλεκτροπαραγωγής (εκτός από επενδύσεις σε ΑΠΕ εφόσον καλύπτονται από εγγυημένες τιμές αγοράς από το Κράτος) αλλά και τάση διακοπής λειτουργίας μονάδων (ώστε να αποφευχθούν οι περαιτέρω ζημιές από τη λειτουργία τους) ή και ακόμα ακύρωση έργων αναβάθμισης και εκσυγχρονισμού υφισταμένων μονάδων. Είναι χαρακτηριστική η πρόσφατη περίπτωση σύναψης μακροχρόνιας σύμβασης εγγυημένης αγοράς (και μάλιστα σε υψηλή τιμή) της παραγωγής από νέο πυρηνικό σταθμό στο Ηνωμένο Βασίλειο, η οποία θεωρήθηκε ως η μόνη εφικτή δυνατότητα για τη λήψη επενδυτικής απόφασης από ιδιωτική επιχείρηση σε νέο πυρηνικό σταθμό.

### 1.2 Σκοπός της διατριβής

Οι παραπάνω επισημάνσεις θέτουν το περίγραμμα των οικονομικών συνθηκών οι οποίες καθιστούν σημαντική την έρευνα με στόχο την προσαρμογή και επέκταση των μαθηματικών εργαλείων βελτιστοποίησης που συμβατικά χρησιμοποιούνται για τη μελέτη σκοπιμότητας και προγραμματισμού επενδύσεων στην ηλεκτροπαραγωγή. Οι συμβατικές μεθοδολογίες των εργαλείων αυτών δεν είναι προσαρμοσμένες στα νέα δεδομένα με τα οποία πλέον λαμβάνονται οι επενδυτικές αποφάσεις ηλεκτροπαραγωγής από τις επιχειρήσεις. Το έλλειμμά τους αφορά τόσο στην αναπαράσταση και διαχείριση της αβεβαιότητας εντός της βελτιστοποίησης, όσο και στα κριτήρια απόφασης με βάση τα οποία καθοδηγείται η μαθηματική βελτιστοποίηση. Σπάνια είναι επίσης και τα μαθηματικά εργαλεία που αναπαριστούν συνθήκες ολιγοπωλιακού ανταγωνισμού, και οπωσδήποτε είναι σχεδόν ανύπαρκτα τα εργαλεία που συνδυάζουν ολιγοπωλιακό ανταγωνισμό με επαρκή αναπαράσταση της αβεβαιότητας ώστε να προσομοιώνονται αποφάσεις επένδυσης που έντονα αποφεύγουν τον κίνδυνο.

Μαθηματικά εργαλεία βέλτιστου προγραμματισμού επενδύσεων σε συνδυασμό με προσομοίωση της λειτουργίας της αγοράς σε μεγάλο χρονικό ορίζοντα είναι προφανώς απαραίτητα για την εκτίμηση των μελλοντικών εσόδων των υποψηφίων επενδύσεων αλλά και την αναπαράσταση των μελλοντικών συνθηκών της αγοράς και των πολλαπλών αβεβαιοτήτων. Πράγματι σύμφωνα και με την διεθνώς ακολουθούμενη πρακτική, η μελέτη σκοπιμότητας των επενδύσεων ηλεκτροπαραγωγής δεν βασίζεται σε

οικονομοτεχνική αξιολόγηση μεμονωμένων υποψηφίων μονάδων, αλλά σε μαθηματική βελτιστοποίηση και προσομοίωση που εκτείνεται σε όλο το εύρος του συστήματος ηλεκτροπαραγωγής, καλύπτει τη διεθνή αγορά και τις αλληλεξαρτώμενες εθνικές αγορές, καθώς και επεκτείνεται σε μακρύ χρονικό ορίζοντα.

Στο πλαίσιο αυτό, η παρούσα έρευνα έθεσε ως στόχο να προτείνει και να δοκιμάσει αριθμητικά νέες εμπειρικές μεθοδολογίες μοντελοποίησης της αβεβαιότητας και των επιχειρηματικών αποφάσεων με έντονη αποφυγή κινδύνου στο πλαίσιο ατελούς ανταγωνισμού, έτσι ώστε οι μεθοδολογίες αυτές να ενσωματωθούν στα συμβατικά μαθηματικά εργαλεία βέλτιστου προγραμματισμού και προσομοίωσης λειτουργίας ηλεκτροπαραγωγικών συστημάτων, καθιστώντας τα κατάλληλα για την αξιολόγηση επενδυτικών αποφάσεων στο πλαίσιο των σημερινών οικονομικών συνθηκών.

Για την επίτευξη του ερευνητικού της στόχου, η διατριβή, κωδικοποίησε κατ' αρχήν στη γενική του μορφή το πλήρες υπόδειγμα βέλτιστης ανάπτυξης συστήματος και λειτουργίας ηλεκτρικού συστήματος σε μακροχρόνιο ορίζοντα (για αλληλεξαρτώμενες χώρες και για διαφορετικές περιπτώσεις ανταγωνισμού την αγορά), ακολουθώντας το αιτιοκρατικό πρότυπο.

Στη συνέχεια η έρευνα κωδικοποίησε και ενσωμάτωσε στο υπόδειγμα αναπαράσταση των αβεβαιοτήτων που αφορούν σε πολλούς παράγοντες και εξελίσσονται με το χρόνο. Η μαθηματική κωδικοποίηση των αβεβαιοτήτων στο υπόδειγμα χρησιμοποίησε διάφορες μορφές οι οποίες είναι γνωστές από τη μαθηματική θεωρία της στοχαστικής βελτιστοποίησης.

Το επόμενο βήμα της έρευνας αφορά στην κωδικοποίηση συμπεριφορών απόφασης που έντονα αποφεύγουν τον κίνδυνο. Κωδικοποιήθηκε μεγάλο εύρος των τυποποιημένων συμπεριφορών απόφασης υπό συνθήκες κινδύνου και αβεβαιότητας όπως αυτές έχουν προταθεί στην εκτενή βιβλιογραφία της οικονομικής θεωρίας λήψης απόφασης. Χρησιμοποιήθηκαν επίσης μαθηματικά πρότυπα απόφασης σε συνθήκες αβεβαιότητας που έχουν αναπτυχθεί στη χρηματοοικονομική ανάλυση μεμονωμένων επενδύσεων, και προσαρμόστηκαν τα πρότυπα αυτά στο πλαίσιο του συστήματος και της συνολικής αγοράς όπως αυτό αναπαρίστανται από το υπόδειγμα της διατριβής.

Η κωδικοποίηση και η εμπειρική δοκιμή πολλών εναλλακτικών προτύπων απόφασης υπό συνθήκες αβεβαιότητας στο πλαίσιο του ηλεκτρικού συστήματος και της αγοράς, επέτρεψε στην έρευνα να προτείνει αξιολόγηση των προτύπων αυτών σχετικά με την καταλληλότητά τους στην αναπαράσταση των επενδυτικών αποφάσεων υπό διάφορους τύπους συμπεριφορών αποφυγής κινδύνου και ιδιαίτερα όταν η συμπεριφορά επιδιώκει περιορισμό της ζημίας παρά μεγιστοποίηση του κέρδους.



Τέλος, η έρευνα υλοποίησε αριθμητικά μοντέλα μεγάλου μεγέθους με εφαρμογή στις χώρες της ΕΕ και ορίζοντα το 2050. Τα μοντέλα περιλαμβάνουν τη μοντελοποίηση δύο προβλημάτων

α) λειτουργίας συστήματος ηλεκτροπαραγωγής (κατανομή μονάδων – unit commitment) και

β) ανάπτυξης της ηλεκτροπαραγωγής μέσω επενδύσεων σε μονάδες.

Η επίλυση κάθε υποδείγματος προσδιορίζει χαρτοφυλάκιο επενδύσεων, και συγκεκριμένα το μέγεθος, την τεχνολογία καθώς και το έτος κατασκευής σταθμών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Στο αιτιοκρατικό υπόδειγμα δεν γίνεται διαχωρισμός του έτους λήψης απόφασης κατασκευής ενός σταθμού και του έτους που ξεκινά την λειτουργία του. Ο διαχωρισμός αυτός θα ήταν ενδιαφέρον στην περίπτωση που ο χρόνος κατασκευής της κάθε μονάδας διέφερε και εξαρτώταν είτε από ειδικές γνώσεις για τον χρόνο κατασκευής της κάθε μονάδας είτε από κάποιον στοχαστικό παράγοντα. Στην παρούσα διατριβή, όμως, γίνεται η υπόθεση ότι ο χρόνος κατασκευής της κάθε μονάδας είναι εξαρτάται μόνο από την τεχνολογία της, οπότε ο χρόνος λήψης απόφασης κατασκευής της κάθε μονάδας είναι δεδομένα έτη πριν ξεκινήσει την λειτουργία της. Οι αποφάσεις σχετικά με τις επενδύσεις αφορούν είτε την κατασκευή νέων μονάδων είτε την επέκταση ήδη εγκατεστημένων μονάδων είτε την απόσυρση-αποξήλωση σταθμών.

Για την ενσωμάτωση των αβεβαιοτήτων, στην παρούσα διατριβή, γίνεται η θεώρηση ότι οι στοχαστικές παράμετροι ακολουθούν κανονική κατανομή με δεδομένη μέση τιμή και τυπική απόκλιση ενώ οι στοχαστικές ανελίξεις ότι ακολουθούν τη στοχαστική ανέλιξη Γεωμετρική Κίνηση Brown (Geometric Brownian Motion). Συνεπώς το κέρδος της επιχείρησης ή μιας επένδυσης που χρησιμοποιείται ως κριτήριο αξιολόγησης δεδομένου ότι εξαρτάται από τις εξωγενείς στοχαστικές παραμέτρους ή ανελίξεις είναι πιθανοτικό μέγεθος.

Η εμπειρική μελέτη χρησιμοποίησε πολλές παραλλαγές των μοντέλων που αναπτύχθηκαν στη διατριβή με τρόπο ώστε να μελετηθεί η ευαισθησία των αποτελεσμάτων (επενδύσεων ηλεκτροπαραγωγής) για διάφορες χώρες (ή ομάδες χωρών) υπό διαφορετικές συνθήκες ανταγωνισμού στην αγορά, αβεβαιοτήτων και τύπων απόφασης εξαρτώμενης από διαφορετικές συμπεριφορές έναντι του κινδύνου. Η έρευνα μελέτησε συγκριτικά τα αποτελέσματα όλων των παραλλαγών του μοντέλου και των περιπτώσεων εφαρμογής με σκοπό να επιβεβαιώσει και αριθμητικά τη συσχέτιση του τρόπου μαθηματικής κωδικοποίησης των επενδυτικών αποφάσεων υπό διάφορες συνθήκες αβεβαιότητας με το εύρος των τυποποιημένων συμπεριφορών έναντι του κινδύνου. Η εμπειρική αυτή ανάλυση δικαιολογεί τα συμπεράσματα που εξάγονται σχετικά με την καταλληλότητα καθεμίας μαθηματικής κωδικοποίησης εν σχέση με τους τύπους συμπεριφοράς.

Η έρευνα θεώρησε ότι κλειδί για την τυποποίηση της συσχέτισης μεταξύ της αναπαράστασης της αβεβαιότητας και της μοντελοποίησης της λήψης επενδυτικών αποφάσεων είναι η ύπαρξη άγνοιας (ignorance) σχετικά με τα μελλοντικά ενδεχόμενα ταυτόχρονα με αβεβαιότητα (uncertainty). Όπως είναι γνωστό, η μαθηματική κωδικοποίηση της αβεβαιότητας διενεργείται αντικαθιστώντας αριθμητικές τιμές παραμέτρων από αριθμητικά προσδιορισμένες κατανομές πιθανοτήτων. Θεωρείται ότι για κάθε τέτοια κατανομή είναι γνωστές οι αριθμητικές τιμές των παραμέτρων της αλγεβρικής αναπαράστασης της κατανομής, καθώς βέβαια και η αναλυτική μορφή της μαθηματικής αναπαράστασης. Με άλλα λόγια η αβεβαιότητα μετέθεσε τα αιτιοκρατικά γνωστά δεδομένα από απλές παραμέτρους του υποδείγματος σε πιο σύνθετες, αλλά γνωστές κατά τα λοιπά, αλγεβρικές μορφές κατανομής πιθανοτήτων. Είναι εμφανές ότι η κλασσική αυτή προσέγγιση της αβεβαιότητας διαφέρει ουσιαστικά από την άγνοια των μελλοντικών ενδεχομένων. Συχνά προτείνεται για την περίπτωση αυτή η χρήση ομοιόμορφης κατανομής (όπου όλα τα ενδεχόμενα είναι ίσης πιθανότητας). Μία άλλη προσέγγιση της αβεβαιότητας που προσεγγίζει την άγνοια είναι ειδικές στοχαστικές ανελίξεις στις οποίες κάθε μεταβολή είναι πιθανοτικά ανεξάρτητη από κάθε προηγούμενη μεταβολή.

Στην οικονομική θεωρία η έννοια του κινδύνου (ρίσκου) είναι διαφορετική από την έννοια της αβεβαιότητας. Συχνά η διαχείριση του ρίσκου γίνεται ως εάν να ενδιαφέρουν μόνο εκείνα τα τμήματα των κατανομών πιθανοτήτων τα οποία επιφέρουν αρνητικά αποτελέσματα για τον αποφασίζοντα. Η συμπεριφορά αυτή στην ουσία ισοδυναμεί με άρνηση του αποφασίζοντα να δεχθεί την όποια βεβαιότητα προκύπτει από την πλήρη χρήση των κατανομών πιθανοτήτων δηλαδή συμπεριφέρεται ως εάν είχε άγνοια των μελλοντικών ενδεχομένων, έστω μερική άγνοια. Κάθε συμπεριφορά αυτού του είδους αποστρέφεται έντονα τον κίνδυνο και στην ουσία η τυχόν απόφαση επένδυσης λαμβάνει υπόψη εν μέρει τουλάχιστον ότι επικρατεί άγνοια των μελλοντικών ενδεχομένων. Δηλαδή σαν αυτά να μην ήταν πιθανοτικά γνωστά.

Η κλασσική θεωρία απόφασης με βάση γνωστές πιθανότητες και η θεωρία της αναμενόμενης χρησιμότητας των Von Newman-Morgenstern αποτελούν τη βάση της σύγχρονης θεωρίας λήψης απόφασης. Παραλλαγές των υποδειγμάτων που αναλύθηκαν εμπειρικά στην παρούσα διατριβή ακολουθούν τη θεωρητική αυτή βάση. Εφαρμόστηκαν επίσης και προσεγγίσεις όπου το στοχαστικό πρόβλημα απόφασης (με γνωστές τις κατανομές πιθανοτήτων) μετασχηματίστηκε στο ισοδύναμο αιτιοκρατικό πρόβλημα και έτσι το υπόδειγμα επιλύθηκε ως πρόβλημα αιτιοκρατικής βελτιστοποίησης. Οι μέθοδοι αυτοί όμως θεωρούν ότι ο αποφασίζοντας διαθέτει πλήρη πληροφορία έστω και εάν η πληροφορία αυτή είναι στοχαστική και έχει τη μορφή κατανομών πιθανοτήτων με γνωστές αριθμητικές παραμέτρους.

Το πρόβλημα όμως επένδυσης στην ηλεκτροπαραγωγή τείνει να αποτελεί πρόβλημα με σημαντική έλλειψη πληροφορίας (info-gap decision problem). Σε ακραία κατάσταση έλλειψης πληροφορίας το πρόβλημα απόφασης δεν είναι σε θέση να ποσοτικοποιήσει την αβεβαιότητα μέσω κατανομών πιθανοτήτων. Σε τέτοιες καταστάσεις εφαρμογή έχουν μέθοδοι λήψης απόφασης οι οποίες εφαρμόζονται και σε επιστήμες του μηχανικού και στοχεύουν στην διασφάλιση αξιοπιστίας (robustness) μηχανικών συστημάτων. Για το σκοπό αυτό τίθεται προτεραιότητα στην αποφυγή αποτυχίας που επιφέρει μεγάλες ζημίες. Δηλαδή ενόψει σημαντικής έλλειψης πληροφορίας σχετικά με την αβεβαιότητα, πρωτεύουσα σημασία έχει η λήψη εκείνων των αποφάσεων που εξασφαλίζουν «ανοσία» (immunity) σε κάθε ενδεχόμενο που είναι άγνωστο πώς θα επέλθει. Αυτή η προσέγγιση έχει προφανή αναλογία με την οικονομική συμπεριφορά που έντονα αποστρέφεται το ρίσκο. Με άλλα λόγια στοχαστικές βελτιστοποιήσεις με έντονα αυξημένη αποστροφή προς το ρίσκο προσεγγίζουν αποφάσεις σε συνθήκες άγνοιας των μελλοντικών ενδεχομένων. Η απόφαση που βασίζεται σε στοχαστική χρησιμότητα υπό συνθήκες έντονης αποστροφής του ρίσκου προσομοιάζει με συμπεριφορές που επιδιώκουν αποφυγή ζημίας (robustness - avoidance of failure). Αυτές έχουν μεγαλύτερες πιθανότητες να διασφαλίσουν επιβίωση της επιχείρησης παρά οι κλασσικές συμπεριφορές που βασίζονται στη μεγιστοποίηση του αναμενόμενου οφέλους.

Η οικονομική συμπεριφορά αποφυγής ρίσκου ή αποτυχίας οδηγεί σε σημαντικά διαφορετικές επενδυτικές αποφάσεις συγκριτικά με τις κλασσικές μεθόδους στοχαστικής βελτιστοποίησης που επιδιώκουν το άριστο πιθανοτικά αναμενόμενο όφελος ή κέρδος. Η αποφυγή της μεγάλης ζημίας (η και καταστροφής) (avoidance of failure) τις οποίες η παρούσα έρευνα δανείστηκε από επιστήμες του μηχανικού σχετικά με αξιοπιστία μηχανών, επιδιώκουν την επιβίωση της επιχείρησης κάτω από όλα τα ενδεχόμενα αγνοώντας τις αποφάσεις που αντιστοιχούν σε ευκαιρίες μεγιστοποίησης οφέλους. Αυτό είναι απευθείας ισοδύναμο με εφαρμογή κριτηρίων απόφασης που εκμεταλλεύονται μόνο τα τμήματα των κατανομών πιθανοτήτων που επιφέρουν αρνητικά αποτελέσματα για την επιχείρηση αγνοώντας τα τμήματα κατανομών πιθανοτήτων που οδηγούν σε ενδεχόμενα με θετικό όφελος. Δηλαδή επιβίωση της επιχείρησης και ευκαιρίες απόκτησης οφέλους είναι ανταγωνιστικές μεταξύ τους και σε αυτές αντιστοιχούν διαφορετικές αποφάσεις επένδυσης σε ηλεκτροπαραγωγή. Η προσέγγιση αυτή είναι ικανή να εξηγήσει την ακραία συντηρητική επενδυτική συμπεριφορά η οποία παρατηρείται σε έντονα ανταγωνιστικές αγορές. Τα εμπειρικά αποτελέσματα των μαθηματικών υποδειγμάτων της παρούσας έρευνας καταδεικνύουν και αριθμητικά τη σημαντική διαφορά επενδύσεων μεταξύ της συμπεριφοράς αποφυγής αποτυχίας και της κλασσικής συμπεριφοράς που βασίζεται στην αναμενόμενη χρησιμότητα.

Στην οικονομική θεωρία υφίσταται θέληση για πληρωμή προκειμένου να αντληθεί πληροφορία σε καταστάσεις κατά τις οποίες η έλλειψη πληροφορίας επιφέρει ζημία στον αποφασίζοντα. Η άγνοια μελλοντικών ενδεχομένων είναι μία μορφή έλλειψης πληροφορίας. Στο πλαίσιο στρατηγικής απόφασης σε δύο (ή περισσότερα) χρονικά στάδια, η θέληση για πληρωμή για απόκτηση πληροφορίας εκφράζεται στο πλαίσιο επενδυτικών αποφάσεων με τη λήψη (ή ακόμα και με την άρνηση λήψης) ελαχίστων δυνατών επενδυτικών αποφάσεων στο πρώτο στάδιο, με τρόπο ώστε να μετανιώσει όσο το δυνατόν λιγότερο (minimum regret) ο αποφασίζοντας προκειμένου να περιμένει έως ότου μερικώς αρθεί η άγνοια (γίνουν γνωστές οι εκβάσεις κάποιων ενδεχομένων) ώστε στο δεύτερο στάδιο να λάβει πιο στοχευμένες επενδυτικές αποφάσεις. Η πληρωμή για την απόκτηση της πληροφορίας στο τέλος του πρώτου σταδίου έγκειται στο πιθανοτικά διαφυγόν όφελος κατά το στάδιο αυτό που θα πρόκυπτε αν αποφάσιζε μα βάση το σύνολο των κατανομών πιθανοτήτων. Αν το έκανε όμως αυτό οι επενδύσεις κατά το πρώτο στάδιο θα περιόριζαν τους βαθμούς ελευθερίας απόφασης κατά το δεύτερο στάδιο και θα έχανε την ευκαιρία να λάβει καλύτερες αποφάσεις επένδυσης στο δεύτερο στάδιο όταν μέρος της άγνοιας (ή αβεβαιότητας) θε έχει αρθεί.

Η έρευνα δέχθηκε ως δεδομένο ότι η παραπάνω θεώρηση της άγνοιας, της αβεβαιότητας και του ρίσκου είναι κυρίαρχες στην παρούσα κατάσταση των αγορών ηλεκτρικής ενέργειας, τόσο λόγω του ανταγωνισμού όσο και λόγω των μεγάλων περιβαλλοντικών και οικονομικών αβεβαιοτήτων. Με αυτή τη λογική, η οποία είναι σχετικά ακραία σε ότι αφορά στη συμπεριφορά έναντι του επιχειρηματικού κινδύνου, θεωρεί η έρευνα ότι λαμβάνονται πλέον οι επενδυτικές αποφάσεις για την ηλεκτροπαραγωγή. Έτσι προσάρμοσε σε αυτή τη λογική τη μαθηματική κωδικοποίηση του προβλήματος βελτιστοποίησης σε μακροχρόνιο ορίζοντα ώστε να μπορεί το υπόδειγμα να μελετά την επίπτωση τη λήψης επενδυτικών αποφάσεων ηλεκτροπαραγωγής υπό συνθήκες μεγάλης αβεβαιότητας ή και άγνοιας μελλοντικών ενδεχομένων. Πολλές τεχνικές δοκιμάσθηκαν για το σκοπό αυτό στο υπόδειγμα και εξήχθησαν συμπεράσματα σχετικά με την καταλληλότητά τους σχετικά με συμπεριφορές διαφορετικής εντάσεως αποστροφής του επιχειρηματικού κινδύνου.

Συνοψίζοντας, στην παρούσα διατριβή, για την λήψη αποφάσεων κατά το μεσο-μακροχρόνιο βέλτιστο ενεργειακό σχεδιασμό της αγοράς αξιολογείται η πιθανοτική κατανομή του κέρδους της επιχείρησης ή των επενδύσεων με διάφορες μεθόδους. Η πρώτη μέθοδος αναφέρεται στη μεγιστοποίηση της πιθανότητας αποφυγής ζημίας της επιχείρησης. Η δεύτερη μέθοδος χρησιμοποιεί τη μέση τιμή και τη διακύμανση της κατανομής του κέρδους για την αξιολόγηση του κινδύνου που αντιμετωπίζει η επιχείρηση από τις διάφορες επενδύσεις. Η τρίτη μέθοδος αξιολόγησης του κινδύνου υπολογίζει την Αξία σε Κίνδυνο. Κάθε μέθοδος προσομοιώνει διαφορετική προσέγγιση

της επιχείρησης αναφορικά με τον κίνδυνο συνεπώς οι επενδυτικές αποφάσεις και οι αποφάσεις για τη λειτουργία όπως προκύπτουν ύστερα από το βέλτιστο ενεργειακό σχεδιασμό του ηλεκτρικού τομέα διαφοροποιούνται. Στην παρούσα διατριβή αναπτύσσονται υποδείγματα αναπαράστασης του ηλεκτρικού τομέα και μελετάται ο βέλτιστος ενεργειακός σχεδιασμός του όταν ο κίνδυνος αξιολογείται με κάθε μία από τις μεθόδους αυτές.

Επιπρόσθετα, αναπτύχθηκε υπόδειγμα στοχαστικής βελτιστοποίησης δύο σταδίων που αναπαριστά την ηλεκτρική αγορά με στόχο την παρουσίαση της διαφοροποίησης των αποφάσεων όταν αυτές λαμβάνονται σε αβέβαιο περιβάλλον (βλ. επιλογή επενδύσεων χωρίς να είναι γνωστή η μελλοντική εξέλιξη ορισμένων παραμέτρων λειτουργίας) και της δυνατότητας «αντιστάθμισης» και μερικής αναπροσαρμογής των επενδυτικών αποφάσεων του ηλεκτρικού συστήματος αφού έχει αρθεί μέρος της αβεβαιότητας. Τέλος, αναπτύχθηκε υπόδειγμα προσομοίωσης της ηλεκτρικής αγοράς στο οποίο η αξιολόγηση των επενδύσεων γίνεται με τη μέθοδο των δικαιωμάτων προαίρεσης. Στόχος του υποδείγματος αυτού είναι η παρουσίαση της μεταβολής των αποτελεσμάτων όταν η κάθε επένδυση αξιολογείται χωριστά ανάλογα με την αξία της και λαμβάνοντας υπόψιν τη δυνατότητα αναβολής πραγματοποίησης της επένδυσης.

### 1.3 Δομή της διατριβής

Η δομή της διατριβής περιλαμβάνει τις παρακάτω ενότητες:

Η πρώτη ενότητα εισάγει το αντικείμενο της διατριβής. Επιπλέον, παρουσιάζει τα πρωτότυπα στοιχεία και τη συνεισφορά της στον επιστημονικό κλάδο μέσω της ανάπτυξης των διαφόρων υποδειγμάτων και τη σύγκρισή τους.

Η δεύτερη ενότητα παρουσιάζει συνοπτική ιστορική ανασκόπηση της ανάπτυξης των παραδοσιακών προσεγγίσεων μοντελοποίησης της ηλεκτροπαραγωγής και της επέκτασης του συστήματος. Η ίδια ενότητα παρουσιάζει επισκόπηση των μεθόδων μοντελοποίησης της αβεβαιότητας.

Η τρίτη ενότητα παρουσιάζει τη μαθηματική εισαγωγή που χρησιμοποιείται μετέπειτα στην εργασία, τις στοχαστικές ανελίξεις που θεωρείται πως ακολουθούν τα στοχαστικά μεγέθη καθώς και τη μεθοδολογία παραγωγής αντιπροσωπευτικών δειγμάτων αυτών.

Η τέταρτη ενότητα παρουσιάζει το αιτιοκρατικό υπόδειγμα αναπαράστασης ηλεκτρικού τομέα. Η ενότητα παρουσιάζει μορφοποίηση της ηλεκτροπαραγωγής σε συνθήκες ολιγοπωλίου και σε συνθήκες τέλει ανταγωνισμού. Οι δύο μορφοποιήσεις

εφαρμόζονται και σε κάθε ένα από τα στοχαστικά μοντέλα που παρουσιάζονται στις επόμενες ενότητες.

Η πέμπτη ενότητα τυποποιεί το αβέβαιο περιβάλλον στο οποίο λειτουργεί η επιχείρηση ηλεκτροπαραγωγής και προσδιορίζει τις εξωγενείς παραμέτρους που αυτή αντιμετωπίζει οι οποίες παρουσιάζουν αβεβαιότητα ως προς την μελλοντική εξέλιξη των τιμών τους.

Η έκτη ενότητα παρουσιάζει τη θεωρία λήψης απόφασης σε περιβάλλον με αβεβαιότητα. Επίσης, παρουσιάζει το θεώρημα της αναμενόμενης χρησιμότητας και τις μετρικές εκτίμησης της συμπεριφοράς του αποφασίζοντα σε σχέση με τον κίνδυνο.

Στη συνέχεια αναπτύσσονται τα υποδείγματα του ηλεκτρικού τομέα υπό διάφορες συνθήκες αβεβαιότητας και προτείνεται η μέτρηση της αξίας του κινδύνου με διάφορες μεθόδους.

Η έβδομη ενότητα εφαρμόζει την παραδοσιακή μέθοδο της αναμενόμενης τιμής και μορφοποιεί μοντέλο του ηλεκτρικού τομέα.

Η όγδοη ενότητα εφαρμόζει την προσέγγιση του Markowitz σχετικά με τη μορφοποίηση της αξίας του κινδύνου και μορφοποιεί μοντέλο του ηλεκτρικού τομέα.

Η ένατη ενότητα μορφοποιεί μοντέλο με αντικειμενική συνάρτηση την μεγιστοποίηση πιθανότητας αποφυγής ζημίας, αποδεικνύει μαθηματικά την μορφοποίηση του ισοδύναμου αιτιοκρατικού μοντέλου και το εφαρμόζει για τον ηλεκτρικό τομέα.

Η δέκατη ενότητα εφαρμόζει τη θεωρία του κινδύνου με βάση τη θεωρία της αξίας σε κίνδυνο και την εφαρμόζει σε μοντέλο του ηλεκτρικού τομέα. Στη συνέχεια, παρουσιάζει την επέκταση της μεθόδου αυτής, την επονομαζόμενη Αναμενόμενη Αξία σε Κίνδυνο, γίνεται σύγκριση των δύο αυτών μεθόδων καθώς και σύγκριση των μεθόδων αυτών με την προσέγγιση του Markowitz.

Η ενδέκατη ενότητα μορφοποιεί το μοντέλο του ηλεκτρικού τομέα ως στοχαστική βελτιστοποίηση και το επιλύει ως Bayesian system.

Η δωδέκατη ενότητα εφαρμόζει τη μεθοδολογία αξιολόγησης των επενδύσεων με τη μέθοδο των δικαιωμάτων προαίρεσης, την επεκτείνει και την ενσωματώνει σε μοντέλο βέλτιστης ανάπτυξης ηλεκτροπαραγωγής.

Η δέκατη τρίτη ενότητα παρουσιάζει τα αριθμητικά αποτελέσματα της εφαρμογής των μοντέλων για διάφορες χώρες της Ε.Ε., παρουσιάζει σύγκριση των διαφόρων μεθόδων και μοντέλων και πραγματοποιεί ανάλυση ευαισθησίας.

Η δέκατη τέταρτη ενότητα παρουσιάζει τα συμπεράσματα σχετικά με τις διαφορετικές μεθόδους ενσωμάτωσης της αβεβαιότητας σε μοντέλο αναπαράστασης της ηλεκτροπαραγωγής και της βέλτιστης επέκτασής τους στο μέλλον. Προτείνονται επίσης, θέματα περαιτέρω έρευνας για την βελτίωση της μεθοδολογίας.

Η διατριβή περιλαμβάνει κατάλογο βιβλιογραφικών αναφορών που χρησιμοποιήθηκαν κατά τη διεξαγωγή της έρευνας αυτής.

#### 1.4 Πρωτοτυπία – Συνεισφορά διατριβής

Η κύρια πρωτότυπη συνεισφορά της διατριβής έγκειται στην ενσωμάτωση της αναπαράστασης της αβεβαιότητας και των επιχειρηματικών αποφάσεων υπό καθεστώς έντονης αποφυγής κινδύνου σε πλήρες μοντέλο προσομοίωσης της λειτουργίας και μακροχρόνιας επέκτασης της αγοράς και συστήματος ηλεκτροπαραγωγής διασυνδεδεμένων χωρών. Στην πολύ πρόσφατη βιβλιογραφία αναφέρονται σημαντικές προσπάθειες στην ίδια κατεύθυνση, αλλά ουδεμία από αυτές επικεντρώθηκε στη μοντελοποίηση επενδυτικών αποφάσεων στο πλαίσιο έντονης αποφυγής κινδύνου και των επιπτώσεων τέτοιων συμπεριφορών στο πλαίσιο της αγοράς και του συστήματος. Επίσης δεν αναφέρεται στη βιβλιογραφία έρευνα συστηματικής σύγκρισης εναλλακτικών μεθοδολογιών μοντελοποίησης αβεβαιότητας, τουλάχιστον στην έκταση στην οποία υλοποιήθηκε στην διατριβή. Τα επιμέρους στοιχεία της πρωτότυπης συνεισφοράς έχουν ως εξής:

##### *Ανάπτυξη Μεθοδολογίας- Μοντελοποίηση*

- Μοντελοποίηση βέλτιστης ανάπτυξης συστήματος ηλεκτροπαραγωγής όπου οι αποφάσεις των επιχειρήσεων έχουν ως αντικειμενικό στόχο τη μεγιστοποίηση της πιθανότητας αποφυγής ζημίας
- Μοντελοποίηση βέλτιστης ανάπτυξης συστήματος ηλεκτροπαραγωγής όπου οι αποφάσεις των επιχειρήσεων έχουν ως αντικειμενικό στόχο τη μείωση του κινδύνου που υπολογίζεται σύμφωνα με τη θεωρία της αξίας σε κίνδυνο
- Μοντελοποίηση βέλτιστης ανάπτυξης συστήματος ηλεκτροπαραγωγής όπου οι αποφάσεις των επιχειρήσεων έχουν ως αντικειμενικό στόχο τη μείωση του κινδύνου σύμφωνα με την θεωρία του Markowitz
- Μοντελοποίηση βέλτιστης ανάπτυξης συστήματος ηλεκτροπαραγωγής όπου οι αποφάσεις των επιχειρήσεων έχουν ως αντικειμενικό στόχο την αποτίμηση της αξίας των υποψηφίων επενδύσεων με βάση τη μέθοδο των δικαιωμάτων προαίρεσης, όπου ο υπολογισμός της αξίας της επένδυσης ή της λειτουργίας

κάθε σταθμού γίνεται ενδογενώς στο μοντέλο στο πλαίσιο λειτουργίας του συστήματος στο μέλλον

- Μοντελοποίηση βέλτιστης ανάπτυξης συστήματος ηλεκτροπαραγωγής ως πρόβλημα στοχαστικής βελτιστοποίησης δύο σταδίων όπου οι επενδυτικές αποφάσεις για το μεσοπρόθεσμο ορίζονται αποφασίζονται σε έντονα αβέβαιο περιβάλλον ενώ οι αποφάσεις για τις επενδύσεις σε μακροχρόνιο ορίζονται λαμβάνονται αφότου μέρος της αβεβαιότητας έχει αρθεί και η επιχείρηση έχει την δυνατότητα να προσαρμοστεί στην κατάσταση της φύσης που έχει πραγματοποιηθεί
- Μορφοποίηση και επίλυση όλων των ως άνω μοντέλων υπό συνθήκες ολιγοπωλίου Nash – Cournot και υπό συνθήκες τέλει ανταγωνισμού
- Σύγκριση των αποτελεσμάτων από την επίλυση των ως άνω μοντέλων και ανάλυση ευαισθησίας υπό διαφορετικές υποθέσεις και για πολλές χώρες της ΕΕ.

## 1.5 Μελλοντικές προοπτικές

Με βάση την εμπειρία της έρευνας, προτείνονται συνοπτικά τα εξής θέματα για περαιτέρω έρευνα:

1. Σε ένα περιβάλλον με αβεβαιότητα οι αποφάσεις για τις επενδύσεις και τη λειτουργία των σταθμών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας επηρεάζονται από τα στοχαστικά μεγέθη. Η θεώρηση επιπλέον παραμέτρων του υποδείγματος ως αβέβαιες, όπως για παράδειγμα το κεφαλαιουχικό κόστος, θα ενσωματώσει πληρέστερα την αβεβαιότητα του περιβάλλοντος στην προσομοίωση της αγοράς. Επίσης, δεδομένου ότι υπάρχει μεγάλη αβεβαιότητα στις τιμές των εισαγόμενων ποσοτήτων ενέργειας θα μπορούσαν να προσομοιαστούν στοχαστικά οι τιμές των εισαγωγών ώστε να συνεκτιμηθεί η επίδρασή τους στη βελτιστοποίηση του συστήματος.
2. Στην παρούσα διατριβή έγινε η θεώρηση πως οι τιμές των πιθανοτικών μεγεθών ακολουθούν κανονικές κατανομές ή τη στοχαστική ανέλιξη γεωμετρική κίνηση Brown. Η επιλογή ασύμμετρων κατανομών όπως η λογαριθμική κανονική κατανομή (lognormal) ή στοχαστικών ανεξίτητων με τάση επαναφοράς προς τη μέση τιμή (mean-reverting), όπως η ανέλιξη Ornstein – Uhlenbeck, για την προσομοίωση των τιμών των πιθανοτικών παραμέτρων θα επιτρέψει ένα διαφοροποιημένο φάσμα πιθανών επενδυτικών επιλογών και επιλογών λειτουργίας.



3. Κατά την αξιολόγηση με επενδυτικά δικαιώματα προαίρεσης προκύπτουν αποτελέσματα για το κατά πόσο μια επένδυση θα είναι συμφέρουσα ή όχι στο μέλλον. Στην περίπτωση που στο ίδιο ενεργειακό σύστημα συνδέονται πολλοί παραγωγοί, όπως συμβαίνει και στην πραγματικότητα, όταν προκύπτει για κάποιο έτος πως μια συγκεκριμένου τύπου μονάδα (πχ. λιγνιτική) δεν είναι επικερδής, τότε αναμένεται να αποφασίσουν πολλοί παραγωγοί να στραφούν σε άλλες (πχ. συνδυασμένου κύκλου). Τότε, λόγω αυξημένης ζήτησης η τιμή του φυσικού αερίου αναμένεται να αυξηθεί, με αποτέλεσμα οι παραγωγοί να στραφούν σε μονάδες με χαμηλά κόστη, όπως θα είναι πλέον οι λιγνιτικές (λόγω έλλειψης ζήτησης). Η διαδικασία αυτή ενδέχεται να συνεχιστεί, προκαλώντας το σύστημα σε παλινδρόμηση. Θα αποτελούσε σημαντική επέκταση της παρούσας διατριβής η διερεύνηση του τρόπου με τον οποίο το σύστημα μπορεί να έλθει εν τέλει σε ισορροπία. Επιπρόσθετα, η ίδια επέκταση θα μπορούσε να διερευνηθεί και να μελετηθεί πώς θα συμπεριφερόταν το σύστημα στην περίπτωση όπου επιβαλλόταν επιπλέον μια externality value – «πρόστιμο» που επιβαρύνει τις μονάδες που δεν λειτουργούν όταν δεν καλύπτεται η ζήτηση.



## Κεφάλαιο 2

### 2 Βιβλιογραφία - Ιστορική αναδρομή

---

#### 2.1 Σύντομο ιστορικό

##### 2.1.1 Μέθοδοι αξιολόγησης κινδύνου

Κατά τη βελτιστοποίηση του ενεργειακού σχεδιασμού ενός συστήματος επιλέγεται το βέλτιστο – πιο αποδοτικό χαρτοφυλάκιο επενδύσεων. Μία σημαντική πλευρά των αποδοτικών κατά pareto χαρτοφυλακίων επενδύσεων είναι ότι κάθε ένα βελτιστοποιεί την ανατεθειμένη von Neumann – Morgenstern συνάρτηση χρησιμότητας (von Neumann & Morgenstern, 1944) για κάθε ενδεχόμενο και βελτιστοποιεί την αναμενόμενη χρησιμότητα (expected utility) των χρηματικών αποτελεσμάτων (του κέρδους) που θα προκύψουν από τις επενδύσεις. Στην οικονομική θεωρία ως αποτέλεσμα της χρήσης συναρτήσεων χρησιμότητας άρχισαν να αναπτύσσονται συγκεκριμένοι μέθοδοι συμπεριφοράς προς τον κίνδυνο είτε αποφυγής είτε επιρρέπειας.

Η θεωρία αναμενόμενης χρησιμότητας και μέθοδοι αποφυγής του κινδύνου καθώς και εφαρμογές τους έχουν μελετηθεί από τους (Tobin, The theory of portfolio selection, 1965), (Mossin J. , 1968), (Hanoach & Levy, 1969), (Levy & Markowitz, 1979), (Kallberg & Ziemba, 1983), (Kroll, Levy, & Markowitz, Mean-variance versus direct utility maximization , 1984), (Jewitt, Choosing between risky prospects: The characterization of comparative statistics results, and location independent risk, 1989), (Jewitt, Risk aversion and the choice between risky prospects: The preservation of comparative statistics results, 1987), (King & Jensen, 1992), (Kijima & Ohnishi, 1993), (Kroll, Leshno, Levy, & Spector, 1995).

Σε διάφορα υποδείγματα μελετάται η βελτιστοποίηση του κέρδους σε συνδυασμό με κάποιο μέτρο κινδύνου, όπως είναι η διακύμανση. Η θεωρία στηρίχτηκε στο γεγονός ότι

οι περισσότεροι αποφασίζοντας προσπαθούν να αποφύγουν τον κίνδυνο και επιλέγουν επιλογές με σχετικά μικρό αναμενόμενο κέρδος και μικρή διακύμανση σε σχέση με επιλογές οι οποίες έχουν μεγάλο αναμενόμενο κέρδος με μεγαλύτερη όμως διακύμανση. Συνεπώς η επιλογή ενός χαρτοφυλακίου κρίνεται στην ισορροπία μεταξύ του αναμενόμενου κέρδους – αποτελέσματος και της βεβαιότητας/αβεβαιότητας ως προς την πραγματοποίησή του.

Τα υποδείγματα αξιολόγησης κινδύνου αυτής της κατηγορίας έχουν προκύψει από την θεμελιώδη εργασία του Harry Markowitz (Markowitz, Portfolio selection, 1952; Markowitz, Portfolio Selection: Efficient Diversification of Investments, 1959). Ο Markowitz προσπάθησε να συνδυάσει την βελτιστοποίηση της αναμενόμενης τιμής με τον συνεπαγόμενο κίνδυνο ώστε να βρει το βέλτιστο χαρτοφυλάκιο το οποίο ανταποκρίνεται στις προτιμήσεις του επενδυτή σχετικά με το αναμενόμενο κέρδος και τον επακόλουθο κίνδυνο. Σε αυτά τα υποδείγματα στην αντικειμενική συνάρτηση χρησιμοποιούνται η μέση τιμή και η διακύμανση ή η τυπική απόκλιση της κατανομής του προς αξιολόγηση μεγέθους ως μέτρα του κινδύνου (mean variance models) με διάφορες εκδοχές ως προς την βαρύτητα/σημαντικότητα του κινδύνου. Όταν στην αντικειμενική συνάρτηση δίνεται μεγάλη έμφαση στην ελαχιστοποίηση του κινδύνου, τα αποτελέσματα τείνουν να είναι πιο απαισιόδοξα (Steinbach, 2001). Ο H. Markowitz μελέτησε επιπλέον τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα της αντικατάστασης της διακύμανσης από άλλα μέτρα αξιολόγησης του κινδύνου, όπως από την τυπική απόκλιση ή την «ημιαπόκλιση» (semideviation) (Markowitz, Portfolio Selection: Efficient Diversification of Investments, 1959)

Ο H. Markowitz με τη θεωρία αυτή έθεσε τις βάσεις για την «Σύγχρονη Θεωρία Χαρτοφυλακίου» (Modern Portfolio Theory – MPT), η οποία επεκτάθηκε με την εργασία του Sharpe το 1963 (Sharpe, A Simplified Model for Portfolio Analysis, 1963), ο οποίος εισήγαγε ένα απλοποιημένο υπόδειγμα, το αποκαλούμενο «διαγώνιο» (diagonal ή single-index), το οποίο μείωσε κατά μεγάλο βαθμό τις υπολογιστικές απαιτήσεις επίλυσης των υποδειγμάτων αξιολόγησης κινδύνου με χρήση της μέσης τιμής και της διακύμανσης. Ωστόσο, η πιο σημαντική επέκταση της θεωρίας χαρτοφυλακίων πραγματοποιήθηκε από τον Sharpe το 1964 (Sharpe, Capital Asset Prices: A Theory of Market Equilibrium under Conditions of Risk, 1964), ο οποίος ανέπτυξε το «Υπόδειγμα Αποτίμησης Περιουσιακών Στοιχείων» (Capital Asset Pricing Model – CAPM). Ακολούθως, στη διαμόρφωση του τελικού υποδείγματος συνεισέφεραν και οι εργασίες των John Lintner (Lintner, 1965), Jan Mossin (Mossin J., 1966) και Eugene Fama (Fama E. F., 1968).

Μια διαφορετική προσέγγιση που αναπτύχθηκε παράλληλα με τα υποδείγματα αυτά και προερχόταν επίσης από τη θεμελιώδη εργασία των von Neumann – Morgenstern καθορίζει συναρτήσεις χρησιμότητας οι οποίες προσομοιάζουν την αποφυγή του

κινδύνου με την έννοια κατωφλίου. Στις προσεγγίσεις αυτές η συμπεριφορά του αποφασίζοντα εκδηλώνεται μέσω της αποστροφής προς τον κίνδυνο ο οποίος καθορίζει ένα ανώτατο αποδεκτό κατώφλι για τον κίνδυνο (Pratt, 1964). Οι εναλλακτικές επιλογές που παρουσιάζουν μεγαλύτερη αβεβαιότητα από το όριο αυτό απορρίπτονται. Από τις πρώτες εργασίες με τη μέθοδο αυτή ήταν των (Lewellen, 1977; Allais & Hagan, 1979; Kahneman & Tversky, 1979; Binswanger, 1980).

Οι (Smith & Walker, 1993) κατέληξαν ότι η συνάρτηση χρησιμότητας που χαρακτηρίζει του επενδυτές έχει ως χαρακτηριστικό ότι το μέγεθος της ποσότητας που είναι αβέβαιη είναι ανάλογο της αποστροφής προς τον κίνδυνο, με την έννοια πως όσο πιο αβέβαιο ήταν το αποτέλεσμα τόσο μεγαλύτερη αποστροφή προς τον κίνδυνο έδειχνε ο αποφασίζων. Παρόμοια αποτελέσματα σε ένα πείραμα επιλογής λαχνού, οι (Holt & Laury, 2002) παρουσιάζουν πως η αποστροφή προς το κίνδυνο αυξανόταν όσο αυξανόταν το ποσό που διακυβευόταν. Στα ενεργειακά υποδείγματα όπου ο αποφασίζων αποστρέφεται τον κίνδυνο με την έννοια ότι θέλει να διατηρήσει την θέση στην απελευθερωμένη αγορά, επιλέγει επενδύσεις με μικρό κέρδος όταν είναι σχετικά βέβαιο να επιτευχθεί σε σχέση με επενδύσεις οι οποίες παρουσιάζουν μεγαλύτερη αβεβαιότητα ως προς το οικονομικό τους αποτέλεσμα. Μελέτες αυτής της μεθοδολογίας οι οποίες περιλαμβάνουν ομάδα αποφασιζόντων οι οποίοι αποστρέφονται τον κίνδυνο (collective risk aversion) διενεργήθηκαν από τους (Nocetti, Jouini, & Napp, 2008; Jouini, Napp, & Nocetti, 2013).

Άλλες προσεγγίσεις της αξιολόγησης του κινδύνου καθορίζουν von Neumann – Morgenstern συναρτήσεις χρησιμότητας ώστε να μελετούν κομμάτι της «ουράς» της κατανομής και όχι ολόκληρη την κατανομή του εξεταζόμενου μεγέθους. Η βασική έννοια που αναπτύχθηκε στο πλαίσιο αυτό είναι η Αξία σε Κίνδυνο.

Η έννοια της Αξίας σε Κίνδυνο αναπτύχθηκε κατά τη διάρκεια των δεκαετιών του 1970 και του 1980, όταν ορισμένα χρηματοπιστωτικά ιδρύματα ξεκίνησαν τη μελέτη εσωτερικών μοντέλων για τη μέτρηση του κινδύνου συνολικά. Με τη δημοσίευση του συστήματος RiskMetrics™ για τη μέτρηση του κινδύνου της αγοράς από την JP Morgan το 1996 (Morgan, 1996), η έννοια της Αξίας σε Κίνδυνο απέκτησε αυξανόμενη αποδοχή και πλέον θεωρείται πρότυπο εργαλείο για τη μέτρηση του κινδύνου της αγοράς (Ammann & Reich, 2001).

Η κατανομή που θεωρείται ότι ακολουθούν τα πιθανοτικά μεγέθη επιδρά σημαντικά στον υπολογισμό της Αξίας σε Κίνδυνο (Bams & Wielhouwer, 2001). Στις περισσότερες περιπτώσεις αξιολόγησης του κινδύνου με χρήση της μεθόδου υπολογισμού της Αξίας σε Κίνδυνο, τα πιθανοτικά μεγέθη θεωρούνται ότι ακολουθούν κανονική κατανομή (normal distribution) ή λογαριθμική κανονική κατανομή (lognormal distribution) (Beder,

1995; Stambaugh, 1996; Jorion, 1996; Pritsker, 1997; Embrechts, Kluppelberg, & Mikosh, 1997; Duffie & Pan, 1997; Lucas & Klaasen, 1998; Rockafellar & Uryasev, Optimization of Conditional Value-at-Risk, 2000). Η κανονική κατανομή θεωρείται ότι δίνει μικρότερη βαρύτητα στην «ουρά» και συνεπώς υποτιμά το αποτέλεσμα της Αξίας σε Κίνδυνο (Sarykalin, Serraino, & Uryasev, 2008). Για το λόγο αυτό, τα τελευταία χρόνια μελετάται η μεθοδολογία της με χρήση διαφορετικών κατανομών, οι οποίες δίνουν μεγαλύτερη έμφαση στη συμπεριφορά της «ουράς» της κατανομής. Συνήθεις εναλλακτικές προσεγγίσεις είναι η χρήση των μοντέλων Generalized AutoRegressive Conditional Heteroskedasticity (GARCH models) που επιτρέπουν τη θεώρηση μεταβαλλόμενης με το χρόνο μεταβλητότητας (Bollerslev, Engle, & Nelson, 1994) και η χρήση των Student-t κατανομών. Μελέτες υποδειγμάτων βελτιστοποίησης που αξιολογούν τον κίνδυνο χρησιμοποιώντας την Αξία σε Κίνδυνο έχουν πραγματοποιηθεί από τους (Litterman, Hot Spots and Hedges (I), 1997; Litterman, Hot Spots and Hedges (II), 1997; Kast, Luciano, & Peccati, 1998; Lucas & Klaasen, 1998).

Επέκταση της μεθοδολογίας αυτής αποτελεί η μέθοδος αξιολόγησης του κινδύνου με χρήσης της Αναμενόμενης Αξίας σε Κίνδυνο. Η έννοια της Αναμενόμενης Αξίας σε Κίνδυνο αναπτύχθηκε από τους (Rockafellar & Uryasev, Optimization of Conditional Value-at-Risk, 2000). Μελέτες υποδειγμάτων όπου η αξιολόγηση του κινδύνου γίνεται με χρήση της Αναμενόμενης Αξίας σε Κίνδυνο έχουν πραγματοποιηθεί από τους (Topaloglou, Vladimirov, & Zenios, 2002; Prekopa, 2003; Kall & Mayer, 2005), ενώ οι (Andersson, Mausser, Rosen, & Uryasev, 2001) μελέτησαν υπόδειγμα ενός σταδίου στο οποίο γινόταν αξιολόγηση του κινδύνου με τη μέθοδο αυτή.

Υποδείγματα με χρήση της μεθόδου αυτής τα οποία στηρίζονται στις αρχές του δυναμικού προγραμματισμού έχουν αναπτυχθεί από τους (Krokhmal, Palmquist, & Uryasev, 2002; Rockafellar & Uryasev, Conditional value-at-risk for general loss distributions, 2002). Υποδείγματα πολλών σταδίων αναπτύχθηκαν από τους (Topaloglou N., A stochastic programming framework for international portfolio management, 2004; Topaloglou, Vladimirov, & Zenios, A dynamic stochastic programming model for international portfolio management, 2008; Csaba, 2008).

Οι von Neumann – Morgenstern με την εργασία τους (von Neumann & Morgenstern, 1944) έθεσαν τα θεμέλια για να αναπτυχθεί η Σύγχρονη Θεωρία Χαρτοφυλακίου καθώς και διάφοροι μέθοδοι αξιολόγησης του κινδύνου, ωστόσο εφαρμογές της θεωρίας αυτής σε υποδείγματα μελέτης του ηλεκτρικού τομέα ξεκίνησε αρκετά αργότερα από τον (Jorgenson, 1963). Συνοπτικά, η εργασία του βασίστηκε στην νεοκλασική θεωρία της βέλτιστης κεφαλαιακής συσσώρευσης (neoclassical theory of optimal capital accumulation). Ο (Tobin, A General Equilibrium Approach to Monetary Theory, 1969) ανέπτυξε μια παρόμοια προσέγγιση, την επονομαζόμενη «q-θεωρία» (q-theory).

Ωστόσο, και στις δύο προσεγγίσεις δεν λαμβάνονται υπόψη τα κόστη προσαρμογής. Το γεγονός αυτό αποτελεί σημαντικό μειονέκτημα εάν ληφθεί υπόψη ότι οι επενδύσεις είναι συχνά μεγάλες και συνήθως μη αναστρέψιμες σε τομείς όπως ο τομέας της ηλεκτρικής ενέργειας. Επίσης, αγνοούν το γεγονός ότι οι περισσότερες βιομηχανίες εμφανίζουν συγκεκριμένη δυναμική, η οποία δεν μπορεί να ληφθεί υπόψη σε πλαίσια που είναι εγγενώς στατικά. Επιπλέον, τα υποδείγματα αυτά δεν λαμβάνουν υπόψη τους τις επιδράσεις της αβεβαιότητας κατά τον ενεργειακό σχεδιασμό, καθώς αποτελούν και τα δύο αιτιοκρατικά υποδείγματα.

Μελέτες που ακολούθησαν, όπως του (Sandmo, 1971), και (Leland, 1972), ενσωματώνουν την αβεβαιότητα και αναλύουν τις επιδράσεις στις τιμές αγοράς του ηλεκτρισμού και τις παραγόμενες ποσότητες. Και αυτές οι μελέτες ωστόσο δεν συμπεριλαμβάνουν το γεγονός της μη αναστρεψιμότητας των επενδύσεων.

Οι περισσότερες μελέτες που είχαν αναπτυχθεί έως τότε λάμβαναν υπόψη την αβεβαιότητα σε κάποιες παραμέτρους των υποδειγμάτων όπως το κεφαλαιουχικό κόστος, η ζήτηση ή το κόστος των καυσίμων. Σε κάποιες μελέτες ωστόσο, δεν γινόταν αξιολόγηση του κινδύνου μέσω της αξιολόγησης της πιθανοτικής κατανομής του οικονομικού αποτελέσματος από τις επενδύσεις συνολικά για την επιχείρηση αλλά γινόταν αξιολόγηση κάθε επένδυσης χωριστά. Στις μελέτες αυτές η συμβατική μέθοδος αξιολόγησης της επένδυσης αποτελούσε η μέθοδος της Καθαρής Παρούσας Αξίας (ΚΠΑ). Εντούτοις η μέθοδος αυτή δεν λαμβάνει υπόψη χαρακτηριστικά του τομέα ηλεκτρικής ενέργειας όπως η μη αναστρεψιμότητα των επενδύσεων και η δυνατότητα αναβολής μιας επένδυσης σε αβέβαιο περιβάλλον αλλά αντιμετωπίζει τις επενδύσεις σαν επιλογές «τώρα ή ποτέ». Για την ενσωμάτωση των χαρακτηριστικών αυτών κατά τους υπολογισμούς πρέπει να βρεθεί η αξία του δικαιώματος επένδυσης και να συμπεριληφθεί στην μεθοδολογία της Καθαρής Παρούσας Αξίας. Το δικαίωμα αυτό αναφέρεται στην επιλογή του αποφασίζοντα να επενδύσει και όχι στην υποχρέωσή του. Του δίνει με άλλα λόγια την επιλογή να αποφασίσει εάν θα πραγματοποιήσει μια επένδυση «τώρα» ή θα αναβάλλει την απόφαση αυτή για το μέλλον όταν υποθέτουμε ότι θα έχει αρθεί μέρος της αβεβαιότητας ή θα έχει περισσότερες πληροφορίες σχετικά με την εξέλιξη των τιμών του αβέβαιου μεγέθους. Επειδή το δικαίωμα αφορά την πραγματοποίηση ενός φυσικού πραγματικού αντικειμένου όπως είναι ένας σταθμός ηλεκτροπαραγωγής για τον λόγο αυτό αναφέρεται ως «πραγματικό δικαίωμα» (real option).

Τις βάσεις για την ανάπτυξη της θεωρίας αυτής έθεσαν οι εργασίες των (Black & Scholes, 1973) και (Merton R. C., 1973). Τη σημασία της μη αναστρεψιμότητας μιας ενέργειας μελέτησαν επιπλέον οι (Arrow & Fisher, 1974) οι οποίοι στην εργασία τους εξετάζουν περιβαλλοντικές ενέργειες, και η μη αναστρεψιμότητα έγκειται σε πιθανή μόλυνση του

περιβάλλοντος που αυτές συνεπάγονται. Ομοίως, ο (Henry, 1974) εξέτασε την «επίδραση της μη αναστρεψιμότητας» στην αξιολόγηση επενδύσεων, δηλαδή πως επενδύσεις οι οποίες αξιολογούνταν ως επικερδείς με τη συμβατική μέθοδο, αξιολογούνταν ως ζημιогόνες όταν συμπεριλαμβάνονταν στους υπολογισμούς η μη αναστρεψιμότητά τους και η συνεπαγόμενη αξία του δικαιώματος αναβολής της επένδυσης. Η επίδραση της μη αναστρεψιμότητας είναι μεγαλύτερη όταν η αβεβαιότητα είναι αυξημένη.

Ο όρος «δικαίωμα προαίρεσης» ή «πραγματικό δικαίωμα» (real option) αναφέρθηκε πρώτη φορά από τον (Myers, 1977), ο οποίος μελέτησε τις ευκαιρίες για πραγματοποίηση μιας επένδυσης στα Αμερικάνικα δικαιώματα (American call options) και κατέληξε στο συμπέρασμα πως η δυνατότητα αναβολής λήψης μιας απόφασης δίνει τη δυνατότητα για πιο επικερδή επένδυση.

Υποδείγματα στα οποία οι επενδύσεις αξιολογούνται με τη μέθοδο των δικαιωμάτων προαίρεσης αναπτύχθηκαν από τους (Pindyck R. S., 1980), (Brennan & Schwartz, 1985), (Mcdonald & Siegel, 1986), και (Majd & R., 1987).

Στην περαιτέρω μελέτη και ανάπτυξη της θεωρίας αυτής συνέβαλαν οι εργασίες του Pindyck [ (Pindyck R. , Irreversible Investment, Capacity Choice and the Value of the firm, 1988) και (Pindyck R. , Irreversibility, Uncertainty and Investment, 1991)]. Στην πρώτη εργασία ο Pindyck μελετά σε διακριτό χρόνο το δικαίωμα μιας επιχείρησης να πραγματοποιήσει μια επένδυση όταν η ζητούμενη ενέργεια είναι αβέβαιη αλλά ταυτόχρονα υπάρχει η δυνατότητα για την επιχείρηση να πραγματοποιήσει επενδύσεις σε μικρότερες από την άποψη της εγκατεστημένης ισχύος μονάδες σε σχέση με μία και μεγαλύτερη μονάδα και να τις επεκτείνει σε μεταγενέστερο χρόνο. Κατέληξε πως η αβεβαιότητα ως προς την εξέλιξη της ζήτησης αφενός αυξάνει την οριακή αξία της ισχύος του σταθμού που θα εγκατασταθεί αλλά ταυτόχρονα αυξάνει και την αξία των δικαιωμάτων της επιχείρησης να επενδύσει, δεδομένου ότι η πραγματοποίηση μιας μη αναστρέψιμης επένδυσης γίνεται όλο και πιο δαπανηρή από την άποψη του κόστους ευκαιρίας για την άσκηση αυτού του δικαιώματος. Η επίδραση αυτή είναι ωστόσο μεγαλύτερη και για τον λόγο αυτό η ισχύς που θα αποφασίσει η επιχείρηση να κατασκευάσει μειώνεται σε περιβάλλον υπό καθεστώς αβεβαιότητας. Στην ίδια εργασία αναφέρθηκε πρώτη φορά ο όρος «δικαίωμα επέκτασης» (growth option) για ένα δικαίωμα που έχει η επιχείρηση να αυξήσει την εγκατεστημένη ισχύ ενός σταθμού σε μετέπειτα χρόνο. Όπως μελετά εκτενέστερα και στην επόμενη εργασία του (Pindyck R. , Irreversibility, Uncertainty and Investment, 1991) τα δικαιώματα επέκτασης είναι πολύ σημαντικά για μια επιχείρηση δεδομένου ότι μπορεί να μειώσει την αβεβαιότητα ως προς τα κέρδη της με την πραγματοποίηση αρχικά μιας μικρής επένδυσης σε περιβάλλον με μεγάλη αβεβαιότητα και την επέκτασή του καθώς η αβεβαιότητα μειώνεται. Αποτελεί



έναν τρόπο αντιστάθμισης του κινδύνου που αντιμετωπίζει. Ωστόσο και στις δύο εργασίες του θεώρησε πως η αβεβαιότητα που αντιμετωπίζει η επιχείρηση αφορά μόνο στην ζητούμενη ποσότητα ενέργειας.

Η θεωρία των δικαιωμάτων προαίρεσης επεκτάθηκε περαιτέρω από τον Leahy (Leahy, 1993) ο οποίος έδειξε πως η βέλτιστη στρατηγική μιας επιχείρησης που λειτουργεί στην αγορά υπό καθεστώς ανταγωνισμού ακολουθεί μυωπική συμπεριφορά (myopic behavior). Αγορές υπό καθεστώς ολιγοπωλίου μελετήθηκαν από τους (Slade, 1994), (Baldursson, Irreversible investment under uncertainty in oligopoly, 1998), (Baldursson & Karatzas, Irreversible investment and industry equilibrium, 1997). Ο (Grenadier, 2002) απέδειξε πως τα επιχειρήματα του Leahy για μυωπική συμπεριφορά ισχύουν και σε αγορές υπό καθεστώς συμμετρικού ολιγοπωλίου Cournot.

### 2.1.2 Περίοδοι επίλυσης των υποδειγμάτων

Η Σύγχρονη Θεωρία Χαρτοφυλακίου όπως διαμορφώθηκε από τον Markowitz στηριζόμενος στην εργασία των von Neumann – Morgenstern θεωρεί το χρόνο της επένδυσης ως μια ενιαία περίοδο κατά την οποία οι παράμετροι της πιθανοτικής κατανομής του κέρδους της είναι γνωστές με βεβαιότητα και αμετάβλητες. Το μέλλον θεωρείται ως μία περίοδος (single period) η οποία έχει αρχή το παρόν έτος και τελειώνει σε κάποια άγνωστη στιγμή στο μέλλον.

Σε άλλες προσεγγίσεις η εξεταζόμενη περίοδος δεν αποτελεί ένα στάδιο για τη μελέτη αλλά δύο ή περισσότερα. Οι (Cheng, Subrahmanian, & Westerberg, 2003) ανέπτυξαν υπόδειγμα δύο σταδίων με πολλές αντικειμενικές συναρτήσεις το οποίο στηρίζεται στις αρχές του δυναμικού προγραμματισμού για την μελέτη του σχεδιασμού ενός αντιδραστήρα λαμβάνοντας υπόψιν την πιθανότητα εμφάνισης καλύτερης τεχνολογίας στο μέλλον.

Στην ανάπτυξη των μοντέλων πολλών περιόδων και συνεχούς χρόνου συνέβαλε επίσης η χρήση δυναμικού προγραμματισμού και η επέκτασή του στην επίλυση στοχαστικών διαφορικών εξισώσεων. Δεδομένου ότι η επίλυση μαθηματικών υποδειγμάτων με χρήση της τεχνικής του δυναμικού προγραμματισμού χρειάζεται μεγάλες προγραμματιστικές δυνατότητες, οι εφαρμογές του περιορίστηκαν αρχικά σε απλά δομικά προβλήματα (Markowitz, Portfolio Selection: Efficient Diversification of Investments, 1959), (Mossin J., 1968), (Samuelson, 1969), (Fama E. F., 1970) και σε συνεχές χρόνο του Merton (Merton R. C., 1971).

Την δεκαετία του 90 κι έπειτα, έγινε εφικτή η επίλυση υποδειγμάτων μεγάλης κλίμακας και ειδικότερα υποδειγμάτων πολλών επιπέδων, χάρη στην ανάπτυξη των υπολογιστών

και του λογισμικού, γεγονός που βοήθησε στην περαιτέρω μελέτη τους (Perold, 1984; Mulvey, *Nonlinear network models in finance*, 1987; Dempster, 1988; Glover & Jones, 1988; Mulvey & Vladimirov, *Stochastic network optimization models for investment planning*, 1989; Dantzig & Infanger, 1993; Carino, et al., 1994; Consigli & Dempster, 1997; Beltratti, Consiglio, & Zenios, 1999; Gondzio & Kouwenberg, 2001) και (Wei & Ye, 2007).

### 2.1.3 Κατηγορίες υποδειγμάτων αναπαράστασης ενεργειακού συστήματος

Τα υποδείγματα αναπαράστασης και μελέτης ενός ενεργειακού συστήματος μπορούν να χωριστούν σε διάφορες κατηγορίες με βάση διαφορετικά κριτήρια. Κριτήρια κατηγοριοποίησής τους είναι η φύση των εξωγενών παραμέτρων του υποδείγματος, δηλαδή εάν όλες οι τιμές των εξωγενών παραμέτρων θεωρούνται γνωστές με βεβαιότητα ή όχι, η μέθοδος προσέγγισης του συστήματος, πιο συγκεκριμένα εάν το σύστημα προσεγγίζεται μικροσκοπικά ή μακροσκοπικά, και ο σκοπός επίλυσης του υποδείγματος, όπως για παράδειγμα εάν επιδιώκεται η πρόβλεψη των τιμών συγκεκριμένων μεγεθών ή ο μακροχρόνιος ενεργειακός σχεδιασμός του συστήματος.

#### 2.1.3.1 Κατηγορίες υποδειγμάτων σύμφωνα με τη φύση των εξωγενών παραμέτρων

Κατά τη βελτιστοποίηση του ενεργειακού σχεδιασμού ενός συστήματος, επιλέγεται το βέλτιστο μίγμα επενδύσεων σύμφωνα με τις εκτιμήσεις των επενδυτών για το μέλλον. Οι εκτιμήσεις των επενδυτών επηρεάζονται από τις τιμές των εξωγενών παραμέτρων που υπεισέρχονται στο υπόδειγμα. Τα υποδείγματα ενός ενεργειακού συστήματος διακρίνονται, ανάλογα με τη φύση των εξωγενών παραμέτρων τους, σε αιτιοκρατικά (ντετερμινιστικά) ή πιθανοτικά (στοχαστικά). Στα αιτιοκρατικά μοντέλα όλες οι εξωγενείς παράμετροι του προβλήματος θεωρούνται γνωστές με βεβαιότητα. Αντιθέτως, στα πιθανοτικά υποδείγματα οι τιμές μερικών εξωγενών παραμέτρων του υποδείγματος δεν θεωρούνται γνωστές με βεβαιότητα αλλά στις περιπτώσεις αυτές, εκτιμώνται ορισμένα χαρακτηριστικά είτε της κατανομής είτε της ανέλιξης που ακολουθούν με την χρήση οικονομετρικών μεθόδων.

Πριν την απελευθέρωση των αγορών ενέργειας, η βασική πρόκληση ήταν η πρόβλεψη της εξέλιξης της ζήτησης καθώς οποιαδήποτε αβεβαιότητα σχετικά με παραμέτρους κόστους παραγωγής του ηλεκτρισμού μπορούσε να ανακτηθεί από τις τιμές προσφοράς του. Υπόδειγμα πρόβλεψης της ζήτησης αναπτύχθηκε από τον Hahn (Hahn, Meyer-Nieberg, & Pickl, 2009). Με την απελευθέρωση των αγορών ηλεκτρισμού δημιουργείται η ανάγκη να μελετηθούν οι επιδράσεις στη μελλοντική εξέλιξη των τιμών διαφόρων παραμέτρων κόστους όπως είναι οι τιμές προσφοράς του ηλεκτρισμού, οι τιμές αγοράς

των καυσίμων (άνθρακα, πετρελαίου, φυσικού αερίου κ.α.) και οι τιμές αγοράς των δικαιωμάτων εκπομπών CO<sub>2</sub>. Στις περιπτώσεις αυτές, γίνεται η προσπάθεια εκτίμησης των μελλοντικών τιμών με διάφορους τρόπους, όπως είναι για παράδειγμα η ιστορική έρευνα ή η θεώρηση ότι ακολουθούν δεδομένη κατανομή.

Η πιο συνηθισμένη μέθοδος επίλυσης ενός πιθανοτικού υποδείγματος είναι η θεώρηση ότι τα πιθανοτικά μεγέθη ακολουθούν γνωστή κατανομή επί των οποίων γίνεται δειγματοληψία. Ακολούθως, επιλύεται το μοντέλο για κάθε δείγμα είτε χρησιμοποιώντας ένα πιθανοτικό δέντρο (probabilistic tree) είτε χρησιμοποιώντας προσομοίωση Monte Carlo. Τα αποτελέσματα κάθε σεναρίου χρησιμοποιούνται για τη διαμόρφωση κατανομών, οι οποίες μπορούν να αξιολογηθούν. Ιστορικά δεδομένα ή προσομοίωση Monte Carlo μπορούν να χρησιμοποιηθούν και στην περίπτωση που το χαρτοφυλάκιο περιλαμβάνει μη γραμμικά στοιχεία όπως για παράδειγμα δικαιώματα (options) (Bucay & Rosen, 1999), (Jorion, 1996), (Mausser & Rosen, 1998), (Pritsker, 1997), (Morgan, 1996), (Stambaugh, 1996).

Μελέτες αναφορικά με την ευαισθησία των αποτελεσμάτων της βελτιστοποίησης λαμβάνοντας υπόψιν τα περιθώρια σφάλματος έχουν διενεργηθεί από τους (Best & Grauer, Sensitivity analysis for mean-variance portfolio problems, 1991), (Jobson, 1991), (Broadie, 1993), (Chopra & Ziemba, 1993), (Best & Ding, On the continuity of the minimum in parametric quadratic programs, 1995), (MacLean & Weldon, 1996).

Κάποια υποδείγματα ωστόσο χρησιμοποιούν τα δείγματα και τις αντίστοιχες πιθανότητες τους απευθείας στον υπολογισμό της αντικειμενικής συνάρτησης. Είναι λοιπόν απαραίτητη η αξιολόγηση της πιθανοτικής κατανομής της αντικειμενικής συνάρτησης με χρήση διαφόρων μεθόδων. Με τη χρήση των μεθόδων αυτών γίνεται ουσιαστικά αξιολόγηση της αβεβαιότητας που υπάρχει, ή, διαφορετικά, αξιολόγηση του κινδύνου, γι' αυτό οι μέθοδοι αυτοί ονομάζονται μέθοδοι αξιολόγησης κινδύνου.

#### 2.1.3.2 Κατηγορίες υποδειγμάτων σύμφωνα με τη μέθοδο προσέγγισης του ενεργειακού συστήματος

Τα υποδείγματα μελέτης ενεργειακών συστημάτων μπορούν να διακριθούν σε κατηγορίες ανάλογα τη μέθοδο προσέγγισης του συστήματος. Έχουν αναπτυχθεί δύο προσεγγίσεις: η μικροσκοπική προσέγγιση και η μακροσκοπική προσέγγιση του συστήματος. Κατά τη μικροσκοπική προσέγγιση χρησιμοποιούνται αναλυτικές μέθοδοι για την αντιμετώπιση σύνθετων τεχνικών περιορισμών μεταφοράς και περιορισμών αξιοπιστίας και τα δεδομένα αναπαρίστανται με μεγάλη ακρίβεια. Ωστόσο, η εύρεση καθολικής βέλτιστης λύσης δεν είναι βέβαιη. Η μακροσκοπική προσέγγιση μελετά ένα

γενικευμένο πρόβλημα, ενώ η μικροσκοπική προσέγγιση μελετά ένα πρόβλημα το οποίο αποτελεί τμήμα ενός γενικότερου προβλήματος. Για παράδειγμα μικροσκοπική προσέγγιση αποτελεί ο βέλτιστος μακροχρόνιος σχεδιασμός του ηλεκτρικού τομέα μιας χώρας και αποτελεί τμήμα της μακροσκοπικής προσέγγισης του βέλτιστου σχεδιασμού του συνολικού ενεργειακού τομέα της χώρας, ο οποίος μπορεί να περιλαμβάνει επιπλέον το σχεδιασμό των μεταφορών, των κτιριακών εγκαταστάσεων, του δικτύου μεταφοράς της ενέργειας κ.α. Οι μακροσκοπικές προσεγγίσεις μειώνουν αρκετά τις πολυπλοκότητες κατά τη μοντελοποίηση του συστήματος αγνοώντας συνήθως τεχνικούς περιορισμούς και σύνθετα χαρακτηριστικά των σταθμών και των γραμμών μεταφοράς και επιλύονται στις πλείστες περιπτώσεις με τις αρχές του γραμμικού προγραμματισμού (linear programming – LP). Τα αποτελέσματα μιας μακροσκοπικής μελέτης είναι πάντοτε προσεγγιστικά και παρουσιάζουν μια μακροσκοπική εικόνα της εξέλιξης του συστήματος.

Οι μικροσκοπικές προσεγγίσεις υποδειγμάτων ενεργειακού σχεδιασμού χωρίζονται σε δύο γενικές κατηγορίες: κεντρικά ελεγχόμενες προσεγγίσεις και μη κεντρικά ελεγχόμενες προσεγγίσεις.

Υποδείγματα που ανήκουν στην κατηγορία των κεντρικά ελεγχόμενων προσεγγίσεων του ενεργειακού συστήματος επιλύονται συνηθέστερα με τις αρχές του μη γραμμικού προγραμματισμού, του ακεραίου γραμμικού προγραμματισμού ή του στοχαστικού δυναμικού προγραμματισμού, στην περίπτωση που κάποια μεγέθη θεωρούνται στοχαστικά. Τα τελευταία χρόνια έχουν αναπτυχθεί μαθηματικές τεχνικές όπως οι evolutionary computational (EC) τεχνικές και οι swarm intelligence (SI) τεχνικές για την επίλυση υποδειγμάτων αυτού του είδους.

Στη βιβλιογραφία έχουν αναπτυχθεί διάφορα υποδείγματα κεντρικά ελεγχόμενης προσέγγισης του προβλήματος βελτιστοποίησης. Σε κάποια εξ αυτών η ζήτηση και το κόστος καυσίμων είναι πιθανοτικά μεγέθη, που ακολουθούν αλυσίδες Markov, και η επίλυσή τους γίνεται σύμφωνα με τις αρχές του στοχαστικού δυναμικού προγραμματισμού (Mo, Hegge, & Wangensteen, 1991). Υπόδειγμα μη γραμμικού προγραμματισμού με λεπτομερή προσομοίωση της λειτουργίας των αντλησιοταμιευτικών μονάδων αναπτύχθηκε από τους (Ramos, Perez-Arriaga, & Bogas, 1989) για την επίλυση του οποίου χρησιμοποιήθηκε ο solver MINOS. Υπόδειγμα το οποίο περιλαμβάνει οικονομικούς περιορισμούς και επιλύεται με τις αρχές του ακεραίου προγραμματισμού αναπτύχθηκε από τους (Majumdar & Chattopadhyay, 1999). Στο υπόδειγμα αυτό έγινε επιπλέον ανάλυση ευαισθησίας για διάφορες επιλογές του οικονομικού σχεδιασμού. Από τους (Meza, Yildirim, & Masud, A model for the multiperiod multiobjective power generation expansion planning, 2007) έχει αναπτυχθεί υπόδειγμα πολλαπλών αντικειμενικών συναρτήσεων το οποίο ενσωματώνει

περιορισμούς μεταφοράς σε ένα DC σύστημα μεταφοράς. Οι τέσσερις αντικειμενικές συναρτήσεις περιλαμβάνουν (a) το κόστος των επενδύσεων, της λειτουργίας και της μεταφοράς της ηλεκτρικής ενέργειας, (b) τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις, (c) τις εισαγόμενες ποσότητες καυσίμων και (d) την αβεβαιότητα εξέλιξης των τιμών ηλεκτρικής ενέργειας. Το μη γραμμικό υπόδειγμα που περιλαμβάνει κριτήρια αξιοπιστίας όπως η πιθανότητα απώλειας φορτίου (Loss of Load Probability, LOLP) μπορεί να επιλυθεί με τεχνικές evolutionary programming (Park, Won, Park, & Kim, 1999).

Υπόδειγμα μικτού ακέραιου και διγραμμικού προγραμματισμού με πολλαπλές αντικειμενικές συναρτήσεις παρουσιάζεται από τους (Meza, Yildirim, & Masud, A multiobjective evolutionary programming algorithm and its applications to power generation expansion planning, 2009) το οποίο επιλύεται με τεχνικές evolutionary programming και περιλαμβάνει αποφάσεις τόσο για επενδύσεις όσο και για τις γραμμές μεταφοράς. Το υπόδειγμα αναλύεται εξετάζοντας διαφορετικά σενάρια με στόχο την αξιολόγηση της επίπτωσης των τιμών των καυσίμων στις διάφορες αντικειμενικές συναρτήσεις.

Στη μελέτη των (Kannan, Slochanal, & Padhy, Application and comparison of meta-heuristic techniques to generation expansion planning problem, 2005) γίνεται χρήση και σύγκριση διαφόρων μετα-ευρηστικών (metaheuristic)ς τεχνικών για την βέλτιστη επίλυση του υποδείγματος ενεργειακού σχεδιασμού. Στα υποδείγματα (Park, Park, Won, & Lee, 2000), (Kannan, Baskar, McCalley, & Murugan, 2009), (Murugan, Kannan, & Baskar, Application of NSGA-II algorithm to single-objective transmission constrained generation expansion planning, 2009), (Teixeira Firmo & Loureiro Legey, 2002), (Sirikum, Techanitisawad, & Kachitvichyanukul, 2007) χρησιμοποιούνται γενετικοί αλγόριθμοι (Genetic Algorithms – GA) για την επίλυση των αντικειμενικών συναρτήσεων, είτε το υπόδειγμα περιλαμβάνει μία είτε περισσότερες. Στο υπόδειγμα όπως παρουσιάζεται στο (Murugan, Kannan, & Baskar, Application of NSGA-II algorithm to single-objective transmission constrained generation expansion planning, 2009) αναπαρίσταται το AC δίκτυο. Τα υποδείγματα στα οποία χρησιμοποιούνται γενετικοί αλγόριθμοι (GA) αλγόριθμοι μπορούν να συμπεριλάβουν μη γραμμικούς περιορισμούς που είναι απαραίτητοι για την ενσωμάτωση της πιθανότητας απώλειας του φορτίου και βρίσκουν την ολική βέλτιστη λύση σε εύλογο υπολογιστικό χρόνο. Ωστόσο, παρουσιάζουν κάποιες αδυναμίες όταν εφαρμόζονται σε προβλήματα μεγάλης κλίμακας όπως είναι η πρόωρη σύγκλιση σε ένα τοπικό βέλτιστο σημείο. Καταλήγοντας, έχουν παρουσιαστεί διάφορες τεχνικές για το βέλτιστο μακροχρόνιο ενεργειακό σχεδιασμό ενός συστήματος, όπως είναι η μέθοδος της πιθανοτικής ικανοποίησης της αιχμής της ζήτησης του συστήματος (Malik, Cory, & Wijayatunga, 1999), ένας ευρηστικός αλγόριθμος για τους περιορισμούς

του δικτύου μεταφοράς ενέργειας ή η μελέτη υποδείγματος με πολλαπλές αντικειμενικές συναρτήσεις το οποίο χρησιμοποιεί προσομοίωση Monte Carlo για την αναπαράσταση της ζήτησης και της διαθεσιμότητας των μονάδων παραγωγής (Tekiner, Coit, & Felder, 2010).

Στα υποδείγματα που ανήκουν στην κατηγορία των μη κεντρικά ελεγχόμενων προσεγγίσεων του ενεργειακού συστήματος θεωρείται κάποια συγκεκριμένη μορφή αγοράς όπως για παράδειγμα ολιγοπώλιο. Η περιπλοκότητα των υποδειγμάτων αυτών αυξάνεται συγκριτικά με τις κεντρικά ελεγχόμενες προσεγγίσεις καθώς χρειάζεται να ληφθούν υπόψιν τόσο η λειτουργία της αγοράς όσο και η συμπεριφορά των εκάστοτε ανταγωνιστικών επιχειρήσεων. Τα περισσότερα υποδείγματα αυτής της κατηγορίας χρησιμοποιούν στοιχεία της Θεωρίας των Παιγνίων (Game Theory) και τα οποία επιλύονται χρησιμοποιώντας τις αρχές του στοχαστικού δυναμικού προγραμματισμού (Botterud, Ilic, & Wangensteen, 2005), (Barforoushi, Moghaddam, Javidi, & Sheikh-El-Eslami, 2010), της Λαγκρανζιανής χαλάρωσης (Lagrangian relaxation), του αλγορίθμου Benders decomposition (Roh, Shahidehpour, & Fu, 2007), εξελικτικός προγραμματισμός (evolutionary programming) (Wang, Shahidehpour, Li, & Botterud, 2009) (Chuang, Wu, & Varaiya, 2001), δυναμική των συστημάτων (system dynamics) (Pereira & Saraiva, 2009), ευριστικές μέθοδοι (heuristic methods) (Nanduri, Das, & Rocha, 2009). Κάθε μία από τις μεθόδους αυτές παρουσιάζει κάποια πλεονεκτήματα και αδυναμίες. Μία συγκριτική μελέτη των μεθόδων αυτών πραγματοποιείται στο (Kazempour, Conejo, & Ruiz, 2011).

### 2.1.3.3 Κατηγορίες υποδειγμάτων σύμφωνα με το σκοπό διεξαγωγής της μελέτης

Τα υποδείγματα αναπαράστασης ενός ενεργειακού συστήματος χωρίζονται σε κατηγορίες ανάλογα το σκοπό διεξαγωγής της μελέτης, όπως για παράδειγμα αν επιδιώκεται ο βέλτιστος μακροχρόνιος σχεδιασμός ή η πρόβλεψη των τιμών διαφόρων παραμέτρων. Οι βασικές κατηγορίες που προκύπτουν είναι τέσσερις, (α) τα θεμελιώδη υποδείγματα (fundamental models), (b) τα οικονομικά μαθηματικά υποδείγματα (financial mathematical models), (c) τα οικονομετρικά υποδείγματα χρονοσειρών (econometric time-series models) και (d) τα υποδείγματα που γίνεται χρήση της Θεωρίας Παιγνίων (game theoretic approaches).

Τα θεμελιώδη υποδείγματα (fundamental models) προσομοιώνουν τα τεχνικά χαρακτηριστικά του τομέα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας όπως είναι η επίδραση των τεχνικών χαρακτηριστικών των σταθμών παραγωγής, για παράδειγμα ο βαθμός απόδοσης κάθε σταθμού, οι τεχνικοί περιορισμοί κατά τις μεταφορές ισχύος, όπως για παράδειγμα οι απώλειες κατά τη μεταφορά, και οι διαφοροποιήσεις της ζητούμενης ενέργειας (Möst & Keles, A survey of stochastic modelling approaches for liberalised

electricity markets, 2010). Πολλές μελέτες αναπτύχθηκαν κατά τη διάρκεια της κρίσης πετρελαίου τη δεκαετία του 1970, οι περισσότερες εκ των οποίων αποτελούν αιτιοκρατικά υποδείγματα γραμμικού ή ακέραιου προγραμματισμού. Τα υποδείγματα αυτά αρχικά αναπτύχθηκαν με αφορμή την προσπάθεια των βιομηχανοποιημένων εθνών να περιορίσουν την εξάρτησή τους στο πετρέλαιο και να καταστρώσουν στρατηγικές με σκοπό να προσαρμόσουν αναλόγως το ενεργειακό τους σύστημα (Möst & Keles, A survey of stochastic modelling approaches for liberalised electricity markets, 2010).

Οι περισσότερες προσεγγίσεις στηρίζονται σε διεθνώς γνωστά μοντέλα όπως τα ακόλουθα: MARKAL (Market Allocation Model) (Fishbone & Abilock, 1981), EFOM (Energy Flow Optimization Model) (Finon, 1974) και (Van der Voort, et al., 1984), MESSAGE (Model for Energy Supply System Alternatives and their General Environmental Impact) (Agnew, Schrattenholzer, & Voß, 1979), (Messner, User's Guide for the Matrix Generator of Message II: Model Description and Implementation Guide, 1984) και (Messner & Strugbegger, Model-based decision support in energy planning, 2009), CEEM (Cogeneration in European Electricity Markets) (Starrmann, 2001), TIMES (The Integrated MARKAL EFOM system) (Remme, 2006) and PERSEUS (Program Package for Emission Reduction Strategies in Energy Use and Supply) (Möst, Zur Wettbewerbsfähigkeit der Wasserkraft in liberalisierten Elektrizitätsmärkten – eine modellgestützte Analyse dargestellt am Beispiel des schweizerischen Energieversorgungssystems, 2006) και (Fichtner, 1999), που αναπτύχθηκε βάσει του EFOM.

Τα οικονομικά μαθηματικά υποδείγματα (financial mathematical models) χρησιμοποιούνται για την προσομοίωση της εξέλιξης των τιμών των βασικών αγαθών χωρίς να ληφθούν υπόψη τα προαναφερθέντα τεχνικά χαρακτηριστικά και περιορισμοί για την παραγωγή τους. Αρχικά αναπτύχθηκαν για τις αγορές μετοχών και επιτοκίων, αλλά αρκετά υποδείγματα έχουν εφαρμοστεί και στον ενεργειακό τομέα. Αυτά τα υποδείγματα λαμβάνουν υπόψη τα χαρακτηριστικά των τιμών των χρηματιστηρίων ηλεκτρισμού (spot prices) που προκύπτουν από τεχνικά χαρακτηριστικά, όπως είναι οι ημερήσιοι, εβδομαδιαίοι και εποχιακοί κύκλοι, η μεγάλη μεταβλητότητα, η ιδιότητά τους να επιστρέφουν προς τη μέση τιμή όταν αποκλίνουν (mean reversion) και οι αιχμές (spikes).

Τα υποδείγματα αυτά συνήθως χρησιμοποιούνται για βραχυπρόθεσμο προγραμματισμό. Είναι κατάλληλα για να αντιμετωπίσουν και να περιγράψουν τη μεταβλητότητα των τιμών ενέργειας και για το λόγο αυτό χρησιμοποιούνται συχνά σε υποδείγματα αξιολόγησης κινδύνου και υποδείγματα που χρησιμοποιούν τη θεωρία των δικαιωμάτων προαίρεσης (real option analysis). Εντούτοις, τις περισσότερες φορές τα αποτελέσματα των υποδειγμάτων αυτών εισέρχονται ως δεδομένα σε θεμελιώδη

υποδείγματα τα οποία συνδυάζουν τη λεπτομερή περιγραφή του συστήματος με ορθολογική συμπεριφορά των επιχειρήσεων που συμμετέχουν στο σύστημα με στόχο τη βελτιστοποίηση του συστήματος (Möst & Keles, A survey of stochastic modelling approaches for liberalised electricity markets, 2010).

Μία ακόμη κατηγορία υποδειγμάτων είναι τα οικονομετρικά υποδείγματα χρονοσειρών (econometric time – series models), τα οποία συνδέουν τις μεταβολές στην εξέλιξη των τιμών προσφοράς της ηλεκτρικής ενέργειας με την επίδραση διαφόρων παραγόντων όπως είναι η θερμοκρασία, η ώρα της ημέρας, η φωτεινότητα κ.α. Η προσέγγιση αυτή χρησιμοποιείται συχνά για την πρόβλεψη των τιμών της ζήτησης και τις περισσότερες φορές χρησιμοποιούν στατιστικές μεθόδους επεξεργασίας ιστορικών δεδομένων.

Η τελευταία κατηγορία υποδειγμάτων περιλαμβάνει τις προσεγγίσεις με χρήση της Θεωρίας Παιγνίων (game theoretic approaches), οι οποίες είναι κατάλληλες για την ανάλυση της επίδρασης της στρατηγικής συμπεριφοράς κατά τη λήψη αποφάσεων. Οι (Smeers, 1997), (Hobbs, 2001) και (Day, Hobbs, & Pang, 2002) μελέτησαν υποδείγματα αυτής της κατηγορίας.

Ο Ventosa παρουσιάζει μια μελέτη η οποία διαχωρίζει το υπόδειγμα βελτιστοποίησης, το υπόδειγμα ισορροπίας και το υπόδειγμα προσομοίωσης (Ventosa, Baillo, Ramos, & Rivier, 2005), σύμφωνα με την οποία ένα εξ αυτών βασίζεται στις αρχές του στοχαστικού προγραμματισμού. Επιπλέον, μελέτη στοχαστικού ενεργειακού υποδείγματος εκπονήθηκε και από τους (Wallace & Fleten, 2003), η οποία όμως επικεντρωνόταν στο βελτιστοποιημένο υπόδειγμα και δεν εισήγαγε μεθόδους προσομοίωσης των πιθανοτικών παραμέτρων και παραγωγής δειγμάτων αυτών.



## Κεφάλαιο 3

### 3 Μαθηματική εισαγωγή

---

Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο θα αναλύσουμε ορισμένες βασικές μαθηματικές έννοιες τις οποίες θα χρησιμοποιήσουμε στην διατριβή. Αρχικά αναφέρουμε εν συντομία την έννοια της στοχαστικής μεταβλητής την οποία ήδη έχουμε αναφέρει και χρησιμοποιούμε για την μοντελοποίηση των πιθανοτικών παραμέτρων. Στην συνέχεια επεκτείνουμε την έννοια της στοχαστικής μεταβλητής στον χρόνο οπότε προκύπτουν οι στοχαστικές ανελίξεις. Με δεδομένη την ήδη σημαντική βιβλιογραφία στον τομέα των στοχαστικών ανελίξεων αναφέρουμε ορισμένα χαρακτηριστικά τους. Επίσης αναφέρουμε την ανέλιξη που θα χρησιμοποιήσουμε στην παρούσα διατριβή. Στην συνέχεια αναλύουμε την παραγωγή αντιπροσωπευτικών δειγμάτων από τις θεωρούμενες στοχαστικές παραμέτρους και στοχαστικές ανελίξεις.

#### 3.1 Στοχαστικές μεταβλητές

Αρχικά θεωρούμε τον πιθανοτικό χώρο  $(\Omega, \mathcal{F}, P)$ , όπου  $\Omega$  είναι το σύνολο του πιθανοτικού-δειγματικού χώρου,  $\mathcal{F}$  το σύνολο ( $\sigma$ -άλγεβρα) των συνόλων των διαφορετικών ενδεχομένων που προκύπτουν από τον δειγματικό χώρο  $\Omega$  και  $P: \mathcal{F} \rightarrow [0,1]$  είναι η συνάρτηση που αναθέτει πιθανότητα σε κάθε ενδεχόμενο. Η συνάρτηση  $X: \Omega \rightarrow \mathbb{R}$  καλείται στοχαστική μεταβλητή.

#### 3.2 Στοχαστικές ανελίξεις

Στοχαστική ανέλιξη είναι μια ακολουθία τυχαίων μεταβλητών  $X_t, t \in I$  με  $X_t: (\Omega, \mathcal{F}, P) \rightarrow (\mathbb{R}, \mathcal{B}(\mathbb{R}))$  όπου  $(\Omega, \mathcal{B}, P)$  είναι πιθανοτικός χώρος. Για κάθε  $t$  η  $\{X(t, \cdot)\}_{t \geq 0}$  είναι μετρήσιμη στον χώρο  $\Omega$ . Η στοχαστική ανέλιξη είναι διακριτού χρόνου αν το σύνολο  $I$  είναι διακριτό σύνολο ενώ αν το σύνολο  $I$  είναι συνεχές σύνολο τότε η ανέλιξη είναι συνεχούς χρόνου (Etheridge, 2002).

Στην παρούσα διατριβή θα μας απασχολήσει μια ιδιαίτερη κατηγορία ανελιξων, οι λεγόμενες Μαρκοβιανές ανελιξεις οι οποίες ικανοποιούν την ιδιότητα Markov. Αυτές έχουν την ιδιότητα η κατανομή πυκνότητας πιθανότητας της τυχαίας μεταβλητής  $X$  την περίοδο  $t+1$  να εξαρτάται μόνο από την τιμή της μεταβλητής την περίοδο  $t$  και όχι από την τιμή της μεταβλητής στις περιόδους πριν την  $t$ , δηλαδή οι Μαρκοβιανές ανελιξεις δεν εξαρτώνται από την ιστορία της ανέλιξης. Δηλαδή, για μια Μαρκοβιανή στοχαστική διαδικασία  $\{X_t\}_{t \geq 0}$  που παίρνει τιμές σε ένα αριθμήσιμο σύνολο  $S$  ισχύει (Markov, 1971):

$$P(X_{t_n} = s_j | X_{t_{n-1}} = s_i, X_{t_{n-2}} = s_{i_{n-1}}, \dots, X_{t_0} = s_{i_0}) = P(X_{t_n} = s_j | X_{t_{n-1}} = s_i) \quad (3-1)$$

για  $0 \leq t_0 < t_1 < \dots < t_n$  και  $\forall s_i, s_{i_0}, s_{i_1}, \dots, s_{i_{n-1}} \in S$

Σε αιτιοκρατικό υπόδειγμα αναπαράστασης ηλεκτρικού τομέα μιας χώρας όλοι οι εξωτερικοί παράμετροι που επηρεάζουν την βέλτιστη λύση έχουν γνωστές τιμές με βεβαιότητα για όλη την περίοδο επίλυσης. Αυτό αποτελεί πολύ ισχυρή υπόθεση, αφού μια επιχείρηση ηλεκτρισμού μπορεί μόνο να υποθέσει τις πιθανές τιμές των παραμέτρων του προβλήματος για τα μελλοντικά έτη. Για αυτό τον λόγο, για την ενσωμάτωση στο πρόβλημα της πιθανοτικής εξέλιξης των παραμέτρων, θεωρείται ότι ορισμένοι παράμετροι ακολουθούν συγκεκριμένες στοχαστικές ανελιξεις (Stochastic Processes) ή πιθανοτικές κατανομές (Probabilistic distributions).

### 3.2.1 Ιδιότητα Martingale στοχαστικής ανέλιξης

Στην συνέχεια θα αναφερθούμε στην έννοια της martingale. Έστω  $(\Omega, \mathcal{F}, P)$  είναι χώρος πιθανότητας και μια ακολουθία σ-αλγεβρών  $\mathcal{F}_1 \subseteq \mathcal{F}_2 \subseteq \mathcal{F}_3 \subseteq \dots \subseteq \mathcal{F}$  η οποία καλείται μελλοντική ιστορία ή φιλτράρισμα (filtration). Η ακολουθία τυχαίων μεταβλητών  $X_1, X_2, \dots$  λέγεται προσαρμοσμένη (adapted) σε ένα φιλτράρισμα  $\mathcal{F}_1, \mathcal{F}_2, \dots$  αν η  $X_i$  είναι  $\mathcal{F}_i$ -μετρήσιμη.

Ορισμός 3-1. Μια ακολουθία τυχαίων μεταβλητών  $X_1, X_2, \dots$   $((\Omega, \mathcal{F}, P) \rightarrow (\mathbb{R}, \mathcal{B}(\mathbb{R})))$  καλείται martingale ως προς το φιλτράρισμα (filtration)  $\mathcal{F}_1, \mathcal{F}_2, \dots$  αν είναι προσαρμοσμένη (adapted) στο φιλτράρισμα αυτό με  $E(|X_i|) < \infty$ ,  $i = 1, 2, \dots$  και  $E(X_{n+1} | \mathcal{F}_n) = X_n, n = 1, 2, \dots$  με πιθανότητα 1. Αν η ισότητα στον προηγούμενο τύπο αντικατασταθεί με ανισότητα  $\geq$  ( $\leq$ ) τότε η ακολουθία καλείται sub(super)-martingale.

Η έννοια της martingale αναφέρεται στην σχέση της αναμενόμενης τιμής της πιθανοτικής παραμέτρου την επόμενη χρονική περίοδο  $X_{n+1}$  με βάση την γνωστή πληροφόρηση την τωρινή περίοδο  $\mathcal{F}_n$  και της τιμής της παραμέτρου την τωρινή χρονική περίοδο  $X_n$ . Όταν η στοχαστική ανέλιξη είναι martingale τότε δεν υπάρχει arbitrage και μόνο τότε μπορεί να υπολογιστεί η αξία χρησιμοποιώντας την μεθοδολογία των δικαιωμάτων προαίρεσης. Σε

διαφορετική περίπτωση, όταν δηλαδή υπάρχει arbitrage τότε υπάρχει η δυνατότητα παραγωγής κέρδους χωρίς κίνδυνο, κάτι το οποίο δεν είναι σταθερή κατάσταση και από την αγορά θα εξαλειφθεί.

Η στοχαστική ανέλιξη που χρησιμοποιήθηκε είναι η Γεωμετρική Κίνηση Brown. Για την κατανόηση της κίνησης αυτής θα αναλύσουμε πρώτα τη στοχαστική ανέλιξη Wiener.

### 3.2.2 Κίνηση Brown

Η στοχαστική ανέλιξη Wiener είναι στοχαστική ανέλιξη συνεχούς χρόνου με τα εξής χαρακτηριστικά, (Dixit & Pindyck, 1994) και (Etheridge, 2002). Είναι Μαρκοβιανή δηλαδή για να υπολογίσουμε την πιθανοτική κατανομή χρειαζόμαστε μόνο την τιμή της μεταβλητής την τελευταία περίοδο (Dixit & Pindyck, 1994). Για κάθε  $s \geq 0$  και  $t \geq 0$  η τυχαία μεταβλητή  $W_{t+s} - W_s$  έχει κανονική κατανομή με μέση τιμή μηδέν και διακύμανση  $t$ . Για κάθε  $n \geq 1$  και για  $0 \leq t_0 \leq t_1 \leq \dots \leq t_n$  οι τυχαίες μεταβλητές  $\{W_{t_r} - W_{t_{r-1}}\}$  είναι ανεξάρτητες. Το μαθηματικό υπόδειγμα της ανέλιξης Wiener είναι

$$dW_t = \varepsilon_t \sqrt{dt} \tag{3-2}$$

όπου  $\varepsilon_t$  είναι τυχαία μεταβλητή κανονικής κατανομής με μέση τιμή μηδέν και διακύμανση 1.

Η ανέλιξη Wiener μπορεί να επεκταθεί με την εισαγωγή τάσης, δηλαδή η μέση τιμή να είναι διάφορη του μηδενός. Η ανέλιξη αυτή ονομάζεται κίνηση Brown ή Brownian Motion. Μια τυχαία μεταβλητή  $X(t)$  που ακολουθεί την κίνηση Brown, περιγράφεται από την διαφορική εξίσωση:

$$dX(t) = \mu dt + \sigma dW_t \tag{3-3}$$

όπου  $dW_t$  είναι η ανέλιξη Wiener όπως έχει αναφερθεί παραπάνω

Η κίνηση Brown με παραμέτρους  $\mu \in \mathbb{R}$  (τάση - drift parameter) και  $\sigma > 0$  (μεταβλητότητα - volatility) παρουσιάζει τις εξής ιδιότητες για κάθε  $y \geq 0, t > 0$ :

1. Η τυχαία μεταβλητή  $X_{t+y} - X_t \sim N(\mu y, t\sigma^2)$
2. Η τυχαία μεταβλητή  $X_{t+y} - X_t$ , είναι ανεξάρτητη από τις  $X_u, 0 \leq u \leq t$

### 3.2.3 Γεωμετρική Κίνηση Brown (Geometric Brownian Motion – GBM)

Η κίνηση Brown δεν προσομοιώνει ικανοποιητικά την μακροχρόνια εξέλιξη στοχαστικών παραμέτρων που αναπαριστούν μεγέθη τα οποία δεν μπορούν να λάβουν αρνητικές τιμές όπως είναι οι τιμές των καυσίμων ή οι τιμές των δικαιωμάτων εκπομπών. Τα ορυκτά καύσιμα, όπως είναι ο άνθρακας και το φυσικό αέριο, είναι εξαντλήσιμοι πόροι και σύμφωνα με το θεώρημα του Hotelling η τιμή τους μακροχρόνια έχει αυξητική τάση (Hotelling, 1931).

Η στοχαστική ανέλιξη Γεωμετρική Κίνηση Brown (Geometric Brownian Motion - GBM), η οποία είναι επίσης γνωστή και ως «Exponential Brownian Motion», έχει τις ιδιότητες να μην μπορεί να λάβει αρνητικές τιμές και με θετική τάση προσομοιώνει την μακροχρόνια αύξηση.

Μια τυχαία μεταβλητή  $X(t)$  ακολουθεί την γεωμετρική κίνηση Brown όταν περιγράφεται από την διαφορική εξίσωση:

$$dX(t) = \mu X(t)dt + \sigma X(t)dW_t \quad (3-4)$$

Στην (3-4), η παράμετρος  $\mu$  ( $\mu \in \mathbb{R}^+$ ) είναι η τάση της τιμής της μεταβλητής  $X(t)$  (drift) η οποία έχει υποθεθεί θετική και εκφράζει την ποσοστιαία μεταβολή (αύξηση ή μείωση) της τιμής  $X(t+1)$  σε σχέση με την  $X(t)$ . Η παράμετρος  $\sigma$  ( $\sigma > 0$ ) εκφράζει τη μεταβλητότητα.

Η (3-4) μπορεί να μετασχηματιστεί στην:

$$\frac{dX(t)}{X(t)} = \mu dt + \sigma dW_t \quad (3-5)$$

Όπως παρουσιάζεται στην (3-5), η ποσοστιαία μεταβολή της μεταβλητής  $\frac{dX(t)}{X(t)}$  αποτελείται από τον συνδυασμό ενός ντετερμινιστικού μέρους ( $\mu dt$ ) και ενός στοχαστικού μέρους ( $\sigma dW_t$ ). Ακόμα από την (3-5) προκύπτει ότι η μεταβολή του λογαρίθμου της Γεωμετρικής Κίνησης Brown είναι η κίνηση Brown.

### 3.3 Παραγωγή αντιπροσωπευτικών δειγμάτων των πιθανοτικών παραμέτρων με χρήση κανονικών κατανομών

Στα υποδείγματα αξιολόγησης του κινδύνου έχουμε υποθέσει ότι η τιμή αγοράς των δικαιωμάτων εκπομπών  $CO_2$  ( $ETS p_t$ ), οι τιμές των καυσίμων ( $fp_{i,f,t}$ ) άνθρακα, φυσικού αερίου, βιομάζας και πετρελαϊκών προϊόντων και η παράμετρος  $\alpha_{i,s,t}$  της αντίστροφης συνάρτησης ζήτησης της παραγόμενης ενέργειας είναι στοχαστικά μεγέθη που

ακολουθούν κανονικές κατανομές με δεδομένες μέσες τιμές, διακυμάνσεις και συσχετίσεις μεταξύ τους.

$$\begin{aligned} \tilde{a}_{i,s,t} &\sim \mathcal{N}(\overline{a_{i,s,t}}, \sigma^2(a_{i,s,t})) \\ \tilde{fp}_{i,f,t} &\sim \mathcal{N}(\overline{fp_{i,f,t}}, \sigma^2(fp_{i,f,t})) \\ \overline{ETS}p_t &\sim \mathcal{N}(\overline{ETS}p_t, \sigma^2(ETS p_t)) \end{aligned} \tag{3-6}$$

Οι παράμετροι αυτοί παρουσιάζουν συσχέτιση μεταξύ τους αλλά θεωρούνται ανεξάρτητες μεταξύ διαφορετικών ετών.

Για την επίλυση του προβλήματος αυτού, η προσομοίωση των τιμών των στοχαστικών μεγεθών του προβλήματος έγινε με δειγματοληψία των κανονικών κατανομών θεωρώντας τα μεγέθη συσχετισμένα σύμφωνα με πίνακα διακύμανσης – συν διακύμανσης, ο οποίος έχει προέλθει από την βιβλιογραφία και δηλώνει τη συσχέτιση μεταξύ των στοχαστικών παραμέτρων του προβλήματος. Συμβολίζουμε με  $j$  τα στοχαστικά μεγέθη,  $t$  το έτος λειτουργίας και  $\rho_{j,j,t}$  τον συντελεστή συσχέτισης μεταξύ των πιθανοτικών μεγεθών. Για εποπτικούς λόγους θα παρουσιάσουμε στον επόμενο πίνακα τον πίνακα διακυμάνσεων – συν διακυμάνσεων των στοχαστικών μεγεθών.

Πίνακας 3-1: Εποπτική απεικόνιση των συσχετίσεων μεταξύ των στοχαστικών μεγεθών για δύο διαφορετικά έτη

	$fp_{i,f1,t_1}$	$fp_{i,f2,t_1}$	$ETS p_{t_1}$	$fp_{i,f1,t_2}$	$fp_{i,f2,t_2}$	$ETS p_{t_2}$
$fp_{i,f1,t_1}$	$\rho_{j,j,t_1}$			$\mathbf{0}$		
$fp_{i,f2,t_1}$						
$ETS p_{t_1}$						
$fp_{i,f1,t_2}$	$\mathbf{0}$			$\rho_{j,j,t_2}$		
$fp_{i,f2,t_2}$						
$ETS p_{t_2}$						

Όπου η ανεξαρτησία μεταξύ στοχαστικών μεγεθών διαφορετικών ετών δηλώνεται με την μηδενική συσχέτιση, ενώ η συσχέτιση μεταξύ μεγεθών του ίδιου έτους με τον συντελεστή συσχέτισης  $\rho_{j,j,t}$ .

Ο πίνακας συσχετίσεων είναι συμμετρικός και για εποπτικούς λόγους για ένα έτος είναι όπως

Πίνακας 3-2. Εποπτικός Πίνακας Συσχετίσεων

$$\begin{bmatrix} 1 & \rho(X_1, X_2) & \rho(X_1, X_3) & \cdot & \cdot & \cdot & \rho(X_1, X_n) \\ \rho(X_2, X_1) & 1 & \rho(X_2, X_3) & \cdot & \cdot & \cdot & \rho(X_2, X_n) \\ \rho(X_3, X_1) & \rho(X_3, X_2) & 1 & \cdot & \cdot & \cdot & \rho(X_3, X_n) \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \rho(X_n, X_1) & \rho(X_n, X_2) & \rho(X_n, X_3) & \cdot & \cdot & \cdot & 1 \end{bmatrix}$$

Γνωρίζοντας την τυπική απόκλιση ή τη διακύμανση της κάθε παραμέτρου μπορεί να υπολογιστεί ο πίνακας διακύμανσης – συν διακύμανσης (variance- covariance matrix):

Πίνακας 3-3. Εποπτικός Πίνακας διακύμανσης – συν διακύμανσης

$$\Sigma = \begin{bmatrix} \sigma^2(X_1) & \rho(X_1, X_2) \cdot \sigma(X_1) \cdot \sigma(X_2) & \cdot & \cdot & \cdot & \rho(X_1, X_n) \cdot \sigma(X_1) \cdot \sigma(X_n) \\ \rho(X_2, X_1) \cdot \sigma(X_2) \cdot \sigma(X_1) & \sigma^2(X_2) & \cdot & \cdot & \cdot & \rho(X_2, X_n) \cdot \sigma(X_2) \cdot \sigma(X_n) \\ \rho(X_3, X_1) \cdot \sigma(X_3) \cdot \sigma(X_1) & \rho(X_3, X_2) \cdot \sigma(X_3) \cdot \sigma(X_2) & \cdot & \cdot & \cdot & \rho(X_3, X_n) \cdot \sigma(X_3) \cdot \sigma(X_n) \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \rho(X_n, X_1) \cdot \sigma(X_n) \cdot \sigma(X_1) & \rho(X_n, X_2) \cdot \sigma(X_n) \cdot \sigma(X_2) & \cdot & \cdot & \cdot & \sigma^2(X_n) \end{bmatrix}$$

Έτσι για κάθε έτος θεώρησης επένδυσης θεωρήσαμε διαφορετικά δείγματα των στοχαστικών παραμέτρων

$$fp_{q,i,f,t}, ETSp_{q,t}, a_{q,i,s,t}$$

όπου: q: το σύνολο των θεωρούμενων δειγμάτων των στοχαστικών μεγεθών

$fp_{q,i,f,t}$  γνησίως αύξουσα συνάρτηση τιμής προσφοράς του καυσίμου f στην χώρα i την χρονιά t ως προς την χρήση του καυσίμου στο σενάριο q [€/MWh]

$ETSp_{q,t}$  τιμή δικαιωμάτων των εκπομπών  $CO_2$  στην αγορά του ETS (Emission trading scheme ETS) την χρονιά t στο σενάριο q τ [€/tnCO<sub>2</sub>]

$a_{q,i,s,t}$  η αναμενόμενη τιμή του σημείου τομής της καμπύλης ζήτησης με τον κατακόρυφο άξονα στο σενάριο q

Θα αναλυθεί στη συνέχεια η διαδικασία δειγματοληψίας συσχετισμένων τυχαίων μεταβλητών που ακολουθούν κανονικές κατανομές με γνωστό πίνακα διακύμανσης – συν διακύμανσης. Για την παραγωγή των συσχετισμένων δειγμάτων θα αναλυθεί πρώτα η παραγοντοποίηση Cholesky.

Ένας συμμετρικός, θετικά ορισμένος και με πραγματικά στοιχεία πίνακας  $\mathbf{A}$  μπορεί να παραγοντοποιηθεί σύμφωνα με την παραγοντοποίηση Cholesky (Cholesky decomposition ή Cholesky factorization) ως εξής  $\mathbf{A} = \mathbf{L}\mathbf{L}^T$ , όπου  $\mathbf{L}$  είναι κάτω τριγωνικός πίνακας με θετικά τα στοιχεία της διαγωνίου (Horn & Johnson, 1985). Ο πίνακας  $\mathbf{\Sigma}$  της διακύμανσης – συν διακύμανσης είναι συμμετρικός, θετικά ορισμένος και με πραγματικά στοιχεία οπότε με εφαρμογή της παραγοντοποίησης Cholesky μπορεί να γραφεί ως  $\mathbf{\Sigma} = \mathbf{L}\mathbf{L}^T$  με τον πίνακα  $\mathbf{L}$  να είναι κάτω τριγωνικός.

$$\mathbf{L} = \begin{pmatrix} c_{1,1} & \mathbf{0} & \dots & \mathbf{0} \\ c_{2,1} & c_{2,2} & \dots & \mathbf{0} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ c_{j,1} & c_{j,2} & \dots & c_{j,j} \end{pmatrix}$$

Αρχικά παράγουμε ανεξάρτητα δείγματα της τυπικής κανονικής κατανομής  $W_{q,jj,t} \sim \mathcal{N}(0, 1)$  τόσα σε αριθμό όσα είναι τα θεωρούμενα σενάρια και τα στοχαστικά μεγέθη για κάθε έτος θεώρησης  $t$ . Στην συνέχεια πολλαπλασιάζουμε τα δείγματα αυτά με τον κάτω τριγωνικό πίνακα  $\mathbf{L}$  όπως υπολογίστηκε προηγουμένως (Chang, 2004). Με τον τρόπο αυτό βρίσκουμε τα συσχετισμένα δείγματα των πιθανοτικών μεγεθών. Θα ισχύει δηλαδή:

$$W'_{q,j,t} = \sum_{jj} c_{j,j,t} \cdot W_{q,jj,t}$$

Ο τύπος αυτός σε μορφή πινάκων μπορεί να γραφεί:

$$\begin{pmatrix} W'_{q,1,t} \\ W'_{q,2,t} \\ \vdots \\ W'_{q,j,t} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} c_{1,1,t} & \mathbf{0} & \dots & \mathbf{0} \\ c_{2,1,t} & c_{2,2,t} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ c_{j,1,t} & c_{j,2,t} & \dots & c_{j,j,t} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} W_{q,1,t} \\ W_{q,2,t} \\ \vdots \\ W_{q,jj,t} \end{pmatrix}$$

ή

$$W'_{q,j,t} = \mathbf{L} \cdot W_{q,j,t}$$

Όπου:  $W_{j,t}$  ανεξάρτητα δείγματα των κανονικών κατανομών για όλα τα πιθανοτικά μεγέθη  $j$

$W'_{q,j,t}$  δείγματα των συσχετισμένων πιθανοτικών μεγεθών  $j$

$\mathbf{L}$  ο πίνακας Cholesky

Η μεθοδολογία αυτή ακολουθείται για την παραγωγή των δειγμάτων των στοχαστικών παραμέτρων για κάθε έτος  $t$ . Χρειάζεται να αναφερθεί ότι στο πλαίσιο της παρούσας διατριβής προέκυψαν 3000 δείγματα για τις χρησιμοποιούμενες κανονικές κατανομές,

δηλαδή προέκυψαν 3000 σενάρια. Στη συνέχεια, χρησιμοποιώντας τον αλγόριθμο *simultaneous backward reduction* όπως αναλύεται από τους Heitsch και Roemisch (Heitsch & Roemisch, 2003) βρήκαμε 100 αντιπροσωπευτικά δείγματα του αρχικού συνόλου δειγμάτων. Από τον αλγόριθμο προέκυψαν τα νέα αντιπροσωπευτικά δείγματα καθώς και η αντίστοιχη διαφοροποιημένη πιθανότητα του κάθε σεναρίου. Ο αλγόριθμος υπολογίζει τα δείγματα με τέτοιο τρόπο ώστε η αναμενόμενη τιμή της πλήρους πληροφορίας από τη δειγματοληψία (Expected Value of Perfect Information – EVPI) να μένει ίδια. Στα υποδείγματα αξιολόγησης του κινδύνου έγινε χρήση των 100 αντιπροσωπευτικών δειγμάτων με τις αντίστοιχες πιθανότητές τους που προέκυψαν ως αποτέλεσμα του αλγορίθμου.

### 3.4 Παραγωγή αντιπροσωπευτικών δειγμάτων των πιθανοτικών παραμέτρων με χρήση στοχαστικών ανελίξεων

Στην συνέχεια θα αναφέρουμε την μέθοδο που χρησιμοποιήθηκε για την παραγωγή δειγμάτων των στοχαστικών ανελίξεων που χρησιμοποιήσαμε στην παρούσα διατριβή.

Στο υπόδειγμα όπου η αξιολόγηση του κινδύνου γίνεται με χρήση της μεθοδολογίας των δικαιωμάτων προαίρεσης (Real Options) έχουμε υποθέσει ότι η τιμή αγοράς των δικαιωμάτων εκπομπών  $CO_2$  ( $ETSp_t$ ), οι τιμές των καυσίμων ( $fp_{i,f,t}$ ) άνθρακα, φυσικού αερίου, βιομάζας και πετρελαϊκών προϊόντων και η παράμετρος  $\alpha_{i,s,t}$  της αντίστροφης συνάρτησης ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας είναι πιθανοτικά μεγέθη που ακολουθούν την Γεωμετρική Κίνηση Brown. Αυτή η θεώρηση έγινε διότι η κίνηση αυτή προσομοιάζει καλύτερα την ιστορική κίνηση των θεωρούμενων στοχαστικών μεγεθών και ακόμα έχει την ιδιότητα σε σχέση με την απλή Brownian Motion να μην παίρνει αρνητικές τιμές όπως έχουμε ήδη αναφέρει.

Για κάθε διαφορετικό έτος θεώρησης επένδυσης θεωρήσαμε στοχαστικές ανελίξεις διαφορετικής τάσης και μεταβλητότητας ενσωματώνοντας όλες τις πληροφορίες – εκτιμήσεις που είναι σήμερα γνωστές για την μελλοντική εξέλιξη των στοχαστικών παραμέτρων για κάθε διαφορετικό έτος επένδυσης. Τα μεγέθη που αναφέρονται σε διαφορετικά έτη θεωρούνται ότι είναι ανεξάρτητα μεταξύ τους, ενώ αυτά που αναφέρονται στο ίδιο έτος έχουν συσχέτιση σύμφωνα με πίνακα διακύμανσης – συν διακύμανσης.

Σύμφωνα με τους (Gahungu & Smeers, 2012), στα υποδείγματα βέλτιστης μακροχρόνιας ανάπτυξης του ηλεκτρικού συστήματος δεν μπορεί να υπολογιστεί με αναλυτική μαθηματική έκφραση η βέλτιστη λύση όσον αφορά τις επενδύσεις σε ηλεκτροπαραγωγούς σταθμούς και την λειτουργία του συστήματος. Αυτό συμβαίνει



επειδή τα έσοδα των επενδύσεων – σταθμών ηλεκτροπαραγωγής εξαρτώνται από την οριακή τιμή συστήματος η οποία εξαρτάται από την ολική εγκατεστημένη ισχύ των σταθμών που λειτουργούν στην αγορά συμπεριλαμβανομένου του σταθμού του οποίου εξετάζουμε την αξία.

Επιπλέον, η εύρεση της βέλτιστης λύσης με αναλυτική μαθηματική έκφραση είναι εφικτή μόνο όταν χρησιμοποιούνται συγκεκριμένες στοχαστικές ανελίξεις οι οποίες τις περισσότερες φορές δεν προσομοιώνουν με ικανοποιητικό τρόπο τα εν λόγω μεγέθη.

Στην περίπτωση της παρούσας διατριβής που έχουμε χρησιμοποιήσει την Γεωμετρική Κίνηση Brown (GBM), η εύρεση αναλυτικής λύσης για την αξία των σταθμών ηλεκτροπαραγωγής είναι εφικτή. Αυτό οφείλεται σε δύο λόγους. Πρώτον η GBM έχει χρησιμοποιηθεί εκτενώς στην βιβλιογραφία. Η μαθηματική της έκφραση είναι απλή ώστε να επιλύεται αναλυτικά η διαφορική εξίσωση που προσδιορίζει την αξία μιας επένδυσης όταν ορισμένες παράμετροί της ακολουθούν την GBM. Επιπλέον στην παρούσα διατριβή έχει γίνει μια ακόμα υπόθεση. Για την εύρεση της αξίας ενός σταθμού ηλεκτροπαραγωγής για ένα εξεταζόμενο έτος επένδυσης γίνεται υπόθεση σχετικά με την μελλοντική εξέλιξη της Οριακής Τιμής του Συστήματος(ΟΤΣ) κατά το έτος κατασκευής της μονάδας, δηλαδή ότι ακολουθεί στοχαστική ανέλιξη με δεδομένη τάση και μεταβλητότητα. Τα έσοδα όμως της μονάδας συνεχίζουν να αποτελούν άγνωστη μεταβλητή του προβλήματος αφού οι ώρες λειτουργίας και ένταξης των μονάδων του συνολικού συστήματος δεν είναι γνωστές εκ των προτέρων.

Στην συνέχεια, θα προσπαθήσουμε να βρούμε αριθμητικά την αξία των επενδύσεων με χρήση δειγμάτων στοχαστικών ανελίξεων. Αυτό γίνεται για τους παρακάτω λόγους. Πρώτα, ο στόχος είναι η ανάπτυξη ενός γενικού υποδείγματος που θα μπορέσει να προσομοιώσει γενικότερες στοχαστικές ανελίξεις και όχι μόνο συγκεκριμένες για τις οποίες μπορεί να επιλυθεί αναλυτικά η διαφορική εξίσωση που περιγράφει την αξία της επένδυσης. Δεύτερον, η υπόθεση ότι η Οριακή Τιμή Συστήματος δεν έχει ανάδραση από τις πραγματοποιούμενες επενδύσεις είναι περιοριστική για το υπόδειγμα. Η εξάλειψη αυτού του περιορισμού αφορά μια από τις επεκτάσεις του συγκεκριμένου υποδείγματος.

Συνεπώς η βέλτιστη ανάπτυξη ενός ηλεκτρικού συστήματος σύμφωνα με την μέθοδο των Real Options θα βρεθεί αριθμητικά με χρήση αντιπροσωπευτικών δειγμάτων των χρησιμοποιούμενων ανελίξεων. Για το σκοπό αυτό, η προσομοίωση των τιμών των στοχαστικών μεγεθών του προβλήματος έγινε με δειγματοληψία χρησιμοποιώντας τη στοχαστική ανέλιξη Γεωμετρική Κίνηση Brown (Geometric Brownian Motion) θεωρώντας τα μεγέθη συσχετισμένα σύμφωνα με πίνακα διακύμανσης – συν διακύμανσης (Πίνακας 3-3).

Έτσι για κάθε έτος θεώρησης επένδυσης θεωρήσαμε διαφορετικά δείγματα των στοχαστικών παραμέτρων

$$fp_{q,i,f,\tau,t}, ETSp_{q,\tau,t}, \alpha_{q,i,s,t}$$

όπου:  $q$ : το σύνολο των θεωρούμενων δειγμάτων-σεναρίων των στοχαστικών μεγεθών

$fp_{q,i,f,\tau,t}$  τιμή προσφοράς του καυσίμου  $f$  στην χώρα  $i$  την χρονιά  $t$  στο σενάριο  $q$  όπως θεωρήθηκε για επένδυση στο έτος  $\tau$  [€/MWh]

$ETSp_{q,\tau,t}$  τιμή δικαιωμάτων των εκπομπών  $CO_2$  στην αγορά του ETS (Emission trading scheme ETS) την χρονιά  $t$  στο σενάριο  $q$  όπως θεωρήθηκε για επένδυση το έτος  $\tau$  [€/tnCO<sub>2</sub>]

$\alpha_{q,i,s,t}$  τιμή του σημείου τομής της αντίστροφης συνάρτησης ζήτησης με τον κατακόρυφο άξονα στο σενάριο  $q$  την τυπική ώρα  $s$  που αφορά την χώρα  $i$  για το δείγμα-σενάριο  $q$ .

Αναλύθηκε προηγουμένως πώς μπορεί να γίνει δειγματοληψία ανεξάρτητων τυχαίων μεταβλητών που ακολουθούν την κανονική κατανομή (κεφάλαιο 3.2.3). Θα αναλυθεί στη συνέχεια η διαδικασία δειγματοληψίας συσχετισμένων τυχαίων μεταβλητών που ακολουθούν την Γεωμετρική Κίνηση Brown από γνωστό πίνακα διακύμανσης – συνδιακύμανσης.

Αρχικά παράγουμε δείγματα της Wiener process  $W_{q,j,\tau}$  τόσα σε αριθμό όσα είναι τα θεωρούμενα σενάρια και τα στοχαστικά μεγέθη για κάθε έτος θεώρησης επένδυσης  $\tau$ . Τα δείγματα αυτά είναι ανεξάρτητα μεταξύ τους αφού προέρχονται από την ανέλιξη Wiener. Στην συνέχεια πολλαπλασιάζουμε τα δείγματα αυτά με τον κάτω τριγωνικό πίνακα Cholesky  $L$  του πίνακα διακύμανσης – συνδιακύμανσης που έχει υποτεθεί για την συσχέτιση των στοχαστικών ανελιξεων. Στην συνέχεια προσθέτουμε την τάση της Γεωμετρικής Κίνησης Brown, οπότε προκύπτουν τα δείγματα των συσχετισμένων στοχαστικών ανελιξεων. (Kroese, Taimre, & Botev, 2011)

Η μεθοδολογία αυτή ακολουθείται για την παραγωγή των δειγμάτων των στοχαστικών παραμέτρων για κάθε εξεταζόμενο έτος επένδυσης  $\tau$ . Στο πλαίσιο της παρούσας διατριβής θεωρήσαμε 3000 δείγματα για τις χρησιμοποιούμενες στοχαστικές ανελιξεις, δηλαδή προέκυψαν 3000 σενάρια. Στη συνέχεια, χρησιμοποιώντας τον αλγόριθμο simultaneous backward reduction όπως αναλύεται από τους Heitsch και Roemisch (Heitsch & Roemisch, 2003) βρήκαμε 100 αντιπροσωπευτικά δείγματα του αρχικού συνόλου δειγμάτων. Από τον αλγόριθμο προέκυψαν τα νέα αντιπροσωπευτικά δείγματα καθώς και η αντίστοιχη διαφοροποιημένη πιθανότητα κάθε σεναρίου. Έτσι, στο

υπόδειγμα των δικαιωμάτων προαίρεσης χρησιμοποιήσαμε αυτά τα 100 αντιπροσωπευτικά δείγματα.

### 3.5 Μετασχηματισμός προβλημάτων σε μορφή μεικτής συμπληρωματικότητας - Η έννοια της συμπληρωματικότητας

Υποθέτουμε ότι θέλουμε να μεγιστοποιήσουμε την συνάρτηση  $f(\cdot)$  με  $M$  περιορισμούς που ορίζονται με ισότητες (Mas-Colell, Whinston, & Green, 1995)..

$$\max_{x \in \mathbb{R}^N} f(x) \tag{3-7}$$

υ.π.

$$\begin{aligned} g_1(x) &= \bar{b}_1 \\ &\cdot \\ &\cdot \\ &\cdot \\ g_M(x) &= \bar{b}_M \end{aligned} \tag{3-8}$$

όπου οι παραπάνω συναρτήσεις ορίζονται σε ένα ανοικτό σύνολο  $A \subset \mathbb{R}^N$  ή στο  $\mathbb{R}$  και  $N \geq M$ .

Το σύνολο των  $x \in \mathbb{R}^N$  που ικανοποιεί τις περιορισμούς του προβλήματος (3-7)-(3-8) δηλώνεται

$$C = \{x \in \mathbb{R}^N : g_m(x) = \bar{b}_m \text{ για } m = 1, \dots, M\} \tag{3-9}$$

και ορίζει τον χώρο εφικτών λύσεων του προβλήματος.

Η χρήση της συμπληρωματικότητας κατά τη μοντελοποίηση γενικεύει τα διάφορα επιμέρους μη γραμμικά προβλήματα βελτιστοποίησης σε ένα σύστημα ισοτικών και ανισοτικών σχέσεων μέσω των συνθηκών Karush-Kuhn-Tucker conditions (KKT).

**Θεώρημα 3-1.** (Συνθήκες Karush-Kuhn-Tucker)[3] Υποθέτουμε ότι το διάνυσμα  $\bar{x} \in C$  είναι τοπικό μέγιστο του προβλήματος (3-7)-(3-8) και ότι οι συνθήκες κανονικότητας ισχύουν. Τότε υπάρχουν πολλαπλασιαστές  $\lambda_m \in \mathbb{R}$  ένας για κάθε περιορισμό ισότητας και  $\lambda_k \in \mathbb{R}_+$  ένας για κάθε περιορισμό ανισότητας τέτοιοι ώστε

a) Για κάθε  $n = 1, \dots, N$ ,

$$\frac{\partial f(\bar{x})}{\partial x_n} = \sum_{m=1}^M \lambda_m \cdot \frac{\partial g_m(\bar{x})}{\partial x_n} + \sum_{k=1}^K \lambda_k \cdot \frac{\partial h_k(\bar{x})}{\partial x_n} \quad (3-10)$$

ή

$$\nabla f(\bar{x}) = \sum_{m=1}^M \lambda_m \cdot \nabla g_m(\bar{x}) + \sum_{k=1}^K \lambda_k \cdot \nabla h_k(\bar{x}) \quad (3-11)$$

b) Για κάθε  $k = 1, \dots, K$ ,

$$\lambda_k \cdot (h_k(\bar{x}) - \bar{c}_k) = 0 \quad (3-12)$$

δηλαδή για κάθε ανισοτικό περιορισμό  $k$  ο οποίος στο σημείο του διανύσματος  $\bar{x}$  δεν ικανοποιείται με ισότητα ισχύει  $\lambda_k = 0$ .

Η συμπληρωματικότητα χρησιμοποιείται σε προβλήματα αγορών όπως του φυσικού αερίου (Gabriel, Zhuang, & Kiet, 2005), του άνθρακα (Haftendorn, Holz, & Hirschhausen, 2012) και του ηλεκτρισμού (Capros, Tasios, Vita, Mantzos, & Paroussos, Model-based analysis of decarbonising the EU economy in the time horizon to 2050, 2012; Capros, Tasios, Vita, Mantzos, & Paroussos, Transformation of the energy system in the context of the decarbonisation of the EU economy, 2012).

Η γενική μορφή του προβλήματος μεικτής συμπληρωματικότητας είναι η εξής (Ferris & Munson, PATH 4.6, 2010): Δεδομένης συνάρτησης  $f : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^n$ , να βρεθεί  $z \in \mathbb{R}^n$  έτσι ώστε να ισχύει

$$f(z) = 0$$

Στη γενική μορφή του προβλήματος μεικτής συμπληρωματικότητας τα όρια της μεταβλητής απόφασης είναι αυτά που καθορίζουν τις σχέσεις που ικανοποιεί η συνάρτηση  $f$  (Ferris & Munson, Complementarity problems in GAMS and the PATH solver, 1998). Πράγματι, έστω το κάτω όριο  $l \in \{\mathbb{R} \cup \{-\infty\}\}^n$  και το άνω όριο  $u \in \{\mathbb{R} \cup \{\infty\}\}^n$ . Σε αυτήν την περίπτωση το πρόβλημα γενικεύεται ως:

$$f(z) = 0 \text{ και } l \leq z \leq u$$

$$f(z) > 0 \text{ και } l = z$$

$$f(z) < 0 \text{ και } z = u$$

Οι παραπάνω ισοτικές και ανισοτικές σχέσεις υποδηλώνουν ότι η μεταβλητή  $z$  θα αγγίξει τα όρια στα οποία είναι ορισμένη είτε η συνάρτηση  $f(z)$  θα μηδενιστεί.

Στην περίπτωση που το κάτω όριο είναι  $l = 0$ , τότε θα ισχύει  $0 \leq z \perp f(z) \geq 0$ . Το σύμβολο  $\perp$  υποδηλώνει ότι η μία από τις δύο ανισότητες ικανοποιείται ως ισότητα. Δηλαδή, ισχύει ή  $0 = z$  και  $f(z) > 0$  ή  $0 > z$  και  $f(z) = 0$ .



## Κεφάλαιο 4

### 4 Αιτιοκρατικό υπόδειγμα αναπαράστασης ηλεκτρικού τομέα

---

#### 4.1 Εισαγωγή

Η βελτιστοποίηση ή προσομοίωση ηλεκτρικής αγοράς σε μεσο-μακροχρόνιο ορίζοντα περιλαμβάνει μοντελοποίηση των προβλημάτων: α) λειτουργίας συστήματος ηλεκτροπαραγωγής (κατανομή μονάδων – unit commitment), β) ανάπτυξης της ηλεκτροπαραγωγής μέσω επενδύσεων σε μονάδες, και γ) μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας. Τα προβλήματα αυτά είναι αλληλένδετα και πρέπει να επιλύονται ταυτόχρονα ή διαδοχικά με επαναλήψεις. Η οπτική του μεσο-μακροχρόνιου ορίζοντα υπονοεί ότι έμφαση δίδεται στην ανάπτυξη του συστήματος. Όμως η αξιολόγηση επενδύσεων προϋποθέτει δυνατότητα υπολογισμού των αναμενόμενων οικονομικών αποτελεσμάτων της επένδυσης. Για το λόγο αυτό είναι απαραίτητη η ταυτόχρονη επίλυση των τριών αλληλένδετων προβλημάτων που αναφέρθηκαν σε αυτήν την παράγραφο. Επειδή όμως η έμφαση δίδεται στις επενδύσεις δεν είναι απαραίτητο η προσομοίωση της λειτουργίας και της μεταφοράς να διαθέτουν βαθμό λεπτομέρειας αντίστοιχο με προσομοιώσεις που αποβλέπουν στη λεπτομερή απεικόνιση αξιοπιστίας, ευστάθειας ή εξισορρόπησης του συστήματος. Η έμφαση στον μεσο-μακροχρόνιο ορίζοντα απαιτεί σχετικά μικρό βαθμό λεπτομέρειας για τα προβλήματα λειτουργίας και μεταφοράς, όμως απαιτεί επίσης επαρκή βαθμό λεπτομέρειας στο μέτρο που επηρεάζει τις επενδυτικές αποφάσεις. Οι επιλογές σχετικά με την απλούστευση της αναπαράστασης των προβλημάτων λειτουργίας και μεταφοράς θα αναφερθούν συγκεκριμένα σε άλλη ενότητα αυτού του κεφαλαίου.

Στο πλαίσιο της Επιχειρησιακής Έρευνας, ο σχεδιασμός μοντέλου λειτουργίας και βέλτιστης ανάπτυξης ηλεκτρικού συστήματος ξεκινά από το μοντέλο μεταφοράς (transport model) και ειδικότερα το γενικευμένο μοντέλο μεταφοράς που περιλαμβάνει κόμβους διαμετακόμισης (transshipment) και δυνατότητα επένδυσης για αύξηση δυναμικότητας σε κόμβους προσφοράς. Όμως, οι ειδικές απαιτήσεις σχετικά με την αναπαράσταση ηλεκτρικών συστημάτων επιβάλλουν

σχεδιασμό με μεγαλύτερη πολυπλοκότητα από ό,τι στα μοντέλα μεταφοράς της Επιχειρησιακής Έρευνας.

Το μοντέλο μεταφοράς σχεδιάζεται ως γράφος που περιλαμβάνει κόμβους προσφοράς (σταθμοί παραγωγής), κόμβους ζήτησης (κατανάλωση ενέργειας) και κόμβους διαμετακόμισης (κόμβοι του δικτύου μεταφοράς). Η ποσότητα έγχυσης από κάθε κόμβο προσφοράς υπόκειται σε περιορισμό δυναμικότητας, η οποία είναι είτε δεδομένη, είτε μπορεί να μεταβληθεί μέσω ενδογενών επενδύσεων. Η απορρόφηση σε κάθε κόμβο ζήτησης είναι είτε δεδομένη, είτε μπορεί να μεταβληθεί ως αποτέλεσμα αντίδρασης των καταναλωτών στις τιμές αγοράς. Σε κάθε περίπτωση, περιορισμοί επιβάλλουν την ικανοποίηση της ζήτησης είτε αυτή είναι σταθερή είτε μεταβαλλόμενη. Η μεταφορά από κόμβους προσφοράς, μέσω κόμβων διαμετακόμισης, προς τους κόμβους ζήτησης υπόκειται σε τεχνικούς περιορισμούς, οι οποίοι είναι αφενός περιορισμοί δυναμικότητας του δικτύου μεταφοράς, αφετέρου περιορισμοί που αφορούν στο σύστημα ροών. Οι περιορισμοί που αφορούν στο σύστημα ροών εφαρμόζουν τους νόμους του Kirchhoff, και αναφέρονται στη ροή φορτίου στο δίκτυο. Λόγω των περιορισμών ροής, το πρόβλημα μεταφοράς στο πλαίσιο ηλεκτρικού συστήματος διαφέρει σημαντικά από τους περιορισμούς σχετικά με την μεταφορά που εφαρμόζονται στο κλασικό πρόβλημα μεταφοράς της Επιχειρησιακής Έρευνας. Ως προς το σημείο αυτό αναφέρονται οι κυριότερες πολυπλοκότητες που απαιτεί η μοντελοποίηση της μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας συγκριτικά με το μοντέλο μεταφοράς της Επιχειρησιακής Έρευνας. Άλλες πηγές πολυπλοκότητας αφορούν στους περιορισμούς λειτουργίας των μονάδων πέραν των περιορισμών δυναμικότητας, όπως οι περιορισμοί σχετικά με την κυκλική λειτουργία μονάδων, την έναυση/σβέση, το επίπεδο ισχύος συγχρονισμού κλπ. Εφόσον περιληφθούν περιορισμοί λειτουργίας συστήματος οι οποίοι αναφέρονται σε εφεδρείες, αξιοπιστία κλπ. το μοντέλο λειτουργίας ηλεκτρικού συστήματος γίνεται επίσης πιο πολύπλοκο συγκριτικά με το μοντέλο μεταφοράς της Επιχειρησιακής Έρευνας.

Οι άγνωστες μεταβλητές του προβλήματος μεταφοράς περιλαμβάνουν κατ' αρχήν την προσφορά σε κάθε κόμβο προσφοράς και τη ροή σε κάθε διαδρομή του δικτύου. Σε αυτές προστίθενται οι επενδύσεις (σε παραγωγή ή σε δίκτυο) αν αυτές είναι ενδογενείς, καθώς και η ζήτηση σε κάθε αντίστοιχο κόμβο αν η ζήτηση μπορεί να μεταβάλλεται.

Η ικανοποίηση των περιορισμών δεν οδηγεί σε μονοσήμαντο προσδιορισμό των αγνώστων μεταβλητών. Ο συνδυασμός των περιορισμών προσδιορίζει χώρο εφικτών λύσεων. Εντός του χώρου αυτού, ο προσδιορισμός μίας από τις λύσεις ως τελικής χρειάζεται μέθοδο αξιολόγησης των εφικτών λύσεων ή εναλλακτικά θεωρίας σχετικά με την απόρριψη λύσεων.

Όταν εφαρμόζεται αξιολόγηση των εφικτών λύσεων, αναγκαστικά η αξιολόγηση αντανακλά σύστημα προτιμήσεων κάποιου που λαμβάνει αποφάσεις για δικό του όφελος ή εξ ονόματος του κοινωνικού συνόλου. Στην περίπτωση αυτή χρειάζεται η διατύπωση συνάρτησης



αντικειμένου-στόχου, και επομένως το πρόβλημα μεταφοράς μετατρέπεται σε πρόβλημα βελτιστοποίησης. Αν υπάρχουν πολλά κριτήρια απόφασης ή και πολλοί αποφασίζοντες, η επίλυση ως πρόβλημα βελτιστοποίησης απαιτεί τη σύνθεση των κριτηρίων και των συστημάτων προτίμησης των αποφασιζόντων σε μία μοναδική συνάρτηση αντικειμένου-στόχου η οποία αξιολογεί τις εφικτές λύσεις ανάγοντάς τις σε μία μόνο διάσταση η οποία έχει ιδιότητες μονότονης διάταξης. Η ερμηνεία των αποτελεσμάτων της βελτιστοποίησης αναφέρεται σε θεωρία στο πλαίσιο της οποίας δικαιολογείται η επιλογή της συνάρτησης αντικειμένου-στόχου.

Εναλλακτικά, η επιλογή μίας μόνο από τις εφικτές λύσεις μπορεί να γίνει στη βάση θεωρίας που απορρίπτει κάποιες από τις εφικτές λύσεις. Βάση για απόρριψη εφικτών λύσεων είναι το κατά πόσον η λύση μπορεί ή όχι να αποτελεί σημείο ισορροπίας ανταγωνιστικών αγορών ή σταθερή λύση παιγνίου. Έτσι μίας λύση ή έστω ένα προσδιορισμένο υποσύνολο των εφικτών λύσεων μπορεί να θεωρηθεί αποδεκτή λύση, οπότε οι λοιπές εφικτές λύσεις απορρίπτονται. Η λύση που επιλέγεται δεν ερμηνεύεται ως βέλτιστη λύση, όπως στην περίπτωση της βελτιστοποίησης, αλλά ως λύση ισορροπίας ανταγωνιστικών μεταξύ τους συμπεριφορών αυτών που συμμετέχουν στην αγορά. Σύμφωνα με την οικονομική θεωρία, καθεμία από αυτές της συμπεριφορές είναι αποτέλεσμα βελτιστοποίησης υπό την ατομική οπτική του συμμετέχοντα στην αγορά. Η επιλεγόμενη όμως λύση είναι αποτέλεσμα ισορροπίας και με την έννοια αυτή δεν μπορεί να χαρακτηριστεί βέλτιστη λύση. Σε αυτήν την περίπτωση, δικαιολογείται ο χαρακτηρισμός του μοντέλου ως προσομοίωση του συστήματος υπό συνθήκες αγοράς, παρά ως μοντέλου βελτιστοποίησης, σε αντιδιαστολή με το μοντέλο που αναφέρθηκε παραπάνω το οποίο βελτιστοποιεί μία συνάρτηση αντικείμενο-στόχο.

Επιπλέον, η οικονομική θεωρία θεμελιώνει δυνατότητα χαρακτηρισμού της ισορροπίας ανταγωνιστικής αγοράς υπό ορισμένες περιοριστικές συνθήκες ως ισοδύναμης του αποτελέσματος βελτιστοποίησης από την οπτική του κοινωνικού συνόλου. Η ισοδυναμία ισχύει και αντίστροφα. Όμως, δεν είναι δυνατόν κάθε περίπτωση ισορροπίας αγοράς να θεωρηθεί ισοδύναμη βελτιστοποίησης. Οι περιοριστές συνθήκες προσδιορίζουν ότι η ισοδυναμία ισχύει μόνο υπό καθεστώς τέλει και πλήρους ανταγωνιστικής αγοράς. Η ισορροπία της αγοράς αυτής είναι ισοδύναμη του αποτελέσματος βελτιστοποίησης του κοινωνικού πλεονάσματος, το οποίο είναι το άθροισμα των πλεονασμάτων καταναλωτών και παραγωγών. Πρόκειται για εφαρμογή του βασικού θεωρήματος περί ανταγωνισμού της μικροοικονομικής θεωρίας, το οποίο επιτρέπει την εξεύρεση λύσης αναφοράς μέσω είτε της βελτιστοποίησης είτε της προσομοίωσης υποθέτοντας συνθήκες τέλει ανταγωνισμού. Η λύση αναφοράς έχει σημαντική χρησιμότητα, ως αποτελούσα τη βάση σύγκρισης κάθε άλλης λύσης προσομοίωσης που υποθέτει μη τέλει ανταγωνισμό.

Πιο απλά, η βέλτιστη λύση που προκύπτει από τέλεια ρυθμισμένο μονοπώλιο<sup>1</sup> είναι ακριβώς η ίδια με αυτή που προκύπτει ως ισορροπία αγοράς υπό τέλει ανταγωνισμό. Πρακτικά, για την εφαρμογή αυτής της ισοδυναμίας, πρέπει το μοντέλο βελτιστοποίησης, που περιλαμβάνει λειτουργία, ανάπτυξη και μεταφορά ηλεκτρικού συστήματος, να μεγιστοποιεί τη συνάρτηση κοινωνικού πλεονάσματος. Ομοίως, το μοντέλο προσομοίωσης πρέπει να ευρίσκει τη λύση ισορροπίας υποθέτοντας ότι όλοι οι συμμετέχοντες συμπεριφέρονται όπως όταν δρουν σε αγορά τέλει ανταγωνισμού. Μόνο υπό αυτές τις συνθήκες υφίσταται ισοδυναμία.

Ο παραπάνω συλλογισμός επιτρέπει τη γραφή γενικευμένου μοντέλου ηλεκτρικού συστήματος για μεσο-μακροχρόνιο ορίζοντα. Ξεκινώντας από το γενικευμένο μοντέλο και με εφαρμογή απλών μετασχηματισμών προκύπτουν διάφορες εκδοχές του μοντέλου ηλεκτρικού συστήματος οι οποίες επιδέχονται διαφορετικές ερμηνείες υπό πρίσμα του ανταγωνισμού στην αγορά ή τον στόχο της βελτιστοποίησης. Από πρακτικής απόψεως, δίδεται έτσι η δυνατότητα σύνταξης ενός γενικού κώδικα του μοντέλου ο οποίος μετασχηματίζεται εύκολα σε εκδοχές μοντέλων για ειδικούς σκοπούς, ως αποτέλεσμα επιλογών του χρήστη. Προφανώς, οι διάφορες εκδοχές του μοντέλου είναι κατάλληλες για ανάλυση διαφορετικών ερωτημάτων. Η εκδοχή του μοντέλου βελτιστοποίησης προσιδιάζει σε ερωτήματα μακροχρόνιου ενεργειακού σχεδιασμού ή και αναλύσεων που αφορούν στην ανταγωνιστικότητα νέων τεχνολογιών. Η εκδοχή του μοντέλου ισορροπίας αγοράς προσιδιάζει σε ερωτήματα σχετικά με σχεδιασμό αγορών ηλεκτρικής ενέργειας ή σχετικά με πολιτικές για τον ανταγωνισμό και τις επενδύσεις. Εκδοχές μοντέλου που διατηρούν τις τεχνικές λεπτομέρειες της κατανομής μονάδων είναι κατάλληλες για μελέτες μεσο-χρόνιου ορίζοντα. Σημειώνεται ότι η διατήρηση των τεχνικών λεπτομερειών δυσκολεύει την αριθμητική επίλυση του μοντέλου και επομένως ο χρήστης αναγκάζεται να απλουστεύσει άλλες πλευρές του μοντέλου, όπως για παράδειγμα τη διαχρονική επίλυση του μοντέλου, η οποία προσιδιάζει σε αναλύσεις σχετικά με επενδύσεις. Τέτοια διλήμματα συναντώνται συχνά στην πράξη και επομένως διάφορες εκδοχές του γενικού μοντέλου προδιαγράφονται και με γνώμονα την επιτυχή (και χρονικά ανεκτή) αριθμητική επίλυσή του.

Στη συνέχεια του κεφαλαίου προτείνεται η κωδικοποίηση του γενικευμένου μοντέλου ηλεκτρικού συστήματος σε μεσο-μακροχρόνιο ορίζοντα και επιδεικνύεται ποι οι μετασχηματισμοί χρειάζονται για την κωδικοποίηση εκδοχών του μοντέλου για ειδικούς σκοπούς εφαρμογών. Με τον τρόπο αυτό προκύπτουν και όλες οι δυνατές εκδοχές μοντέλων ηλεκτρικού συστήματος σε μεσο-μακροχρόνιο ορίζοντα που συναντώνται στην βιβλιογραφία. Επομένως η αξία του γενικευμένου μοντέλου είναι τόσο θεωρητική όσο και πρακτική.

---

<sup>1</sup> Το τέλεια ρυθμισμένο μονοπώλιο τιμολογεί στο μακροχρόνιο μέσο κόστος αναπτύσσοντας το σύστημα ώστε αυτό να ταυτίζεται με το μακροχρόνιο οριακό κόστος. Εξάλλου σε αυτό ακριβώς το σημείο τιμολόγησης οδηγεί μακροχρόνια και ο τέλει ανταγωνισμός.

## 4.2 Συμβολισμοί

### 4.2.1 Σύνολα

$i$  το σύνολο των χωρών που αναπαριστούνται στο υπόδειγμα

$\tau, t$  το σύνολο των ετών τα οποία το μοντέλο επιλύει (το πρώτο είναι ο χρόνος επένδυσης στο υπόδειγμα ενός σταθμού και το δεύτερο  $t$  είναι ο χρόνος λειτουργίας του σταθμού)

$n$  το σύνολο των σταθμών ηλεκτροπαραγωγής

$nc$  το σύνολο των σταθμών ηλεκτροπαραγωγής με δυνατότητα κατακράτησης

$nch$  το σύνολο των σταθμών συμπαραγωγής

$rn$  το σύνολο των σταθμών ηλεκτροπαραγωγής που χρησιμοποιούν αποκλειστικά ανανεώσιμες πηγές

$th$  το σύνολο των θερμικών σταθμών ηλεκτροπαραγωγής

$vrS$  το σύνολο των διακοπτόμενων σταθμών που χρησιμοποιούν ανανεώσιμες πηγές

$f$  το σύνολο των καυσίμων

$h_{n,f}$  αντιστοίχιση του καυσίμου  $f$  που μπορεί να χρησιμοποιηθεί από τον σταθμό  $n$

$s$  το σύνολο των τυπικών ωρών της καμπύλης φορτίου των τυπικών ημερών όπως προσομοιώνεται στο υπόδειγμα σε χρονολογική σειρά δηλαδή δύο συνεχόμενα στοιχεία του αναπαριστούν συνεχόμενες ώρες

$jc$  το σύνολο των διαφορετικών λειτουργιών ενός σταθμού συμπαραγωγής

$k, kk$  το σύνολο των διασυνδέσεων μεταξύ των χωρών

$ka_{k,t}$  το σύνολο των ενεργών διασυνδέσεων μεταξύ των χωρών

$ACk_{k,t}, DCk_{k,t}$  υποσύνολα του συνόλου των διασυνδέσεων τη χρονιά  $t$ , το μεν πρώτο περιλαμβάνει τις AC διασυνδέσεις ενώ το δεύτερο τις DC

$rg$  το σύνολο των περιοχών ομαδοποίησης χωρών

$maprgi_{rg,i,t}$  αντιστοίχιση του κόμβου-χώρας  $i$  στην περιοχή  $rg$  το έτος  $t$

$maprgk_{rg,k,t}$  αντιστοίχιση της διασύνδεσης  $k$  στην περιοχή  $rg$  το έτος  $t$

$ACkr_{rg,k,t}$  αντιστοίχιση της ενεργής AC διασύνδεσης  $k$  στην περιοχή  $rg$  το έτος  $t$

$ntcl$  το σύνολο των διασυνδέσεων με περιορισμό ntc (Καθαρή Ικανότητα Μεταφοράς)

$x_{k,i,ii}$  αντιστοίχιση της διασύνδεσης  $k$  μεταξύ του κόμβου-χώρας  $i$  και του κόμβου-χώρας  $ii$

$xntc_{ntcl,i,ii}$  αντιστοίχιση της διασύνδεσης  $ntcl$  μεταξύ του κόμβου-χώρας  $i$  και του κόμβου-χώρας  $ii$

#### 4.2.2 Παράμετροι

$a_{i,s,t}$  σημείο τομής της αντίστροφης συνάρτησης ζήτησης με τον κατακόρυφο άξονα

$p_{i,s,t} = a_{i,s,t} - \beta_{i,s,t} \cdot D_{i,s,t}$  η αντίστροφη συνάρτηση ζήτησης της ηλεκτρικής ενέργειας από την οποία προκύπτει η τιμή ηλεκτρισμού που είναι διατεθειμένοι να πληρώσουν οι καταναλωτές για ζήτηση ( $D_{i,s,t}$  [€/MW]). Θεωρείται γραμμική αντίστροφη συνάρτηση της ζήτησης ηλεκτρισμού ( $D_{i,s,t}$  με παραμέτρους  $a_{i,s,t}$  και  $\beta_{i,s,t}$  και υπολογίζεται από τον τύπο:

$mu_{p_t}$  άνω όριο του κέρδους ως ποσοστό του κόστους (πχ. 10%)

$\delta_t$  προεξοφλητικό επιτόκιο την χρονιά  $t$  [%]. Χρησιμοποιείται για την αναγωγή χρημάτων μελλοντικών ετών στο παρόν έτος ώστε να προκύψει κατάλληλα η αντικειμενική συνάρτηση

$vc_{i,n,\tau,t}$  γνησίως αύξουσα συνάρτηση ανά μονάδα παραγόμενης ενέργειας του μεταβλητού κόστους του σταθμού  $n$  που κατασκευάστηκε την χρονιά  $\tau$  στην χώρα  $i$  και λειτουργεί την χρονιά  $t$  [€/MWh]

$fc_{i,n,\tau,t}$  γνησίως αύξουσα συνάρτηση του σταθερού κόστους λειτουργίας και συντήρησης του σταθμού  $n$  που κατασκευάστηκε την χρονιά  $\tau$  στην χώρα  $i$  και λειτουργεί την χρονιά  $t$  [€/MW]

$fp_{i,f,t}$  γνησίως αύξουσα συνάρτηση τιμής προσφοράς του καυσίμου  $f$  στην χώρα  $i$  την χρονιά  $t$  ως προς την χρήση του καυσίμου [€/MWh]

$ETSp_t$  τιμή της αγοράς των δικαιωμάτων των εκπομπών  $CO_2$  (Emission trading scheme ETS) την χρονιά  $t$  στην Ευρωπαϊκή Ένωση [€/tn $CO_2$ ]

$ce_{i,t}$  γνησίως αύξουσα συνάρτηση κόστους της υπηρεσίας αποθήκευσης των κατακρατούμενων τόνων  $CO_2$  ανά κατακρατούμενο τόνο  $CO_2$  στην χώρα  $i$  την χρονιά  $t$  που προσομοιώνει την δυνατότητα κατασκευής δικτύου μεταφοράς αλλά και χώρου αποθήκευσης [€/tn $CO_2$ ]

- $\rho_{i,n,t}$  σταθμισμένο μέσο κόστος κεφαλαίου το οποίο διαφέρει ανά σταθμό και χρονιά κατασκευής
- $ni_{i,n,t,t}$ ,  $ne_{i,n,t,t}$  συντελεστές πληρωμής την χρονιά  $t$  ετήσιου τοκοχρεολυσίου για καινούργια επένδυση και επένδυση ανακαίνισης σταθμού που διαφέρουν ανά χώρα, σταθμό και χρονιά κατασκευής
- $icp_{i,n,t}$  αύξουσα συνάρτηση του ανά μονάδα ισχύος κεφαλαιουχικού κόστους του σταθμού  $n$  την χρονιά επένδυσης  $t$ . Προσομοιώνει την ευκολία ή δυσκολία εύρεσης θέσης επένδυσης είτε εξαιτίας μορφολογίας του εδάφους είτε εξαιτίας πολιτικών περιορισμών [€/MW]
- $ice_{i,n,t}$  αύξουσα συνάρτηση του ανά μονάδα ισχύος κεφαλαιουχικού κόστους επέκτασης του σταθμού  $n$  την χρονιά επένδυσης  $t$  [€/MW]
- $npx_{i,t,t}$  συντελεστές πληρωμής την χρονιά  $t$  ετήσιου τοκοχρεολυσίου για επένδυση στροβίλου αντλησιοταμιευτικού σταθμού που κατασκευάστηκε την χρονιά  $t$  και βρίσκεται στην χώρα  $i$
- $ad_s$  ημέρες του έτους στις οποίες επαναλαμβάνεται η τυπική ώρα  $s$
- $uo_{i,n,t,s,t}$  διαθεσιμότητα λόγω συντήρησης του σταθμού  $n$  που βρίσκεται στην χώρα  $i$  την τυπική ώρα  $s$  κατασκευάστηκε την χρονιά  $t$  και λειτουργεί την  $t$  [%]
- $ccrlm_{i,n,t,t}$  πίστωση της εγκατεστημένης ισχύος του σταθμού  $n$  που κατασκευάστηκε την χρονιά  $t$  στην χώρα  $i$  και λειτουργεί την χρονιά  $t$  στην απαίτηση του λειτουργού του συστήματος ύπαρξης μακροχρόνιας εφεδρείας
- $rlsm_{i,t}$  ποσοστό της ζητούμενης ηλεκτρικής ενέργειας που προσομοιώνει την ελάχιστη απαίτηση του λειτουργού του συστήματος για τριτεύουσα εφεδρεία [%]
- $rlm_{i,t}$  ποσοστό της ζητούμενης ηλεκτρικής ενέργειας που προσομοιώνει την ελάχιστη απαίτηση του λειτουργού του συστήματος για μακροχρόνια εφεδρεία [%]
- $mf_{i,f,t}$  μέγιστη διαθεσιμότητα καυσίμου  $f$  στην χώρα  $i$  την χρονιά  $t$  [GWh]
- $hrs_s$  ώρες του έτους αντιστοιχούσες στην τυπική ώρα  $s$
- $hr_{i,n,t,t}$  ειδική κατανάλωση θερμότητας του σταθμού  $n$  που κατασκευάστηκε την χρονιά  $t$  στην χώρα  $i$  και λειτουργεί την χρονιά  $t$
- $emf_{i,f,t}$  συνάρτηση εκπομπής του καυσίμου  $f$  στην χώρα  $i$  την χρονιά  $t$  [tnCO<sub>2</sub>/toe καιόμενου καυσίμου ]

- $slv_{i,nch,jc}$  ποσοστό παραγωγής ατμού από κάθε λειτουργία  $jc$  συγκριτικά με τη μέγιστη ισχύ ατμού που μπορεί να παραχθεί από τη μονάδα συμπαραγωγής  $nch$  στη χώρα  $i$
- $A_{i,nch,jc}$  αντίστροφη τιμή της κλίσης της ευθείας που αντιστοιχεί στη λειτουργία  $jc$  του σταθμού συμπαραγωγής  $nch$  στη χώρα  $i$
- $helr_{i,nch,\tau}$  λόγος ισχύος ηλεκτρισμού προς ισχύ ατμού της μονάδας συμπαραγωγής  $nch$  που κατασκευάστηκε τη χρονιά  $\tau$  στη χώρα  $i$
- $esf_{i,f,t}$  συνάρτηση κατακράτησης εκπομπών  $CO_2$  του καυσίμου  $f$  στην χώρα  $i$  την χρονιά  $t$  [t $CO_2$ /toe καιόμενου καυσίμου ]
- $cro_{i,n,\tau,t}$  εγκατεστημένη ισχύς του σταθμού  $n$  που προϋπάρχει της χρονιάς έναρξης της προσομοίωσης κατασκευάστηκε την χρονιά  $\tau$ , λειτουργεί την χρονιά  $t$  και βρίσκεται στην χώρα  $i$  [GW]
- $pcxo_{i,t}$  εγκατεστημένη ισχύς των αντλησιοσταμιευτικών μονάδων που λειτουργούν την χρονιά έναρξης της προσομοίωσης [GW]
- $mn\theta_{i,n,\tau,t}$  τεχνικά ελάχιστη παραγωγή ως ποσοστό της ονομαστικής ισχύος του σταθμού  $n$  που κατασκευάστηκε την χρονιά  $\tau$  και λειτουργεί την χρονιά  $t$  [%]
- $ra_{i,n,\tau,s,t}$  εξωγενή διαθεσιμότητα των διακοπτόμενων σταθμών  $n$  ανά χρονιά κατασκευής  $\tau$  τυπική ώρα  $s$  και χρονιά λειτουργίας  $t$
- $rmpu_{i,n,\tau,t}, rmpd_{i,n,\tau,t}$  μέγιστος ρυθμός ανάληψης φορτίου και μείωσης της παραγωγής ως ποσοστό της ονομαστικής ισχύος του σταθμού [%]
- $gcu_{k,t}$  μοναδιαίο κόστος χρήσης της διασύνδεσης  $k$  την χρονιά  $t$  [M€\GWh]
- $Tx_{k,t}$  χωρητικότητα της διασύνδεσης  $k$  την χρονιά  $t$  [GW]
- $NTx_{k,t}$  καθαρή δυναμικότητα μεταφοράς της διασύνδεσης  $k$  την χρονιά  $t$  όπως έχει καθοριστεί για κάθε  $k$
- $A_{k,i,t}$  η μήτρα πρόσπτωσης του δικτύου
- $PTDF_{k,i,t}$  ο πίνακας με τους συντελεστές διανομής για την μεταφορά ισχύος οποίος δείχνει την φόρτιση κάθε γραμμής λόγω έγχυσης στους διάφορους ζυγούς όπως έχει οριστεί στο υποκεφάλαιο 4.3.10.3.1
- $Y_{i,s,t}$  οι εγχύσεις ενεργού ισχύος στην χώρα-κόμβο  $i$  την τυπική ώρα  $s$  και την χρονιά  $t$  [GW]
- $swing_{rg,i,t}$  κόμβος αναφοράς των περιοχών  $rg$  το έτος  $t$ . Η παράμετρος λαμβάνει τιμή 1 για τον κόμβο-χώρα αναφοράς  $i$  της περιοχής  $rg$  και 0 για τους άλλους.

$intc_{ntcl,k}$  αντιστοίχιση της διασύνδεσης  $k$  με τη διασύνδεση με περιορισμό  $ntc$  ( $ntcl$ )

$Intmax_{ntcl,t}$  μέγιστη καθαρή ικανότητα μεταφοράς της διασύνδεσης με περιορισμό  $ntc$  ( $ntcl$ ) τη χρονιά  $t$

$B'_{rg,ii,t}$  ο πίνακας αγωγιμοτήτων του δικτύου μεταξύ του κόμβου-χώρας  $i$  και του κόμβου-χώρας  $ii$  στην περιοχή  $rg$  τη χρονιά  $t$

$H_{rg,k,i,t}$  η μήτρα μεταφοράς του δικτύου στην περιοχή  $rg$  τη χρονιά  $t$

$\Omega_{k,kk,t}$  ο τετραγωνικός πίνακας  $k \times kk$ , ο οποίος έχει τα μη διαγώνια στοιχεία του μηδέν και τα διαγώνια είναι το αρνητικό της αγωγιμότητας της γραμμής  $k$

### 4.2.3 Μεταβλητές του προβλήματος

$D_{i,s,t}$  ζήτηση ηλεκτρισμού στην χώρα  $i$  την τυπική ώρα  $s$  την χρονιά  $t$  [GW]

$G_{i,n,\tau,s,t}$  παραγωγή του σταθμού  $n$  που κατασκευάστηκε την χρονιά  $\tau$  στην χώρα  $i$  λειτουργεί την τυπική ώρα  $s$  και χρονιά  $t$  [GW]

$GR_{i,n,\tau,s,t}$  μέρος του σταθμού πάνω από την παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια και μέχρι την ονομαστική ισχύ που προσφέρει στην τριτεύουσα εφεδρεία

$K_{i,n,\tau,t}$  εγκατεστημένη ισχύς του σταθμού  $n$  που κατασκευάστηκε την χρονιά  $\tau$  στην χώρα  $i$  και λειτουργεί την χρονιά  $t$  [GW]

$DK_{i,n,\tau,t}$  μέρος του σταθμού  $n$  που έχει κατασκευαστεί την χρονιά  $\tau$  και το έτος λειτουργίας  $t$  δεν λειτουργεί (είναι κλειστό) [GW]

$EI_{i,n,\tau}$  επένδυση ανακαίνισης την χρονιά  $\tau$  του σταθμού  $n$  στην χώρα  $i$  [GW]

$I_{i,n,\tau}$  επένδυση κατασκευής την χρονιά  $\tau$  του σταθμού  $n$  στην χώρα  $i$  [GW]

$DC_{i,n,\tau,t}$  αποξήλωση του σταθμού  $n$  που κατασκευάστηκε το έτος  $\tau$  στην χώρα  $i$  την χρονιά  $t$  [GW]

$F_{i,f,t}$  καύσιμο  $f$  που χρησιμοποιήθηκε για ηλεκτροπαραγωγή στην χώρα  $i$  την χρονιά  $t$  [GWh]

$EM_{i,t}$  εκπεμπόμενοι τόνοι CO<sub>2</sub> της χώρας  $i$  την χρονιά  $t$  [MtnCO<sub>2</sub>]

$ES_{i,t}$  τόνοι CO<sub>2</sub> που κατακρατήθηκαν (και δεν εκπέμφθηκαν) στην χώρα  $i$  την χρονιά  $t$  [MtnCO<sub>2</sub>]

$PX_{i,s,t}$  παραγωγή ηλεκτρισμού την τυπική ώρα  $s$  στην χώρα  $i$  και χρονιά  $t$  από τους αντλησιοταμιευτικούς σταθμούς [GW]

$PI_{i,s,t}$  ηλεκτρική ενέργεια που χρησιμοποιείται για άντληση από τους αντλησιοταμιευτικούς σταθμούς [GW]

$PCI_{i,\tau,t}, PCX_{i,\tau,t}, PCS_{i,\tau,t}$  επενδύσεις αύξησης της δυναμικότητας των αντλιών, των στροβίλων και της χωρητικότητας των ταμιευτήρων των αντλησιοταμιευτικών σταθμών. Οι μονάδες των δύο πρώτων είναι σε GW και του τρίτου σε GWh.

$FL_{k,s,t}$  ροή ενεργού ισχύος στην διασύνδεση k την τυπική ώρα s και την χρονιά t [GW]. Η τιμή της μπορεί να είναι θετική ή αρνητική εξαρτώμενη από το αν η φορά ροής της ισχύος είναι ίδια ή αντίθετη με την συμβατική φορά της γραμμής στον πίνακα πρόσπτωσης.

$Flld_{kk,k,s,t}$  η ροή ενεργού ισχύος στην διασύνδεση k την τυπική ώρα s την χρονιά t [GW] όταν η διασύνδεση kk βγει εκτός λειτουργίας. Όσον αφορά το πρόσημο της ισχύει η ίδια σύμβαση όπως στην  $FL_{k,s,t}$

$YA_{i,s,t}$  η έγχυση ενεργού ισχύος στον κόμβο i την τυπική ώρα s την χρονιά t που πραγματοποιείται στο AC υποδίκτυο των διασυνδέσεων [GW]

$YD_{i,s,t}$  η έγχυση ενεργού ισχύος στον κόμβο i την τυπική ώρα s την χρονιά t που πραγματοποιείται στο DC υποδίκτυο των διασυνδέσεων [GW]

$CGE_{i,nch,\tau,s,t}$  παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος του σταθμού συμπαραγωγής nch που κατασκευάστηκε την χρονιά τ στην χώρα i λειτουργεί την τυπική ώρα s και χρονιά t [GW]

$CGEm_{i,nch,\tau,s,t}$  μέγιστη παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος του σταθμού συμπαραγωγής nch που κατασκευάστηκε την χρονιά τ στην χώρα i λειτουργεί την τυπική ώρα s και χρονιά t [GW]

$CGS_{i,nch,\tau,s,t}$  παραγωγή ισχύος ατμού του σταθμού συμπαραγωγής nch που κατασκευάστηκε την χρονιά τ στην χώρα i λειτουργεί την τυπική ώρα s και χρονιά t [GW]

$CGSj_{i,nch,\tau,s,t,jc}$  παραγωγή ισχύος ατμού από τη λειτουργία jc του σταθμού συμπαραγωγής nch που κατασκευάστηκε την χρονιά τ στην χώρα i λειτουργεί την τυπική ώρα s και χρονιά t [GW]

$FCH_{i,nch,f,\tau,s,t}$  παραγωγή του σταθμού συμπαραγωγής nch που κατασκευάστηκε την χρονιά τ στην χώρα i λειτουργεί την τυπική ώρα s και χρονιά t [GW]

$TH_{rg,i,s,t}$  η φάση του διανύσματος της τάσης στον κόμβο-χώρα i την τυπική ώρα s την χρονιά t

### 4.3 Το Μοντέλο Κατανομής Μονάδων

Η απλή εκδοχή του μοντέλου κατανομής μονάδων είναι παρόμοια με το μοντέλο μεταφοράς της Επιχειρησιακής Έρευνας. Κόμβοι προσφοράς είναι οι μονάδες ηλεκτροπαραγωγής και κόμβοι



ζήτησης είναι οι κατηγορίες καταναλωτών ηλεκτρικής ενέργειας. Στην παρούσα ενότητα δεν αναπαρίσταται η μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας, και επομένως θεωρείται ότι όλες οι μονάδες ηλεκτροπαραγωγής και οι καταναλωτές δρουν στον ίδιο ζυγό. Η απλούστευση αυτή θα αρθεί σε επόμενη ενότητα.

#### 4.3.1 Χρονική διακύμανση φορτίου και άλλων παραμέτρων

Λόγω των περιορισμένων σχετικά δυνατοτήτων αποθήκευσης της ηλεκτρικής ενέργειας, το μοντέλο οφείλει να θεωρήσει χωριστά την ισορροπία προσφοράς και ζήτησης σε κάθε χρονική στιγμή. Θεωρώντας αναπαράσταση σε διακριτό χρόνο, επιλέγεται το χρονικό μήκος κάθε τμήματος του διακριτού χρόνου. Χωρίς βλάβη της γενικότητας, ας θεωρηθεί ότι το μήκος του διακριτού χρόνου είναι μία ώρα και ότι το μοντέλο αναπαριστά τις 8760 ώρες κάθε έτους χωριστά.

Η αναπαράσταση όλων των ωρών κάθε έτους χωριστά οδηγεί σε μοντέλο μεγάλου μεγέθους και αυξάνει το χρόνο αριθμητικής επίλυσης. Για πρακτικούς σκοπούς γίνεται συχνά ομαδοποίηση των ωρών ενός έτους σε, για παράδειγμα, τυπικές ημέρες. Στατιστικές μέθοδοι χρησιμοποιούνται για το σκοπό της σύντμησης σε τυπικές ημέρες, ώστε η ωριαία κατανομή φορτίου κατά τις τυπικές ημέρες να προσεγγίζει ικανοποιητικά τη διακύμανση και τις μέσες τιμές της πλήρους ωριαίας κατανομής. Στην περίπτωση εφαρμογής με τυπικές ημέρες τα ετήσια μεγέθη ενέργειας προκύπτουν πολλαπλασιάζοντας τα μεγέθη κάθε ώρας με το πλήθος κάθε τυπικής ημέρας εντός ενός έτους.

Ανάλογα με το βαθμό λεπτομέρειας του μοντέλου, είναι δυνατόν και άλλοι παράμετροι, εκτός του φορτίου ηλεκτρικής ενέργειας, να πρέπει να αναπαρίστανται με προσδιορισμό κατά ώρα. Αυτό επιβάλλεται όταν έχει σημασία (τεχνική ή οικονομική) ο συγχρονισμός των παραμέτρων αυτών με τη χρονική διακύμανση του ηλεκτρικού φορτίου.

Τα κυριότερα παραδείγματα είναι τα εξής:

α) Ζήτηση βιομηχανικού ατμού ή διανεμόμενης θερμότητας.

Ο συγχρονισμός της ηλεκτροπαραγωγής με τη ζήτηση ατμού ή θερμότητας έχει σημασία για την αναπαράσταση της λειτουργίας των μονάδων συμπαραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και θερμότητας. Στην περίπτωση που το μοντέλο αναπαριστά ανταγωνισμό της συμπαραγωγής με άλλους τρόπους παραγωγής ατμού ή θερμότητας, το μοντέλο οφείλει να περιλαμβάνει αντίστοιχες μονάδες, όπως λέβητες, που δεν παράγουν ηλεκτρική ενέργεια. Οι περιορισμένες δυνατότητες αποθήκευσης του ατμού ή της θερμότητας είναι η αιτία που επιβάλλεται ο συγχρονισμός ηλεκτροπαραγωγής και παραγωγής ατμού ή θερμότητας. Μέσω του

συγχρονισμού μπορούν να περιληφθούν στο μοντέλο τεχνικοί περιορισμοί λειτουργίας μονάδων συμπαραγωγής ανάλογα με την τεχνολογία τους.

β) Προσφορά φυσικού αερίου ή άλλων ενεργειακών μορφών με δικτυακή παροχή.

Οι ενεργειακές μορφές που παρέχονται μέσω δικτύου, όπως το φυσικό αέριο και το υδρογόνο, έχουν συνήθως περιορισμένες δυνατότητες αποθήκευσης, είτε από τεχνικής σκοπιάς είτε επειδή το κόστος αποθήκευσης είναι μεγάλο. Είναι σύνηθες στις περιπτώσεις αυτές να υπεισέρχονται στα τιμολόγια των ενεργειακών αυτών μορφών επιβαρύνσεις που αναφέρονται σε χρήση τους σε περιόδους αιχμής ζήτησης για τις μορφές αυτές (άλλοτε σε ωριαία, ή ημερήσια ή εποχιακή βάση). Επίσης στην περίπτωση τεχνικών περιορισμών κατά τη δικτυακή παροχή των ενεργειακών αυτών μορφών, όπως οι περιορισμοί σχετικά με τη διακύμανση της παροχής μέσω αγωγών, το μοντέλο κατανομής μονάδων ηλεκτροπαραγωγής υποχρεώνεται να προσδιορίζει χρονικά τη χρήση των δικτυακών μορφών ώστε σε κάποιο βαθμό η χρήση τους στην ηλεκτροπαραγωγή να συγχρονίζεται με τις διακυμάνσεις του ηλεκτρικού φορτίου. Ο συγχρονισμός, και κατ' επέκταση ο χρονικός προσδιορισμός της χρήσης των δικτυακών μορφών, γίνεται κατά ώρα ή κατά ημέρα ανάλογα με τη συχνότητα εξισορρόπησης προσφοράς και ζήτησης των δικτυακών μορφών. Στην περίπτωση κατά την οποία οι τεχνικοί περιορισμοί της δικτυακής παροχής είναι σχετικά ελαστικοί, λόγω επάρκειας υποδομών αποθήκευσης και εξισορρόπησης, το μοντέλο ηλεκτροπαραγωγής μπορεί να αποφύγει το χρονικό προσδιορισμό της δικτυακής παροχής, πράγμα που διευκολύνει την αριθμητική επίλυση του μοντέλου. Το ίδιο συμβαίνει όταν οι τιμές των δικτυακών μορφών δεν έχουν σημαντική επιβάρυνση ανάλογα με τη χρονική διακύμανση της χρήσης τους. Σε μοντέλα μεσο-μακροχρόνιου ορίζοντα για ηλεκτρικές αγορές, συνήθως δεν λαμβάνεται υπόψη η χρονική διάσταση της παροχής δικτυακών μορφών, είτε για λόγους απλούστευσης είτε επειδή σε μακροχρόνια προοπτική είναι εύλογο να αναμένονται επενδύσεις που μετριάζουν τους τεχνικούς περιορισμούς της δικτυακής παροχής.

γ) Μεταβλητές Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας.

Οι Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ) μεταβλητής παροχής είναι η ηλιακή και αιολική ενέργεια, η ενέργεια από τη θάλασσα ή τη γεωθερμία, καθώς και ορισμένες περιπτώσεις υδροηλεκτρικών ροής ποταμού. Σε αυτές τις περιπτώσεις ΑΠΕ δεν υπάρχει δυνατότητα ελέγχου της παραγωγής κατά τη διαχείριση της κατανομής μονάδων, πέραν της τυχόν διακοπής της απορρόφησης ενέργειας από το σύστημα. Η παραγωγή από μεταβλητές ΑΠΕ έχει στοχαστικό χαρακτήρα λόγω της αβεβαιότητας σχετικά με τη διαθεσιμότητα της πρωτογενούς ενέργειας. Επειδή, τουλάχιστον σήμερα, είναι τεχνικά περιορισμένη ή εξαιρετικά δαπανηρή η αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται από μεταβλητές ΑΠΕ, επιβάλλεται ο χρονικός προσδιορισμός της διαθεσιμότητας της αντίστοιχης πρωτογενούς ενέργειας, για παράδειγμα κατά ώρα ή και σε μικρότερη συχνότητα ανάλογα με το μοντέλο. Ο χρονικός προσδιορισμός

εφαρμόζεται ανεξάρτητα αν το μοντέλο αναπαριστά στοχαστικά ή αιτιοκρατικά τη διαθεσιμότητα της πρωτογενούς ενέργειας των μεταβλητών ΑΠΕ.

Είναι προφανές, ότι ο συγχρονισμός της ηλεκτροπαραγωγής με τη χρονική διακύμανση του ηλεκτρικού φορτίου και ταυτόχρονα με τη χρονική παροχή δικτυακών μορφών, τη χρονική διακύμανση της ζήτησης ατμού ή θερμότητας και της διαθεσιμότητας μεταβλητών ΑΠΕ, οδηγεί σε ιδιαίτερα πολύπλοκο μοντέλο και επιβαρύνει το χρόνο αριθμητικής επίλυσης. Για μοντέλα μεσο-μακροχρόνιου ορίζοντα, συνήθως επιλέγεται ο συγχρονισμός του ηλεκτρικού φορτίου με την παραγωγή μεταβλητών ΑΠΕ και σε πιο πολύπλοκα μοντέλα επίσης ο συγχρονισμός με τη ζήτηση ατμού και θερμότητας. Ο συγχρονισμός με την παροχή δικτυακών μορφών συναντάται κυρίως σε μοντέλα βραχυχρόνιου ορίζοντα.

Σύμφωνα με όσα αναφέρθηκαν, στο υπόδειγμα προστίθενται οι περιορισμοί **(4-1)**, ο οποίος εξασφαλίζει την κάλυψη της ζήτησης και οι περιορισμοί **(4-2)** και **(4-3)**, οι οποίοι εξασφαλίζουν την επέκταση του ηλεκτρικού συστήματος μέσω επενδύσεων σε σταθμούς, ανακαινίσεων σταθμών αλλά και την αποξήλωσή τους όταν η λειτουργία τους δεν είναι πλέον συμφέρουσα.

$$\sum_n \sum_{\tau \leq t} G_{i,n,\tau,s,t} + PX_{i,s,t} - [D_{i,s,t} + PI_{i,s,t}] \geq 0 \quad \forall i, s, t \quad (4-1)$$

$$K_{i,n,\tau,t} = cpo_{i,n,\tau,t} + I_{i,n,\tau} + EI_{i,n,\tau} - \sum_{tt \leq t} DC_{i,n,\tau,tt} \quad \forall i, n, \tau \leq t, t \quad (4-2)$$

$$EI_{i,n,t} \leq \sum_{\tau \leq t} DC_{i,n,\tau,t} \quad \forall i, n, t \quad (4-3)$$

Επιπλέον, προστίθεται ο περιορισμός **(4-4)** ο οποίος αναφέρεται μόνο στις διακοπτόμενες μονάδες που χρησιμοποιούν ανανεώσιμες πηγές.

$$ra_{i,n,\tau,s,t} \cdot K_{i,n,\tau,t} - G_{i,n,\tau,s,t} \geq 0 \quad \forall i, n \in vrs_n, \tau \leq t, s, t \quad (4-4)$$

#### 4.3.2 Χειρισμός των χρονικών περιόδων στην επίλυση του μοντέλου

Θεωρώντας ότι η ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας είναι δεδομένη και οι δυναμικότητες των μονάδων ηλεκτροπαραγωγής είναι επίσης δεδομένες, το πρόβλημα μεταφοράς αναφέρεται χωριστά σε κάθε ώρα ενός έτους ή χωριστά σε κάθε ώρα κάθε τυπικής ημέρας. Στην περίπτωση αυτή το μοντέλο επιλύεται χωριστά για κάθε ώρα, οπότε ο συνολικός χρόνος επίλυσης είναι μικρός. Αντίθετα, η επίλυση όλων των ωρών ενός έτους ταυτόχρονα απαιτεί μεγάλο χρόνο

επίλυσης, γιατί στο πλαίσιο όλων των γνωστών αλγορίθμων επίλυσης, ο χρόνος αυτός είναι μη γραμμική συνάρτηση του μεγέθους του μοντέλου.

Χρειάζεται ταυτόχρονη επίλυση για όλες τις ώρες ενός έτους μόνο εφόσον εισαχθούν περιορισμοί που αφορούν σε περισσότερες από μία ώρα. Παραδείγματα είναι οι περιορισμοί σε ποσότητες καυσίμων (π.χ. ετήσιο συμβόλαιο φυσικού αερίου, δυναμικότητα ορυχείων λιγνίτη, υδάτινοι πόροι σε φράγματα, κλπ.), καθώς και οι περιορισμοί που αφορούν στην κυκλική λειτουργία των μονάδων ηλεκτροπαραγωγής. Η πρώτη κατηγορία περιορισμών χρειάζεται επίλυση του μοντέλου ταυτόχρονα για όλες τις ώρες του έτους, ή κατά εποχή, ενώ η δεύτερη κατηγορία περιορισμών χρειάζεται ταυτόχρονη επίλυση για τις ώρες μίας ημέρας ή σειράς ημερών, όπως για παράδειγμα μίας εβδομάδας. Στην περίπτωση που αγνοηθούν οι ετήσιοι περιορισμοί ενεργειακών πόρων ή αν η κατανομή των πόρων κατά ώρα ή ημέρα προσδιορισθεί με κάποια προσεγγιστική μέθοδο πριν την επίλυση του μοντέλου, τότε η επίλυση του μοντέλου μπορεί να γίνεται ταυτόχρονα για όλες τις ώρες μίας ημέρας (ή μίας εβδομάδας) και η επίλυση εφαρμόζεται διαδοχικά για τις ημέρες ή εβδομάδες ενός έτους. Σε αυτή την περίπτωση, αναπαρίστανται ικανοποιητικά οι περιορισμοί σχετικά με την κυκλική λειτουργία των μονάδων ηλεκτροπαραγωγής, ενώ ο συνολικός χρόνος επίλυσης παραμένει σε λογικό πλαίσιο.

#### 4.3.3 Περιορισμοί δυναμικότητας μονάδων ηλεκτροπαραγωγής

Η παραγωγή κάθε μονάδας αναφέρεται σε καθαρή ισχύ αποδιδόμενη στο δίκτυο. Η ακαθάριστη παραγωγή ισχύος περιορίζεται από την δυναμικότητα κάθε μονάδας και περιλαμβάνει την ιδιοκατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας της μονάδας. Η μέγιστη αποδιδόμενη ισχύς μπορεί να μειώνεται με την ηλικία της μονάδας και η μείωση αυτή αναπαρίσταται στο μοντέλο μέσω εξωγενούς συνάρτησης ως προς το χρόνο ζωής και την τεχνολογία της μονάδας.

Μία μονάδα μπορεί να μην είναι διαθέσιμη λόγω προγραμματισμένης διακοπής λειτουργίας (planned outage), συνήθως για λόγους συντήρησης, ή λόγω απρόβλεπτης βλάβης (forced outage).

Οι προγραμματισμένες διακοπές υπόκεινται σε έγκριση από τη διαχείριση του συστήματος με κριτήριο την επάρκεια ισχύος. Επομένως, οι συντηρήσεις προγραμματίζονται σε εποχές χαμηλού φορτίου ζήτησης. Με την έννοια αυτή, ο προγραμματισμός συντηρήσεων αποτελεί μέρος των αποφάσεων που θεωρητικά πρέπει το μοντέλο να καλύψει ενδογενώς. Πράγματι έτσι γίνεται σε μοντέλα τεχνικού περιεχομένου με βραχυχρόνιο ορίζοντα μελέτης. Σε μοντέλα μεσο-μακροχρόνιου ορίζοντα, οι συντηρήσεις τοποθετούνται χρονικά με εξωγενή τρόπο και ο λεπτομερής προσδιορισμός τους εξαρτάται από τη λεπτομέρεια της ωριαίας αναπαράστασης του φορτίου. Επομένως στο μοντέλο περιλαμβάνεται εξωγενής παράμετρος που προσδιορίζεται

για κάθε μονάδα χρονικά εντός κάθε έτους, η οποία παριστάνει τη διαθεσιμότητα της μονάδας ανάλογα με εξωγενώς προσδιορισμένες διακοπές λειτουργίας για λόγους συντήρησης. Η παράμετρος αυτή λαμβάνει τιμές μεταξύ 0 και 1 για τις κατανεμόμενες μονάδες.

Η διακοπή λειτουργίας λόγω απρόβλεπτης βλάβης είναι στοχαστικό μέγεθος. Σε μοντέλα τεχνικού περιεχομένου και βραχυχρόνιου ορίζοντα, γίνεται υπόθεση σχετικά με τη μορφή της κατανομής πυκνότητας πιθανότητας της τυχαίας μεταβλητής που παριστάνει τις απρόβλεπτες βλάβες. Συνήθως γίνεται η υπόθεση ότι η κατανομή είναι ομοιόμορφη ελλείψει σχετικών παρατηρήσεων-δεδομένων για την υπόθεση άλλης κατανομής αφού θεωρεί όλα τα πιθανά ενδεχόμενα βλαβών ισοπίθανα. Γίνεται επίσης η υπόθεση ότι οι πιθανότητες βλαβών ορίζονται κατά μονάδα, αυξάνεται η αναμενόμενη συχνότητα βλαβών με την ηλικία της μονάδας, και οι πιθανότητες βλάβης των μονάδων είναι ανεξάρτητες τυχαίες μεταβλητές. Η ανεξαρτησία αυτή επιτρέπει την εφαρμογή απλών μαθηματικών μορφών συνέλιξης για τον προσδιορισμό της από κοινού συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας για όλες τις μονάδες μαζί, με σκοπό τον υπολογισμό της πιθανότητας απώλειας φορτίου (LOLP: Loss of Load Probability) σε επίπεδο συστήματος. Ο υπολογισμός αυτός γίνεται για κάθε ώρα (ή άλλη διάρκεια ανάλογα με τον βαθμό λεπτομέρειας του μοντέλου).

Στο πλαίσιο μοντέλου μεσο-μακροχρόνιου ορίζοντα, οι τυχαίες μεταβλητές απρόβλεπτων βλαβών μπορούν θεωρητικά να εισαχθούν με τη μορφή ανεξάρτητων κατανομών πυκνότητας πιθανότητας για κάθε μονάδα. Στο πλαίσιο όμως του αιτιοκρατικού μοντέλου, το οποίο πραγματεύεται η παρούσα ενότητα, οι κατανομές πιθανοτήτων πρέπει να αντικατασταθούν με μορφή που αντιστοιχεί στο βέβαιο ισοδύναμο αποτέλεσμα.

Δεν είναι ορθό να θεωρηθεί ότι αρκεί να εφαρμοσθεί η αναμενόμενη συχνότητα απρόβλεπτων βλαβών κάθε μονάδας σε όλες τις μονάδες ταυτόχρονα. Επειδή οι τυχαίες μεταβλητές είναι ανεξάρτητες μεταξύ τους, η πιθανότητα του ενδεχομένου ταυτόχρονης απρόβλεπτης βλάβης όλων των μονάδων είναι μικρή αφού αντιστοιχεί στο γινόμενο των πιθανοτήτων κάθε μονάδας. Η πιθανότητα αυτή μειώνεται όσο αυξάνεται το πλήθος κατανεμόμενων μονάδων κατά ώρα (ή άλλη χρονική διάρκεια) λειτουργίας του συστήματος. Κατά τις περιόδους αιχμής φορτίου κατανέμεται μεγαλύτερο πλήθος κατανεμόμενων μονάδων, συγκριτικά με περιόδους χαμηλού φορτίου. Στο πλαίσιο του αιτιοκρατικού μοντέλου πρέπει επομένως να εφαρμοσθεί μικρότερη αναμενόμενη συχνότητα βλάβης σε κάθε μονάδα κατά τις περιόδους αιχμής φορτίου συγκριτικά με περιόδους χαμηλού φορτίου. Έτσι προσεγγίζεται καλύτερα το βέβαιο ισοδύναμο αποτέλεσμα, το οποίο δεν μπορεί να υπολογισθεί με αναλυτικό τρόπο. Επομένως, μία πρακτική προσέγγιση είναι η εφαρμογή στο μοντέλο μιας εξωγενούς παραμέτρου η οποία αναπαριστά την πιθανοτική μείωση της διαθεσιμότητας των σταθμών λόγω απρόβλεπτων βλαβών με τιμές από 0 μέχρι 1. Αυτή η παράμετρος όπως έχει αναφερθεί παραπάνω έχει χαμηλές τιμές τις ώρες υψηλού φορτίου και μεγαλύτερες τιμές τις ώρες χαμηλού φορτίου.

Στο υπόδειγμα προστίθεται ο περιορισμός **(4-5)** ότι η εγκατεστημένη ισχύς ενός σταθμού πρέπει να είναι μεγαλύτερη από την παραγόμενη ισχύ και την προσφορά εφεδρείας στο σύστημα από τον σταθμό.

$$K_{i,n,\tau,t} - (G_{i,n,\tau,s,t} + GR_{i,n,\tau,s,t}) \geq 0 \quad \forall i, n \in th_n, \tau \leq t, s, t \quad \mathbf{(4-5)}$$

#### 4.3.4 Περιορισμοί διαθεσιμότητας ενεργειακών πόρων

Το ηλεκτρικό σύστημα, εκτός από τις μεταβλητές ΑΠΕ που έχουν αναφερθεί παραπάνω (υποκεφάλαιο 4.3.1), χρησιμοποιεί ορυκτά καύσιμα καθώς και ενέργεια από υδροηλεκτρικούς σταθμούς με φράγματα.

Το μέγεθος του παραγόμενου ηλεκτρισμού από υδροηλεκτρικούς σταθμούς με φράγματα έχει περιορισμούς που αφορούν τόσο στον βραχυπρόθεσμο σχεδιασμό όσο και στον μέσο-/μάκρο-χρόνιο. Στον βραχυχρόνιο σχεδιασμό του ηλεκτρικού συστήματος, ο παραγόμενος ηλεκτρισμός περιορίζεται από την φυσική εισροή στην λεκάνη του υδροηλεκτρικού αλλά και την χωρητικότητα τους. Σε μεσο-/μακρο-χρόνιο ορίζοντα, οι νέες επενδύσεις που μπορούν να πραγματοποιηθούν σε τέτοιους σταθμούς είναι περιορισμένες εξαιτίας κυρίως της δυσκολίας εύρεσης ιδιωτικών κεφαλαίων και των αυστηρών περιβαλλοντικών νόμων σχετικά με τις επιπτώσεις κατασκευής φραγμάτων στα τοπικά οικοσυστήματα και στο τοπικό υπέδαφος (βλ. ρήγματα, κατολισθήσεις).

Τα ορυκτά καύσιμα διαχωρίζονται σε καύσιμα διαθέσιμα στην διεθνή αγορά όπως είναι ο άνθρακας, το φυσικό αέριο και το αργό πετρέλαιο και σε καύσιμα τοπικά παραγόμενα μη διαθέσιμα στην διεθνή αγορά όπως είναι ο λιγνίτης. Περιορισμοί στην διαθεσιμότητα τους υφίσταται τόσο στον βραχυχρόνιο όσο και στον μέσο-/μάκρο-χρόνιο σχεδιασμό. Όσον αφορά τα διεθνώς διαθέσιμα καύσιμα σε βραχυχρόνιο ορίζοντα, υπάρχει καμπύλη προσφοράς σύμφωνα με την οποία για διάφορες ποσότητες ζήτησης προσδιορίζεται αναλόγως η τιμή προσφοράς με άνω όριο προσφοράς την χωρητικότητα των σταθμών παραγωγής-εξόρυξης του καυσίμου. Σε μακροχρόνιο ορίζοντα, η διαθεσιμότητα του κάθε καυσίμου περιορίζεται από την ύπαρξη κοιτασμάτων. Όσον αφορά τα καύσιμα που είναι τοπικά παραγόμενα μη διαθέσιμα στην διεθνή αγορά όπως είναι ο λιγνίτης, σε βραχυχρόνιο ορίζοντα περιορίζονται από την χωρητικότητα παραγωγής των ορυχείων ενώ σε μακροχρόνιο ορίζοντα ο περιορισμός έγκειται στην ύπαρξη ή όχι κοιτασμάτων.

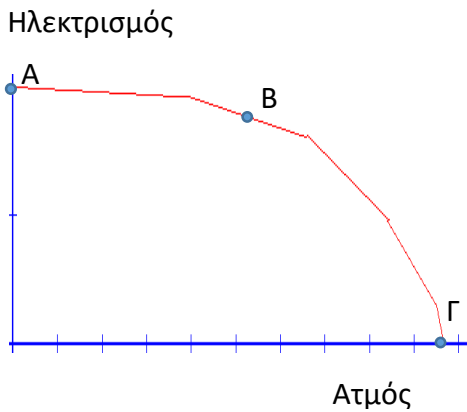
Στο υπόδειγμα προστίθενται οι ακόλουθοι περιορισμοί. Ο περιορισμός **(4-6)** ορίζει την κατανάλωση καυσίμου  $f$  την χρονιά  $t$  στην χώρα  $i$  από όλο το ηλεκτρικό σύστημα, ενώ ο **(4-7)** την μέγιστη διαθεσιμότητα του κάθε καυσίμου προς χρήση.

$$F_{i,f,t} - \sum_{\substack{(n,f) \in h_{n,f} \\ \text{and } n \neq nch}} \sum_{\tau \leq t} \sum_s hrs_s \cdot G_{i,n,\tau,s,t} \cdot hr_{i,n,\tau,t} - \sum_{n \in nch} \sum_{\tau \leq t} \sum_s hrs_s \cdot FCH_{i,n,f,\tau,s,t} \geq 0 \quad \forall i, f, t \quad (4-6)$$

$$mf_{i,f,t} - \sum_{fm} F_{i,f,t} \geq 0 \quad \forall i, f, t \quad (4-7)$$

### 4.3.5 Περιορισμοί για μονάδες συμπαραγωγής

Το υπόδειγμα όπως έχει ήδη αναφερθεί στο υποκεφάλαιο 4.3.1 περιλαμβάνει εκτός από την ζήτηση ηλεκτρισμού και την ζήτηση ατμού από τους βιομηχανικούς κλάδους και την ζήτηση διανεμόμενης θερμότητας από τα νοικοκυριά και τον τριτογενή τομέα. Για την κάλυψη αυτής χρησιμοποιούνται λέβητες αλλά και μονάδες συμπαραγωγής ηλεκτρισμού-ατμού. Οι μονάδες συμπαραγωγής υπόκεινται σε ειδικούς περιορισμούς σχετικά με την λειτουργία τους.



Γράφημα 1: Καμπύλη παραγωγής ηλεκτρισμού – ατμού ίσης κατανάλωσης καυσίμου μονάδας συμπαραγωγής

Τόσο στα μοντέλα βραχυχρόνιας λειτουργίας της ηλεκτρικής αγοράς όσο και στα μοντέλα μέσο-/μάκρο-χρόνιας βέλτιστης ανάπτυξης του ηλεκτρικού συστήματος, η μοντελοποίηση των μονάδων συμπαραγωγής ηλεκτρισμού ατμού γίνεται μακροσκοπικά. Στις μονάδες συμπαραγωγής παράγεται ηλεκτρική ενέργεια ( $CGE_{i,nch,\tau,s,t}$ ) και ατμός ( $CGS_{i,nch,\tau,s,t}$ ). Για κάθε σταθμό συμπαραγωγής έχει υποτεθεί μία συγκεκριμένη τεχνολογία απομάστευσης. Ο λόγος της παραγόμενης ισχύος ηλεκτρισμού προς την παραγόμενη ισχύ ατμού ( $helr_{i,nch,\tau}$ ) είναι σταθερός και αποτελεί χαρακτηριστικό μέγεθος κάθε σταθμού.

Οι σταθμοί συμπαραγωγής ηλεκτρισμού ατμού χαρακτηρίζονται από καμπύλες παραγωγής ηλεκτρισμού – ατμού ίσης κατανάλωσης καυσίμου (Γράφημα 1). Η παραγωγή ηλεκτρισμού – ατμού μπορεί να είναι οποιοδήποτε σημείο πάνω στην καμπύλη με την κατανάλωση καυσίμου να είναι η ίδια, για παράδειγμα τα σημεία Α και Β έχουν ίδια κατανάλωση καυσίμου. Η καμπύλη παραγωγής ηλεκτρισμού – ατμού αποτελείται από επιμέρους ευθείες με αρνητική κλίση, κάθε μία εκ των οποίων αναπαριστά διαφορετική λειτουργία της μονάδας, συνεπώς θεωρούμε το

δείκτη  $jc$  που αναφέρεται σε κάθε μία λειτουργία της μονάδας. Συγκεκριμένα για το σημείο A ισχύει ότι βρίσκεται πάνω στον κατακόρυφο άξονα της καμπύλης (άξονας ηλεκτρικής ισχύος), δηλαδή στο σημείο εκείνο ο σταθμός έχει μηδενική παραγωγή ατμού και παράγει μόνο ηλεκτρισμό. Η τιμή αυτή αποτελεί, όπως φαίνεται και στο Γράφημα 1, τη μέγιστη δυνατή παραγόμενη ισχύ ηλεκτρισμού της μονάδας ( $CGEm_{i,nch,\tau,s,t}$ ). Για το σημείο αυτό είναι γνωστός ο βαθμός απόδοσης της μονάδας συνεπώς από αυτό το σημείο δύναται να βρεθεί το συνολικό απαιτούμενο καύσιμο της συγκεκριμένης καμπύλης **(4-9)**. Επιπλέον, η μέγιστη παραγόμενη ισχύς ηλεκτρισμού της μονάδας περιορίζεται από την συνολική εγκατεστημένη ισχύ της μονάδας καθώς και το βαθμό χρησιμοποίησής της **(4-10)**. Το σημείο Γ βρίσκεται πάνω στον οριζόντιο άξονα (άξονας ισχύος ατμού), δηλαδή στο σημείο εκείνο η μονάδα παράγει μηδενική ηλεκτρική ισχύ και παράγει μόνο ατμό. Στο σημείο εκείνο η μονάδα παράγει τη μέγιστη ισχύ ατμού που μπορεί να προσδώσει και η οποία υπολογίζεται ως  $helr_{i,nch,\tau} \cdot CGEm_{i,nch,\tau,s,t}$ . Για κάθε σταθμό είναι γνωστή η παράμετρος  $slv_{i,nch,jc}$  η οποία προσδιορίζει τη μέγιστη δυνατή παραγόμενη ισχύ ατμού από κάθε λειτουργία  $jc$  ως ποσοστό της μέγιστης δυνατής παραγόμενης ισχύος ατμού του σταθμού. Επομένως, υπολογίζεται η μέγιστη δυνατή παραγόμενη ισχύ ατμού από κάθε λειτουργία  $jc$  **(4-11)**. Για το τυχαίο σημείο B, θα ισχύει ότι η παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς του βρίσκεται ως η μέγιστη του σταθμού από την οποία αφαιρείται ο όρος  $\sum_{jc} (A_{i,nch,jc} \cdot CGSj_{i,nch,\tau,s,t,jc})$  **(4-12)**. Ο όρος αυτός προσδίδει την ηλεκτρική ισχύ που στερούμαστε λόγω της αύξησης της παραγόμενης ισχύος ατμού. Επιπλέον, η παραγόμενη ισχύς ατμού στο τυχαίο σημείο B προσδιορίζεται ως το άθροισμα των επιμέρους ποσοτήτων ατμού από κάθε λειτουργία **(4-13)**.

$$G_{i,n,\tau,s,t} = CGE_{i,n,\tau,s,t} \quad \forall i, n \in nch, \tau, s, t \quad (4-8)$$

$$\sum_f FCH_{i,n,f,\tau,s,t} = hr_{i,n,\tau,t} \cdot CGE_{i,n,\tau,s,t} \quad \forall i, n \in nch, \tau, s, t \quad (4-9)$$

$$uo_{i,n,\tau,s,t} \cdot (K_{i,n,\tau,t} - DK_{i,n,\tau,t}) \geq CGE_{i,n,\tau,s,t} \quad \forall i, n \in nch, \tau, s, t \quad (4-10)$$

$$CGSj_{i,n,\tau,s,t,jc} \leq slv_{i,n,jc} \cdot helr_{i,n,\tau} \cdot CGEm_{i,n,\tau,s,t} \quad \forall i, n \in nch, \tau, s, t, jc \quad (4-11)$$



$$CGEm_{i,n,\tau,s,t} = CGE_{i,n,\tau,s,t} + \sum_{jc} A_{i,n,jc} \cdot CGSj_{i,n,\tau,s,t,jc} \quad \forall i,n \in nch, \tau, s, t \quad (4-12)$$

$$CGS_{i,n,\tau,s,t} = \sum_{jc} CGSj_{i,n,\tau,s,t,jc} \quad \forall i, n \in nch, \tau, s, t \quad (4-13)$$

#### 4.3.6 Περιορισμοί για μονάδες αντλησιοταμίευσης και συστήματα αποθήκευσης

Οι μονάδες αντλησιοταμίευσης και τα συστήματα αποθήκευσης υπόκεινται σε όμοιους περιορισμούς. Το χαρακτηριστικό αυτών των σταθμών είναι ότι αποθηκεύουν ενέργεια σε δυναμική ή χημική μορφή σε περιόδους κατά τις οποίες είτε η ζήτηση ηλεκτρισμού είναι χαμηλή είτε υπάρχει αφθονία ηλιακής ή/και αιολικής ενέργειας που δεν μπορεί να απορροφηθεί από το σύστημα ώστε να χρησιμοποιηθεί σε περιόδους κατά τις οποίες είτε η ζήτηση ηλεκτρισμού είναι υψηλή είτε δεν παράγουν οι μεταβλητές ΑΠΕ (π.χ. είναι βράδυ ή δεν φυσά).

Κατ' αρχήν, οι περιορισμοί αυτών των συστημάτων περιλαμβάνουν την μέγιστη ισχύ με την οποία μπορεί να γίνει η αποθήκευση της ηλεκτρικής ενέργειας. Στις αντλησιοταμιευτικές μονάδες, ο περιορισμός αυτός αναπαριστά την μέγιστη ισχύ της αντλίας που ανεβάζει νερό ενώ στα συστήματα αποθήκευσης αναπαριστά την μέγιστη ισχύ του μηχανήματος που παρασκευάζει το μέσο το οποίο αποθηκεύεται (είτε είναι υδρογόνο είτε είναι άλλο αέριο).

Το μέσο αποθήκευσης αποθηκεύεται σε κάποια δεξαμενή. Στους αντλησιοταμιευτικούς σταθμούς με τον όρο δεξαμενή εννοούμε τον ταμιευτήρα στον οποίο αποθηκεύεται το νερό, ενώ στα συστήματα χημικής αποθήκευσης με τον όρο δεξαμενή εννοούμε την δεξαμενή στην οποία αποθηκεύεται το μέσο αποθήκευσης. Αυτή η δεξαμενή έχει μέγιστη χωρητικότητα η οποία μπορεί να αυξηθεί με επενδύσεις. Άρα, η αποθηκευμένη ενέργεια έχει άνω όριο την μέγιστη χωρητικότητα της δεξαμενής. Στα μοντέλα βραχυχρόνιου ορίζοντα η χωρητικότητα δεν μπορεί να μεταβληθεί σε αντίθεση με τα μοντέλα μέσο-/μάκρο-χρόνιου σχεδιασμού στα οποία μπορεί να μεταβληθεί μέσω επενδύσεων.

Σε περιόδους κατά τις οποίες εξάγουμε ενέργεια από την δεξαμενή, πρέπει να σεβαστούμε το άνω όριο εξαγωγής ενέργειας από την δεξαμενή και μετατροπής της σε ηλεκτρισμό. Στους αντλησιοταμιευτικούς σταθμούς, κατά την κάθοδο του νερού από τον ταμιευτήρα αποθήκευσης παράγεται ηλεκτρισμός στον στρόβιλο ο οποίος κινείται από το νερό. Η μέγιστη ισχύς που μπορεί να εγχυθεί στο σύστημα από τους αντλησιοταμιευτικούς σταθμούς έχει άνω όριο την μέγιστη ισχύ του στρόβιλου στον οποίο παράγεται ηλεκτρισμός. Στα μοντέλα βραχυχρόνιας λειτουργίας του ηλεκτρικού συστήματος, η μέγιστη ισχύς των αντλησιοταμιευτικών σταθμών είναι δεδομένη χωρίς να μπορεί να αλλάξει. Αντίθετα, στα μοντέλα μέσο-/μάκρο-χρόνιου

βέλτιστου σχεδιασμού του ηλεκτρικού συστήματος η μέγιστη ισχύς αυτών των σταθμών μπορεί να μεταβληθεί μέσω των επενδύσεων.

Στα συστήματα αποθήκευσης, το μέσο αποθήκευσης χρησιμοποιείται σε σταθμούς για την παραγωγή ηλεκτρισμού. Στα μοντέλα βραχυχρόνιας λειτουργίας του ηλεκτρικού συστήματος, η μέγιστη ισχύς μετατροπής του αποθηκευμένου μέσου περιορίζεται από την εγκατεστημένη ισχύ των σταθμών στους οποίους μπορεί να χρησιμοποιηθεί. Στα μοντέλα μέσο-/μάκρο-χρόνιου βέλτιστου σχεδιασμού του ηλεκτρικού συστήματος, το άνω όριο έγκειται στην οικονομικότητα του συστήματος αποθήκευσης και μετατροπής αφού μέσω επενδύσεων μπορεί να μεταβληθεί η μέγιστη χωρητικότητά του.

Σύμφωνα με όσα αναφέρθηκαν, στο υπόδειγμα προστίθενται οι περιορισμοί **(4-14)** και **(4-15)** οι οποίοι ορίζουν τον άνω όριο άντλησης προς ή παραγωγής από τους αντλησιοταμιευτικούς σταθμούς. Ο περιορισμός **(4-16)** εξασφαλίζει ότι η παραγόμενη ενέργεια είναι ίση με την αντλούμενη, ενώ ο **(4-17)** ορίζει σαν μέγιστη αντλούμενη ενέργεια την χωρητικότητα του ταμιευτήρα που είναι συνδεδεμένος με τον αντλησιοταμιευτικό σταθμό.

$$pcio_{i,t} + \sum_{\tau \leq t} PCI_{i,\tau,t} - PI_{i,s,t} \geq 0 \quad \forall i, s, t \quad (4-14)$$

$$pcxo_{i,t} + \sum_{\tau \leq t} PCX_{i,\tau,t} - PX_{i,s,t} \geq 0 \quad \forall i, s, t \quad (4-15)$$

$$\sum_s nh_s \cdot PI_{i,s,t} - \sum_s nh_s PX_{i,s,t} \geq 0 \quad \forall i, t \quad (4-16)$$

$$pso_{i,t} + \sum_{\tau \leq t} PCS_{i,\tau,t} - \sum_s nh_s \cdot PI_{i,s,t} \geq 0 \quad \forall i, t \quad (4-17)$$

#### 4.3.7 Περιορισμοί κυκλικής λειτουργίας ηλεκτροπαραγωγικών μονάδων

Η λειτουργία των ηλεκτροπαραγωγικών μονάδων υπόκειται σε συγκεκριμένους περιορισμούς που αφορούν τεχνικά όρια. Ένας σταθμός έχει ελάχιστο όριο στην παραγωγή του ως ποσοστό της εγκατεστημένης ισχύος του ( $mn g_{i,n,\tau,t}$ ). Αυτό σημαίνει ότι η παραγωγή του σταθμού ή θα είναι μεγαλύτερη από ένα ελάχιστο ποσοστό ως προς την εγκατεστημένη του ισχύ ή θα είναι μηδέν για λόγους ευσταθούς λειτουργίας του σταθμού, **(4-18)** και **(4-19)**.

Ένας άλλος σημαντικός παράγοντας για την λειτουργία των σταθμών είναι η εκκίνησή τους. Ο ρυθμός και ο χρόνος εκκίνησης εξαρτάται σημαντικά από την κατάσταση της εκκίνησης – θερμή ή ψυχρή – ανάλογα με τον χρόνο κράτησης της μονάδας που έχει προηγηθεί. Οι πυρηνικοί, ανθρακικοί και λιγνιτικοί σταθμοί έχουν μεγάλους χρόνους έναυσης με αποτέλεσμα να μην

είναι δυνατό το κλείσιμό τους σε ώρες χαμηλού φορτίου αν είναι απαραίτητοι σε ώρες υψηλού φορτίου μέσα σε μια ημέρα. Για αυτούς η παράμετρος  $mng_{i,n,\tau,t}$  έχει μεγάλες τιμές. Αντίθετα οι σταθμοί φυσικού αερίου συνδυασμένου κύκλου με μικρό χρόνο έναυσης έχουν σχετικά μικρές τιμές στην εν λόγω παράμετρο. Τέλος, για τους αεριοστροβιλικούς σταθμούς που έχουν τον πιο μικρό χρόνο έναυσης από όλους η συγκεκριμένη παράμετρος είναι μηδέν.

Επίσης, κατά την λειτουργία των μονάδων υπάρχει άνω όριο ανάληψης φορτίου καθώς και άνω όριο μείωσης φορτίου. Αυτά τα όρια εξαρτώνται κυρίως από την θερμική τάση που αναπτύσσεται στα μέταλλα του λέβητα καθώς και την διαφορική διαστολή του στροφείου και του κελύφους του στροβίλου. Οι περιορισμοί **(4-20)** και **(4-21)** περιορίζουν τον ρυθμό ανάληψης φορτίου από τους σταθμούς ή τον ρυθμό μείωσης της παραγωγής σύμφωνα με τεχνικά όρια.

$$uo_{i,n,\tau,s,t} \cdot (K_{i,n,\tau,t} - DK_{i,n,\tau,t}) \geq G_{i,n,\tau,s,t} \quad \forall i, n \in th_n, \tau \leq t, s, t \quad (4-18)$$

$$G_{i,n,\tau,s,t} \geq mng_{i,n,\tau,t} \cdot (K_{i,n,\tau,t} - DK_{i,n,\tau,t}) \quad \forall i, n \in th_n, \tau \leq t, s, t \quad (4-19)$$

$$rmpu_{i,n,\tau,s,t} \cdot (K_{i,n,\tau,t} - DK_{i,n,\tau,t}) \geq G_{i,n,\tau,s,t} - G_{i,n,\tau,s-1,t} \quad \forall i, n \in th_n, \tau \leq t, s, t \quad (4-20)$$

$$rmpd_{i,n,\tau,s,t} \cdot (K_{i,n,\tau,t} - DK_{i,n,\tau,t}) \geq G_{i,n,\tau,s-1,t} - G_{i,n,\tau,s,t} \quad \forall i, n \in th_n, \tau \leq t, s, t \quad (4-21)$$

#### 4.3.8 Περιορισμοί λειτουργίας συστήματος

Για την ευσταθή λειτουργία του ηλεκτρικού συστήματος, ο ρυθμιστής προσδιορίζει απατήσεις σε επικουρικές υπηρεσίες για την ρύθμιση της συχνότητας και της ενεργού ισχύος. Όσον αφορά την βραχυχρόνια λειτουργία του συστήματος ο ρυθμιστής προσδιορίζει τις απαιτήσεις σε πρωτεύουσα, δευτερεύουσα και τριτεύουσα εφεδρεία. Προσδιορίζει τις απαιτήσεις πρωτεύουσας εφεδρείας ώστε να διασφαλιστεί ότι η συχνότητα θα διατηρείται εντός των καθορισμένων ορίων. Προσδιορίζει τις απαιτήσεις δευτερεύουσας εφεδρείας ώστε να διασφαλιστεί επαρκής έλεγχος και ρύθμιση ισχύος ώστε να διατηρούνται σε χαμηλά επίπεδα οι αποκλίσεις της συχνότητας καθώς και του προγράμματος των καθαρών ανταλλαγών ισχύος του συστήματος. Ακόμα, προσδιορίζει τις απαιτήσεις τριτεύουσας εφεδρείας για να διασφαλίζει επαρκή έλεγχο ισχύος και ικανή εφεδρεία έναντι διαταραχών ώστε να ανταποκρίνεται σε διαταραχές και να αποκαθιστά το εύρος ρύθμισης εντός των καθορισμένων χρονικών ορίων απόκρισης σε διαταραχές. Η απαιτούμενη τριτεύουσα εφεδρεία αποτελείται από στρεφόμενη και μη στρεφόμενη εφεδρεία. Η στρεφόμενη εφεδρεία παρέχεται από μονάδες παραγωγής που λειτουργούν (είναι συγχρονισμένες) και διαθέτουν μη φορτισμένη ικανότητα ισχύος ενώ η μη στρεφόμενη εφεδρεία παρέχεται από μονάδες παραγωγής που είναι εκτός λειτουργίας αλλά μπορούν να συγχρονιστούν στο σύστημα εντός των καθορισμένων χρονικών ορίων απόκρισης σε διαταραχές.

Στα μοντέλα μέσο-/μάκρο-χρόνιας βέλτιστης ανάπτυξης του ηλεκτρικού συστήματος, όπως έχει ήδη αναφερθεί ο σκοπός δεν είναι η αναλυτική περιγραφή της λειτουργίας του συστήματος εξαιτίας περιορισμών στον απαιτούμενο υπολογιστικό χρόνο αλλά αναπαράσταση λειτουργίας για τον υπολογισμό των αναμενόμενων οικονομικών αποτελεσμάτων της επένδυσης. Αυτό συνεπάγεται ότι οι απαιτήσεις εφεδρείας στο σύστημα αναπαριστάνονται με μικρότερη λεπτομέρεια και αφορούν κυρίως την επάρκεια ισχύος. Ο ρυθμιστής προσδιορίζει τις απαιτήσεις για την επάρκεια ισχύος ώστε το σύστημα να μπορεί να ανταποκριθεί σε διαταραχές. Έτσι, οι περιορισμοί εφεδρείας συντομεύονται σε έναν περιορισμό κατά τον οποίο η εγκατεστημένη ισχύς των μονάδων είναι μεγαλύτερη της μέγιστης ζήτησης ισχύος κατά ένα προκαθορισμένο ποσοστό ανά έτος. Πρέπει να αναφερθεί σε αυτό το σημείο ότι η εγκατεστημένη ισχύς των μεταβλητών ΑΠΕ δεν συμμετέχει εξ' ολοκλήρου σε αυτόν το περιορισμό αλλά η ισχύς τους μειώνεται σύμφωνα με εξωγενή παράμετρο που αναπαριστά το ποσοστό βέβαιης διαθεσιμότητας του σταθμού κατά την συγκεκριμένη τυπική ώρα. Η απλούστευση αυτή είναι εφικτή αφού κατά τον μέσο-/μάκρο-χρόνιο βέλτιστο σχεδιασμό του ηλεκτρικού συστήματος δεν προσομοιώνουμε επακριβώς την λειτουργία του συστήματος αλλά μόνο ως δυνατότητα υπολογισμού των αναμενόμενων οικονομικών αποτελεσμάτων της επένδυσης.

Συνεπώς, στο υπόδειγμα προστίθεται ο περιορισμός **(4-22)** ο οποίος προσομοιώνει τις επικουρικές υπηρεσίες που παρέχουν οι σταθμοί δηλαδή την ύπαρξη ελάχιστης στρεφόμενης εφεδρείας, και ο **(4-23)** ο οποίος εξασφαλίζει την ύπαρξη μακροχρόνιας εφεδρείας για την κάλυψη της ζήτησης.

$$\sum_{n \in \mathcal{H}_n} \sum_{\tau \leq t} GR_{i,n,\tau,s,t} - rls_{i,t} \cdot D_{i,s,t} \geq 0 \quad \forall i, s, t \quad (4-22)$$

$$\sum_n \sum_{\tau \leq t} ccrlm_{i,n,\tau,t} \cdot K_{i,n,\tau,t} - (1 + rll_{i,t}) \cdot D_{i,s,t} \geq 0 \quad \forall i, s, t \quad (4-23)$$

#### 4.3.9 Γενικοί περιορισμοί

Κατά την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας εκλύονται μεγάλες ποσότητες διοξειδίου του άνθρακα ( $CO_2$ ) στην ατμόσφαιρα μέσω της καύσης ορυκτών καυσίμων, όπως λιγνίτη, πετρελαίου και φυσικού αερίου. Στο πλαίσιο των πολιτικών ελάττωσης των εκπομπών  $CO_2$  και κατ' επέκταση στο μετριασμό του φαινομένου του θερμοκηπίου, έχει αποδοθεί αρνητική αξία, κόστος, στις εκπομπές  $CO_2$ . Ειδικότερα για την Ευρώπη, οι παραγωγοί ηλεκτρικής ενέργειας υπόκεινται πλέον σε ένα σύστημα εμπορίας των δικαιωμάτων εκπομπών  $CO_2$  (Emission Trading

Scheme – ETS). Ο περιορισμός **(4-24)** ορίζει τους τόνους  $CO_2$  οι οποίοι εκπέμπονται στην ατμόσφαιρα. Επιπλέον, έχει αναπτυχθεί μια νέα διαδικασία (Carbon Capture and Storage – CCS) κατά την οποία κατακρατούνται οι παραγόμενοι τόνοι  $CO_2$  και στη συνέχεια αυτοί μεταφέρονται και αποθηκεύονται σε ειδικά διαμορφωμένες υπόγειες εγκαταστάσεις (δεξαμενές) ή φυσικούς γεωλογικούς σχηματισμούς. Οι τόνοι οι οποίοι κατακρατούνται με στόχο την αποθήκευσή τους υπολογίζονται στην **(4-25)**.

Επιπρόσθετα, η επιχείρηση παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας για να αντισταθμίσει την αβεβαιότητα όσον αφορά το μέγεθος του κόστους και να μειώσει τον κίνδυνο ζημίας, τείνει να αυξήσει τις τιμές προσφοράς της ενέργειας. Η επιχείρηση που λειτουργεί στην αγορά πρέπει να ικανοποιεί τον περιορισμό **(4-26)** ότι τα κέρδη της είναι μικρότερα από ένα ανώτατο όριο το οποίο έχει θέσει ο ρυθμιστής της αγοράς. Το όριο αυτό ορίζεται ως άνω όριο των κερδών της επιχείρησης ως ποσοστό του συνολικού κόστους.

$$EM_{i,t} \geq \sum_{(n,f) \in h_{n,f}} \sum_{\tau \leq t} \sum_s emf_{i,f,t} \cdot hrs_s \cdot G_{i,n,\tau,s,t} \cdot hr_{i,n,\tau,t} \quad \forall i, t \quad (4-24)$$

$$ES_{i,t} \geq \sum_{(n,f) \in h_{n,f}} \sum_{\tau \leq t} \sum_s esf_{i,f,t} \cdot hrs_s \cdot G_{i,n,\tau,s,t} \cdot hr_{i,n,\tau,t} \quad \forall i, t \quad (4-25)$$

$$(a_{i,s,t} - \beta_{i,s,t} \cdot d_{i,s,t}) \cdot D_{i,s,t} \leq (1 + mur_t) \cdot \left[ \begin{aligned} & (\sum_f fp_{i,f,t}(F_{i,f,t}) \cdot F_{i,f,t}) \\ & + (\sum_n \sum_{\tau \leq t} \sum_s vc_{i,n,\tau,t}(G_{i,n,\tau,s,t}) \cdot G_{i,n,\tau,s,t}) \\ & + \sum_n \sum_{\tau \leq t} fc_{i,n,\tau,t}(K_{i,n,\tau,t}) \cdot K_{i,n,\tau,t} \\ & + \sum_n (\sum_{\tau \leq t} ni_{i,n,\tau,t}(\rho_{i,n,\tau}) \cdot icp_{i,n,\tau}(\sum_{\tau \tau \leq \tau} I_{i,n,\tau,\tau,\tau}) \cdot I_{i,n,\tau}) \\ & + \sum_n (\sum_{\tau \leq t} ne_{i,n,\tau,t}(\rho_{i,n,\tau}) \cdot ice_{i,n,\tau}(\sum_{\tau \tau \leq \tau} EI_{i,n,\tau,\tau}) \cdot EI_{i,n,\tau}) \\ & + ce_{i,t}(\sum_{\tau \leq t} ES_{i,\tau}) \cdot ES_{i,t} \\ & + ETS p_t \cdot EM_{i,t} \\ & + \sum_{\tau \leq t} npx_{i,\tau,t}(\rho_{i,\tau}) \cdot PCX_{i,\tau,t} \end{aligned} \right] \quad \forall i, s, t \quad (4-26)$$

#### 4.3.10 Υπόδειγμα Ηλεκτρικού Δικτύου

Στο παρόν κεφάλαιο θα αναλύσουμε τη μοντελοποίηση του ηλεκτρικού δικτύου μεταξύ των διαφόρων χωρών. Στο σημείο αυτό υπενθυμίζουμε ότι στο υπόδειγμα το εσωτερικό δίκτυο μιας χώρας είναι συνοπτικά μοντελοποιημένο ώστε να υπολογίζονται οι απώλειες δικτύου, ενώ το

δίκτυο που συνδέει τα ηλεκτρικά συστήματα των διαφόρων χωρών έχει αναπτυχθεί με λεπτομέρεια. Αρχικά ξεκινάμε με την αναλυτική περιγραφή του δικτύου για να καταλήξουμε στην γραμμική περιγραφή κατά DC

Η ανάλυση ροής ισχύος εναλλασσόμενου ρεύματος περιλαμβάνει τρεις τύπους ζυγών (Wood & Wollenberg, 1984)

1. Ζυγοί PQ που είναι οι ζυγοί φορτίων
2. Ζυγοί PV που είναι οι ζυγοί παραγωγής εκτός από έναν όπου για οποιαδήποτε τιμή αέργου ισχύος η τάση είναι σταθερή
3. Ζυγός V-θ (Swing bus) που είναι ζυγός παραγωγής ο οποίος μεταβάλλει την παραγόμενη ενέργεια ώστε να διατηρείται η τάση και η συχνότητα λειτουργίας του ηλεκτρικού συστήματος σε προδιαγεγραμμένα όρια.

Ένα σύστημα μεταφοράς και διανομής ηλεκτρικής ενέργειας περιλαμβάνει μεταξύ των ζυγών σύνθετες αντιστάσεις και φορτία. Ο νόμος ρευμάτων του Kirchhoff σε μητρική μορφή για ένα τέτοιο σύστημα γράφεται

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & \cdot & \cdot & \cdot & Y_{1n} \\ Y_{21} & Y_{22} & \cdot & \cdot & \cdot & Y_{2n} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ Y_{n1} & Y_{n2} & \cdot & \cdot & \cdot & Y_{nn} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ \vdots \\ E_n \end{bmatrix} \quad (4-27)$$

όπου  $i$  το σύνολο των ζυγών

$I_i$  το διάνυσμα ρεύματος σε κάθε ζυγό  $n$  σε μιγαδική μορφή

$E_i$  το διάνυσμα τάσης σε κάθε ζυγό  $n$  σε μιγαδική μορφή

Ο πίνακας αγωγιμοτήτων (πίνακας  $Y$ ) έχει γραμμές και στήλες τους ζυγούς του δικτύου και κατασκευάζεται ως εξής. Τα μη διαγώνια στοιχεία είναι η αρνητική αγωγιμότητα μεταξύ των ζυγών που συνδέουν, ενώ τα διαγώνια στοιχεία είναι το άθροισμα των αγωγιμοτήτων όλων των γραμμών που συνδέονται στον συγκεκριμένο ζυγό.

Ο υπολογισμός της καθαρής έγχυσης ισχύος σε κάθε ζυγό υπολογίζεται ως

$$\frac{P_i - jQ_i}{E_i} = \sum_{j=1, j \neq n}^N [Y_{ij}E_j] + Y_{ii}E_i \quad (4-28)$$

Για την επίλυση της **(4-28)** υπάρχουν αρκετές μέθοδοι. Από τις πρώτες που χρησιμοποιήθηκαν ήταν η μέθοδος Gauss – Seidel. Αυτή, όμως, χρειάζεται αρκετό χρόνο επίλυσης εξαιτίας του αργού ρυθμού με τον οποίο συγκλίνει. Επιπλέον ο κάθε ζυγός αντιμετωπίζεται ανεξάρτητα χωρίς να λαμβάνεται πρόνοια για την μεταβολή στην ροή ενεργού και αέργου ισχύος των ζυγών με τους οποίους συνδέεται. Αντίθετα, μια άλλη μέθοδος, η λεγόμενη Newton – Raphson, επειδή βασίζεται στον υπολογισμό των μεταβολών από την μια επανάληψη στην επόμενη, λαμβάνει υπόψη όλες τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ των ζυγών.

#### 4.3.10.1 Μέθοδος Newton – Raphson

Η πιο διαδεδομένη μέθοδος επίλυσης της **(4-28)** είναι η μέθοδος Newton – Raphson.

Για κάθε ζυγό ισχύει

$$P_i + jQ_i = E_i \cdot I_i^* \quad (4-29)$$

όπου  $I_i = \sum_{k=1}^N Y_{ik} E_k$

Άρα προκύπτει

$$P_i + jQ_i = E_i \cdot \left( \sum_{k=1}^N Y_{ik} E_k \right)^* = |E_i|^2 Y_{ii}^* + \sum_{k=1, k \neq i}^N Y_{ik}^* \cdot E_i \cdot E_k^* \quad (4-30)$$

Σε αυτή την μέθοδο το διάνυσμα των τάσεων των ζυγών εκφράζεται σε πολικές συντεταγμένες και σε κάθε επανάληψη της μεθόδου το μέτρο και η φάση των τάσεων των ζυγών μεταβάλλονται σαν να ήταν ανεξάρτητες μεταβλητές. Για κάθε ζυγό υπολογίζουμε την μεταβολή στην ενεργό και άεργο ισχύ σε κάθε διαδοχική επανάληψη από τις εξής εξισώσεις

$$\Delta P_i = \sum_{k=1}^N \frac{\partial P_i}{\partial \theta_k} \cdot \Delta \theta_k + \sum_{k=1}^N \frac{\partial P_i}{\partial |E_k|} \cdot \Delta |E_k| \quad (4-31)$$

$$\Delta Q_i = \sum_{k=1}^N \frac{\partial Q_i}{\partial \theta_k} \cdot \Delta \theta_k + \sum_{k=1}^N \frac{\partial Q_i}{\partial |E_k|} \cdot \Delta |E_k| \quad (4-32)$$

ή σε μητρική μορφή

$$\begin{bmatrix} \Delta P_1 \\ \Delta Q_1 \\ \Delta P_2 \\ \Delta Q_2 \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} \frac{\partial P_1}{\partial \theta_1} & \frac{\partial P_1}{\partial |E_1|} & \cdot & \cdot & \cdot \\ \frac{\partial Q_1}{\partial \theta_1} & \frac{\partial Q_1}{\partial |E_1|} & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \end{bmatrix}}_{\text{Jacobian matrix}} \cdot \begin{bmatrix} \Delta \theta_1 \\ \Delta |E_1| \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \end{bmatrix} \quad (4-33)$$

Θα επανέλθουμε στην (4-30) με σκοπό να την αναπτύξουμε και να υπολογίσουμε τις παραγώγους.

$$\begin{aligned} P_i + j \cdot Q_i &= \sum_{k=1}^N |E_i| \cdot |E_k| \cdot (G_{ik} - j \cdot B_{ik}) \cdot e^{j \cdot (\theta_i - \theta_k)} \\ &= \sum_{k=1}^N \{ |E_i| \cdot |E_k| \cdot [ G_{ik} \cdot \cos(\theta_i - \theta_k) \\ &\quad + B_{ik} \cdot \sin(\theta_i - \theta_k) ] \\ &\quad + j \cdot [ |E_i| \cdot |E_k| \cdot [ G_{ik} \cdot \sin(\theta_i - \theta_k) \\ &\quad - B_{ik} \cdot \cos(\theta_i - \theta_k) ] \\ &\quad ] \} \end{aligned} \quad (4-34)$$

όπου  $\theta_i, \theta_k$  η φάση του διανύσματος της τάσης στους ζυγούς  $i$  και  $k$  αντιστοίχως  
 $|E_i|, |E_k|$  το μέτρο του διανύσματος της τάσης στους αντίστοιχους ζυγούς και  
 $G_{ik} + j \cdot B_{ik} = Y_{ik}$  το  $ik$  στοιχείο του  $Y$  πίνακα του ηλεκτρικού συστήματος.

Γενική πρακτική για την συνέχεια της μεθόδου είναι η χρήση του  $\frac{\Delta |E_i|}{|E_i|}$  αντί του  $|E_i|$ . Έτσι οι παράγωγοι γράφονται

$$\frac{\partial P_i}{\partial \theta_k} = |E_i| \cdot |E_k| \cdot [ G_{ik} \cdot \sin(\theta_i - \theta_k) - B_{ik} \cdot \cos(\theta_i - \theta_k) ] \quad (4-35)$$

$$\frac{\partial P_i}{\left( \frac{\partial |E_k|}{|E_k|} \right)} = |E_i| \cdot |E_k| \cdot [ G_{ik} \cdot \cos(\theta_i - \theta_k) + B_{ik} \cdot \sin(\theta_i - \theta_k) ] \quad (4-36)$$



$$\frac{\partial Q_i}{\partial \theta_k} = -|E_i| \cdot |E_k| \cdot [G_{ik} \cdot \cos(\theta_i - \theta_k) + B_{ik} \cdot \sin(\theta_i - \theta_k)] \quad (4-37)$$

$$\frac{\partial Q_i}{\left(\frac{\partial |E_k|}{|E_k|}\right)} = |E_i| \cdot |E_k| \cdot [G_{ik} \cdot \sin(\theta_i - \theta_k) - B_{ik} \cdot \cos(\theta_i - \theta_k)] \quad (4-38)$$

Η (4-33) γίνεται

$$\begin{bmatrix} \Delta P_1 \\ \Delta Q_1 \\ \Delta P_2 \\ \Delta Q_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \end{bmatrix} = [J] \cdot \begin{bmatrix} \Delta \theta_1 \\ \Delta |E_1|/|E_1| \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \end{bmatrix} \quad (4-39)$$

Η μέθοδος επιλύει την (4-28) ως εξής. Ξεκινάμε με την αρχικοποίηση του μέτρου και της γωνίας του διανύσματος της τάσης σε όλους τους ζυγούς. Στην συνέχεια υπολογίζουμε τα  $\Delta P_i$  και  $\Delta Q_i$  από την (4-39). Αν οι τιμές όλων των  $\Delta P_i$  και  $\Delta Q_i$  είναι μικρότερες από ένα ορισμένο όριο τότε η μέθοδος σταματάει αφού έχει βρεθεί η ενεργός και άεργος ισχύς και είναι σε αποδεκτά όρια. Στην περίπτωση που κάποια είναι μεγαλύτερη του ορίου, επιλύουμε την (4-39) ως  $\Delta \theta_i$  και  $\frac{\Delta |E_i|}{|E_i|}$  των τάσεων των ζυγών αφού υπολογιστεί ο αντίστροφος της Ιακωβιανής  $[J]$ . Στην συνέχεια ενημερώνουμε ως εξής

$$\theta_i^s = \theta_i^{s-1} + \Delta \theta_i \quad (4-40)$$

$$|E_i|^s = |E_i|^{s-1} + \Delta |E_i| \quad (4-41)$$

και συνεχίζουμε με την επόμενη επανάληψη.

#### 4.3.10.2 Μέθοδος ταχείας αποζευγμένης ροής ισχύος (fast decoupled power flow)

Το βασικό μειονέκτημα της παραπάνω μεθόδου είναι ο υπολογισμός της Ιακωβιανής σε κάθε επανάληψη, κάτι που απαιτεί πολύ χρόνο και μεγάλη υπολογιστική ισχύ. Για να μειωθεί περαιτέρω ο χρόνος υπολογισμού της ενεργού και άεργου ισχύος στους ζυγούς, θεωρούμε περαιτέρω απλουστεύσεις που οδηγούν στη μέθοδο της ταχείας αποζευγμένης ροής ισχύος

(fast decoupled power flow) (Wood & Wollenberg, 1984). Αυτή η μέθοδος περιλαμβάνει τις παρακάτω απλουστεύσεις

1. Αμελούνται οι αλληλεπιδράσεις μεταξύ ενεργού ισχύος και του μέτρου της τάσης σε κάθε ζυγό  $k$ , με συνέπεια ο όρος  $\frac{\partial P_i}{\left(\frac{\partial |E_k|}{|E_k|}\right)}$  να θεωρείται μηδέν.
2. Αμελούνται οι αλληλεπιδράσεις μεταξύ αέργου ισχύος και φάσεως της τάσης σε κάθε ζυγό, με συνέπεια οι παράγωγοι  $\frac{\partial Q_i}{\partial \theta_k}$  να θεωρούνται μηδέν
3. Οι διαφορές των γωνιών των τάσεων στους διάφορους ζυγούς θεωρούνται πολύ μικρές ώστε  $\cos(\theta_i - \theta_j) \cong 1$  και  $\sin(\theta_i - \theta_j) \cong \theta_i - \theta_j$
4. Θεωρούνται  $B_{ik} \gg G_{ik}$  και  $B_{ii} |E_i|^2 \gg Q_i$ .

Σύμφωνα με αυτές προκύπτουν οι παρακάτω εκφράσεις

$$\frac{\partial P_i}{\partial \theta_k} = -|E_i| |E_k| B_{ik} \quad (4-42)$$

$$\frac{\partial Q_i}{\left(\frac{\partial |E_k|}{|E_k|}\right)} = -|E_i| |E_k| B_{ik} \quad (4-43)$$

οι οποίες γράφονται

$$\Delta P_i = \left(\frac{\partial P_i}{\partial \theta_k}\right) * \Delta \theta_k \quad (4-44)$$

$$\Delta Q_i = -|E_i| |E_k| B_{ik} \frac{\Delta |E_k|}{|E_k|} \quad (4-45)$$

Θεωρώντας  $|E_k| \cong 1$  και απλοποιώντας περαιτέρω τον πίνακα  $B_{ik}$  θεωρώντας ότι  $r_{ik} \ll x_{ik}$  προκύπτει ότι  $B_{ik} = -\frac{1}{x_{ik}}$  και  $B_{ii} = \sum_{k=1}^N \frac{1}{x_{ik}}$  οπότε προκύπτει

$$\frac{\Delta P_i}{|E_i|} = -B_{ik} \Delta \theta_k \quad (4-46)$$

$$\frac{\Delta Q_i}{|E_i|} = -B_{ik} \Delta |E_k| \quad (4-47)$$

Οι **(4-46)** και **(4-47)** έχουν το πλεονέκτημα ότι ο πίνακας  $B_{ik}$  αποτελείται από σταθερούς αριθμούς ελαχιστοποιώντας τον απαιτούμενο χρόνο επίλυσης.

#### 4.3.10.3 Ροή ισχύος «DC»

Περαιτέρω απλοποίηση στην ανάλυση ροής ισχύος οδηγεί στην απομάκρυνση της **(4-47)** οπότε μένει μόνο η **(4-46)** στην οποία με την θεώρηση  $|E_i| = 1.0$  α. μ. γίνεται

$$\begin{bmatrix} \Delta P_1 \\ \Delta P_2 \\ \Delta P_3 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \Delta P_i \end{bmatrix} = [B'] * \begin{bmatrix} \Delta \theta_1 \\ \Delta \theta_2 \\ \Delta \theta_3 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \Delta \theta_i \end{bmatrix} \quad (4-48)$$

Με την συγκεκριμένη μέθοδο μπορούμε να υπολογίσουμε την ροή ενεργού ισχύος στις γραμμές, όμως δεν έχουμε ενδείξεις για την ροή αέργου ισχύος.

##### 4.3.10.3.1 Υπολογισμός ροής ισχύος σε διασύνδεση

Για τον υπολογισμό της ροής σε μια διασύνδεση του συνολικού συστήματος εξαιτίας της έγχυσης σε έναν ζυγό ξεκινάμε από την αρχική εξίσωση **(4-34)**. Με εφαρμογή όλων των απλοποιήσεων στις οποίες έχουμε προβεί μέχρι αυτό το σημείο προκύπτει

$$P_i = \sum_{k=1}^N |E_i| \cdot |E_k| \cdot B_{ik} \cdot \sin(\theta_i - \theta_k) = \sum_{k=1}^N B_{ik} \cdot (\theta_i - \theta_k) \quad (4-49)$$

ή

$$P_k = ([D] * [A]) * [B']^{-1} * [P_i] \quad (4-50)$$

όπου  $k$  είναι το σύνολο των διασυνδέσεων του ηλεκτρικού δικτύου

$i$  το σύνολο των ζυγών

$[D]$  είναι πίνακας  $k \times k$  του οποίου τα μη διαγώνια στοιχεία είναι μηδενικά ενώ τα διαγώνια στοιχεία έχουν το αντίστροφο της αντίδρασης(χωρητικής ή επαγωγικής).

$[A]$  είναι ο  $k \times i$  πίνακας πρόσπτωσης

$[B'_{i,i}]^{-1}$  είναι ο αντίστροφος πίνακας αγωγιμοτήτων του δικτύου

$[P_i]$  είναι  $i \times 1$  πίνακας με την καθαρή έγχυση ισχύος σε κάθε ζυγό, θετική όταν ο ζυγός αντιπροσωπεύει φορτίο και αρνητική όταν ο ζυγός αντιπροσωπεύει γεννήτρια.

$PTDF_{k,i} = ([D_{k,k}] * [A_{k,i}]) * [B'_{i,i}]^{-1}$  είναι ο πίνακας με τους συντελεστές διανομής για την μεταφοράς ισχύος οποίος δείχνει την φόρτιση κάθε γραμμής λόγω έγχυσης στους διάφορους ζυγούς

Ο πίνακας  $(B'_{i,i})$  όμως είναι μη αντιστρέψιμος. Αυτό συμβαίνει επειδή στην **(4-48)** στην πραγματικότητα δεν είναι όλες η γωνίες ανεξάρτητες μεταξύ τους αλλά μόνο η διαφορά φάσεων μεταξύ των ζυγών. Για να το ξεπεράσουμε θεωρούμε την γωνία σε έναν ζυγό, τον ζυγό V-θ, ότι είναι συμβατικά μηδέν, υπονοώντας ότι ο συγκεκριμένος ζυγός έχει την δυνατότητα να προσαρμόζει την παραγωγή του ώστε να διατηρεί το διάνυσμα της τάσης σταθερό, με συνέπεια την αφαίρεση της γραμμής και της στήλης που αντιστοιχεί στον συγκεκριμένο ζυγό από τον πίνακα B ο οποίος μετατρέπεται σε  $(i - 1) \times (i - 1)$  πίνακα. Ο νέος πίνακας είναι αντιστρέψιμος οπότε μπορούμε να συνεχίσουμε στον υπολογισμό του  $PTDF_{k,i-1}$ . Για τον υπολογισμό της έγχυσης ισχύος στον ζυγό αναφοράς V-θ χρησιμοποιούμε τον νόμο ρευμάτων του Kirchhoff οποίος αναφέρει ότι σε ένα κλειστό κύκλωμα το άθροισμα των ρευμάτων είναι ίσο με μηδέν.

#### 4.3.10.4 Ροή ισχύος στις γραμμές συνεχούς ρεύματος

Η παραπάνω ανάλυση αφορά την προσομοίωση ροής ισχύος σε ηλεκτρικό σύστημα που περιέχει γραμμές εναλλασσόμενου ρεύματος. Με την ανάπτυξη και την συνεχή βελτίωση των ηλεκτρονικών ισχύος όπως τα Thyristor, IGBT κ.α. έχει γίνει δυνατή η μεταφορά μεγάλων ποσοτήτων ενέργειας σε μεγάλες αποστάσεις με συνεχές ρεύμα. Η επικοινωνία αυτών των γραμμών συνεχούς ρεύματος με το υπόλοιπο σύστημα γίνεται με την χρήση των ανορθωτών και αντιστροφών.

Οι γραμμές συνεχούς ρεύματος εξαιτίας των ηλεκτρονικών ισχύος με τα οποία συνοδεύονται με το υπόλοιπο σύστημα έχουν μεγάλη ευελιξία ως προς την λειτουργία τους. Έτσι, ο διαχειριστής του συστήματος μπορεί με την κατάλληλη χρήση αυτών να κατευθύνει την ροή σε συγκεκριμένες γραμμές χωρίς να επηρεαστεί το υπόλοιπο σύστημα και ανεξάρτητα από την ροή που θα έδινε η επίλυση της **(4-27)** για το σύστημα με την χρήση του πίνακα αγωγιμοτήτων.

Στην παρούσα εργασία γίνεται η υπόθεση ότι η κάθε γραμμή συνεχούς ρεύματος είναι εφοδιασμένη με τα απαραίτητα συστήματα ελέγχου ηλεκτρονικών ισχύος. Η ισχύς της στηρίζεται στους εξής λόγους. Πρώτον σήμερα αλλά και στο μεσοπρόθεσμο μέλλον δεν προβλέπεται η εκτεταμένη χρήση γραμμών συνεχούς ρεύματος που να έχουν ως αποτέλεσμα

την δημιουργία τέτοιων νησίδων όπως έχουμε περιγράψει πιο πάνω. Δεύτερον η δημιουργία αυτών των νησίδων στο μακροπρόθεσμο μέλλον αφορά την εκμετάλλευση ανανεώσιμων πηγών όπως του αιολικού δυναμικού σε απομακρυσμένες περιοχές όπως της βόρειας θάλασσας. Σε αυτήν την περίπτωση όμως όλο το δίκτυο γραμμών συνεχούς ρεύματος που θα ενώνει τις ανεμογεννήτριες θεωρείται για την προσομοίωση ως ένα σημείο ενώ για την προσομοίωση θεωρείται σημαντική μόνο η διασύνδεση τους με τα ηλεκτρικά συστήματα των χωρών με τις οποίες συνορεύουν. Οι γραμμές αυτές επειδή συνδέουν το DC σύστημα των ανεμογεννητριών με το AC σύστημα των χωρών έχουν τα απαραίτητα ηλεκτρονικά ισχύος που επιτρέπουν την ευέλικτη λειτουργία τους. Τέλος, στα συστήματα μεταφοράς μεγάλης ποσότητας ισχύος σε μακρινές αποστάσεις σε μεγάλη τάση η λεγόμενη μεταφορά HVDC προβλέπεται η χρήση ηλεκτρονικών ισχύος ώστε να υπάρχει ο κατάλληλος έλεγχος. Έτσι, συνάγεται το συμπέρασμα ότι για την προσομοίωση οι διασυνδεδετικές γραμμές συνεχούς ρεύματος έχουν την απαραίτητη ευελιξία ώστε η ροή σε αυτές να μην εξαρτάται από τον πίνακα αγωγιμοτήτων αλλά από τον πίνακα πρόσπτωσης (incidence matrix). Άρα αν με  $i$  συμβολίζουμε τους ζυγούς του ηλεκτρικού συστήματος, με  $k$  τις διασυνδεδετικές γραμμές συνεχούς ρεύματος,  $A_{i,k}$  είναι ο πίνακας πρόσπτωσης,  $Y_i$  είναι η έγχυση ενεργού ισχύος και  $FL_k$  είναι η ροή στις διασυνδεδετικές γραμμές τότε

$$Y_i = [A_{i,k}] \cdot [FL_k] \quad (4-51)$$

Η (4-51) δηλώνει ότι δεν είναι ο νόμος του Ohm που καθορίζει την ροή σε μια διασυνδεδετική γραμμή αλλά η διαθεσιμότητα των γραμμών.

#### 4.3.10.5 Περιορισμοί του δικτύου

Συνοψίζοντας, η προσομοίωση του ηλεκτρικού δικτύου στο υπόδειγμα θα γίνει σύμφωνα με όσα αναλύθηκαν προηγουμένως. Αρχικά, ομαδοποιούμε τις Ευρωπαϊκές χώρες σε περιοχές, και συγκεκριμένα στις Σκανδιναβικές χώρες, στις Βρετανικές Νήσους, στις χώρες της Ιβηρικής χερσονήσου, στις Βαλκανικές χώρες και στις χώρες της κεντρικής Ευρώπης.

Το δίκτυο περιλαμβάνει διασυνδέσεις AC και DC. Στις AC διασυνδέσεις περιλαμβάνονται οι AC διασυνδέσεις των χωρών εντός της ίδιας περιοχής. Στις DC διασυνδέσεις περιλαμβάνονται οι DC διασυνδέσεις των χωρών εντός της ίδιας περιοχής καθώς και οι διασυνδέσεις μεταξύ των περιοχών.

Η έγχυση ισχύος μεταξύ των χωρών περιορίζεται από τεχνικής άποψης από τη χωρητικότητα των γραμμών διασύνδεσης. Περιορίζεται όμως περαιτέρω από οδηγίες του διαχειριστή. Αρχικά, δίνονται οδηγίες για την αξιοπιστία των συνδέσεων μεταξύ των χωρών. Αυτές περιορίζουν την δυνατότητα εισαγωγών μιας χώρας, με στόχο τον περιορισμό της ενεργειακής της εξάρτησης και συνεπώς σε περιπτώσεις διακοπής της τροφοδοσίας καταστεί αδύνατη η κάλυψη της ζήτησης.

Επιπλέον, δίνονται οδηγίες με σκοπό τη N-1 προστασία του δικτύου. Αναλυτικότερα, ο διαχειριστής υπολογίζει κατάλληλα τις μέγιστες επιτρεπόμενες εγχύσεις ισχύος σε κάθε διασύνδεση με τρόπο τέτοιο ώστε στην περίπτωση βλάβης μιας γραμμής, οι εναπομένουσες διασυνδέσεις να είναι σε θέση να μεταφέρουν την επιπλέον ενέργεια.

Για τους μετέπειτα υπολογισμούς χρειάζεται να υπολογιστούν οι μήτρες  $B'_{rg,i,ii,t}$  **(4-52)** και  $H_{rg,k,i,t}$  **(4-53)** όπως αναλύθηκαν προηγουμένως:

$$B'_{rg,i,ii,t} = \sum_{k \in ACkr_{rg,k,t}} \left[ [A_{k,i,t}]^T \cdot \left[ \sum_{kk \in ACkr_{rg,k,t}} (\Omega_{k,kk,t} \cdot A_{k,i,t}) \right] \right] \quad (4-52)$$

$\forall (rg, i, ii, t) \in (maprgi_{rg,i,t} \text{ and } maprgi_{rg,ii,t})$

$$H_{rg,k,i,t} = \sum_{kk} [(-\Omega_{k,kk,t}) \cdot A_{k,i,t}] \quad (4-53)$$

$\forall (rg, k, i, t) \in (maprgi_{rg,i,t} \text{ and } maprgk_{rg,k,t} \text{ and } ACkr_{rg,k,t})$

Το υπόδειγμα για την προσομοίωση του ηλεκτρικού δικτύου, όπως αναλύθηκε προηγουμένως, περιλαμβάνει τους εξής περιορισμούς. Ο περιορισμός **(4-54)** εξασφαλίζει την ικανοποίηση της εξωγενούς έγχυσης ισχύος (θετικής ή αρνητικής) σε κάθε κόμβο είτε από το AC δίκτυο είτε από το DC. Ο **(4-55)** υπολογίζει την έγχυση ενεργού ισχύος σε κάθε κόμβο-χώρα στο AC υποδίκτυο και ο **(4-56)** την έγχυση ενεργού ισχύος σε κάθε κόμβο-χώρα στο DC υποδίκτυο. Επιπλέον, ο **(4-57)** υπολογίζει την ροή ενεργού ισχύος σε κάθε διασύνδεση, ενώ ο **(4-58)** ορίζει τον ζυγό αναφοράς, η φάση του διανύσματος τάσης του οποίου είναι μηδενική. Τέλος οι **(4-59)**, **(4-60)**, **(4-61)**, **(4-62)** και **(4-63)** ορίζουν ότι η ροή ισχύος σε μια διασύνδεση δεν είναι μεγαλύτερη από την μέγιστη επιτρεπόμενη.

$$(YA_{i,s,t} + YD_{i,s,t}) - Y_{i,s,t} = 0 \quad \forall i, s, t \quad (4-54)$$

$$YA_{i,s,t} = \sum_{rg} \sum_{ii \in maprgi_{rg,ii,t}} [B'_{rg,i,ii,t} \cdot TH_{rg,ii,s,t}] \quad \forall i, s, t \quad (4-55)$$

$$YD_{i,s,t} = \sum_{ii} \sum_{\substack{k \in DCk_{k,t} \\ \notin ACk_{k,t}}} (-Fl_{k,s,t} \cdot A_{k,i,t}) \quad \forall i, s, t \quad (4-56)$$

$$Fl_{k,s,t} = \sum_{rg} \sum_{ii \in maprgi_{rg,ii,t}} [H_{rg,k,ii,t} \cdot TH_{rg,ii,s,t}] \quad \forall k \in ACk_{k,t}, s, t \quad (4-57)$$

$(xi_{k,ii} \text{ or } xi_{k,ii,i})$

$$swing_{rg,i,t} \cdot TH_{rg,i,s,t} = 0 \quad \forall (rg, i, s, t) \in \text{maprg}_{i,rg,i,t} \quad (4-58)$$

$$Tx_{k,t} \geq Fl_{k,s,t} \quad \forall (k, s, t) \in ka_{k,t} \quad (4-59)$$

$$Tx_{k,t} \geq -Fl_{k,s,t} \quad \forall (k, s, t) \in ka_{k,t} \quad (4-60)$$

$$Intmax_{ntcl,t} \geq \sum_{\substack{k \\ \in ka_{k,t} \\ \in intc_{ntcl,k}}} (Fl_{k,s,t} \cdot A_{k,i,t}) \quad \forall (ntcl, i, ii, s, t) \in \text{xntc}_{ntcl,i,ii} \quad (4-61)$$

$$-Fl_{k,s,t} + NTx_{k,t} \geq 0 \quad \forall k, s, t \quad (4-62)$$

$$Fl_{k,s,t} + NTx_{k,t} \geq 0 \quad \forall k, s, t \quad (4-63)$$

#### 4.3.11 Αντικειμενική συνάρτηση – Διαχρονική συνάρτηση κέρδους από την παραγωγή και προσφορά ηλεκτρισμού

Το παρακάτω υπόδειγμα προσομοιώνει το πρόβλημα επιχείρησης παραγωγής ηλεκτρισμού που λειτουργεί στην αγορά. Το υπόδειγμα έχει στόχο τον βέλτιστο μακροχρόνιο σχεδιασμό του ηλεκτρικού συστήματος. Αυτός περιλαμβάνει την εύρεση των επενδύσεων καθώς και την κατάλληλη ένταξη των μονάδων στο σύστημα ώστε με δεδομένους τεχνολογικούς περιορισμούς ή περιορισμούς χάραξης πολιτικής να επιτυγχάνεται η μεγιστοποίηση της συνάρτησης κέρδους από την παραγωγή και προσφορά του ηλεκτρισμού.

Η αντικειμενική συνάρτηση του υποδείγματος συνίσταται στην μεγιστοποίηση της παρούσας αξίας του κέρδους από την παραγωγή και προσφορά του ηλεκτρισμού. Το κόστος περιλαμβάνει το κόστος αποπληρωμής του κεφαλαίου των ήδη εγκατεστημένων μονάδων, των επενδύσεων σε νέες μονάδες ή σε αντλησιοταμιευτικούς σταθμούς και σε ανακαίνιση ήδη εγκατεστημένων μονάδων, το κόστος συντήρησης των μονάδων, το κόστος αγοράς καυσίμων, το μεταβλητό κόστος των μονάδων που αφορά κυρίως σε ιδιοκαταναλώσεις, το κόστος αγοράς δικαιωμάτων εκπομπών, το κόστος μεταφοράς και αποθήκευσης των κατακρατούμενων τόνων  $CO_2$  και το κόστος χρήσης του ηλεκτρικού δικτύου

Τα έσοδα υπολογίζονται ως το γινόμενο της προσφερόμενης ισχύος ηλεκτρισμού ( $D_{i,s,t}$ ) επί την τιμή προσφοράς της ( $p_{i,s,t}$ ). Η ζητούμενη ποσότητα και η τιμή προσφοράς του ηλεκτρισμού είναι ο γεωμετρικός τόπος των σημείων που προκύπτουν ως αποτέλεσμα του προβλήματος βελτιστοποίησης της χρησιμότητας του καταναλωτή. Για να προσομοιώσουμε το γεωμετρικό τόπο θεωρήσαμε γραμμική συνάρτηση  $p_{i,s,t} = a_{i,s,t} - \beta_{i,s,t} \cdot D_{i,s,t}$ , με παραμέτρους  $a_{i,s,t}$  και  $\beta_{i,s,t}$ .

Η συνάρτηση κόστους του καυσίμου ( $f p_{i,f,t}(F_{i,f,t})$ ) ανά μονάδα καυσίμου είναι συνάρτηση αύξουσα και μη γραμμική. Στο βραχυχρόνιο ορίζοντα μελέτης η επιχείρηση έχει συμβολαιοποιημένες ποσότητες καυσίμου, δεδομένη ποσότητα εκ των οποίων η επιχείρηση υποχρεούται να αποπληρώσει είτε τη χρησιμοποιήσει είτε όχι (take or pay). Εάν χρειαστεί μεγαλύτερες ποσότητες, η επιχείρηση τις αναζητεί στη spot αγορά. Συνεπώς η εύρεση επιπρόσθετων ποσοτήτων είναι πιο δύσκολη και συνεπάγεται μεγαλύτερες τιμές. Σε μεσο-/ μακρο- χρόνιο ορίζοντα, αντιθέτως, η επιχείρηση έχει τη δυνατότητα αξιολόγησης διαφόρων παρόχων καυσίμου. Επιπλέον, σε μακροχρόνιο ορίζοντα μέσα από το πρόβλημα βελτιστοποίησης η επιχείρηση μπορεί να μεταβάλλει τις ζητούμενες ποσότητές της. Συνεπώς η καμπύλη κόστους καυσίμου είναι αύξουσα αλλά πιο ομαλή σε σχέση με το βραχυχρόνιο ορίζοντα. Το σύστημα μελετάται από το 2015 (έτος βάσης) έως το 2050. Για τα πρώτα έτη μελέτης, στα οποία υπάρχει δυσκολία εύρεσης ποσοτήτων, οι συναρτήσεις κόστους προσομοιάζουν το βραχυχρόνιο ορίζοντα. Όσο περνούν τα χρόνια οι συναρτήσεις κόστους προσομοιάζουν το μακροχρόνιο ορίζοντα.

Η συνάρτηση του σταθερού κόστους λειτουργίας και συντήρησης ανά μονάδα εγκατεστημένης ισχύος ( $f c_{i,n,\tau,t}(K_{i,n,\tau,t})$ ) εξαρτάται από το έτος κατασκευής της μονάδας. Για μία προσφάτως κατασκευασμένη μονάδα, το κόστος συντήρησης είναι ένας αριθμός. Όσο αυξάνεται ο χρόνος λειτουργίας της μονάδας το κόστος λειτουργίας και συντήρησης αυξάνεται μη γραμμικά. Όταν το κόστος αυτό σε συνδυασμό με το μεταβλητό κόστος λειτουργίας της μονάδας γίνει μεγαλύτερο από το μακροχρόνιο οριακό κόστος της μονάδας (long-term marginal cost – LTMC), τότε η λειτουργία της μονάδας δεν είναι συμφέρουσα και εξετάζεται η ανακαίνιση ή η οριστική απόσυρση της.

Όπως αναλύθηκε προηγουμένως στο πλαίσιο των πολιτικών μείωσης εκπομπών  $CO_2$  είναι απαραίτητη η κατοχή δικαιωμάτων για την εκπομπή τους. Η αγορά δικαιωμάτων εκπομπών (Emission Trading Scheme – ETS) είναι πανευρωπαϊκή, συνεπώς η επιχείρηση μιας χώρας δεν μπορεί να επηρεάσει την τιμή των δικαιωμάτων εκπομπών ( $ETS p_t$ ). Οι τιμές της εξωγενούς παραμέτρου του κόστους των δικαιωμάτων εκπομπών έχουν θεωρηθεί ως γνωστές και χρησιμοποιήθηκαν οι τιμές όπως υπολογίστηκαν από το υπόδειγμα PRIMES<sup>2</sup>.

Το κόστος μεταφοράς και αποθήκευσης των κατακρατούμενων τόνων  $CO_2$  ανά κατακρατούμενο τόνο ( $c e_{i,t}(ES_{i,t})$ ) εξαρτάται από τη θέση στην οποία εξετάζεται να γίνει η εγκατάσταση, και πιο συγκεκριμένα από το μέγεθος και το βάθος των γεωλογικών σχηματισμών που ενδεχομένως υπάρχουν καθώς και από τη γεωλογία του υπεδάφους η οποία επηρεάζει τις γεωτρήσεις.

<sup>2</sup> Σενάριο Αναφοράς Ευρωπαϊκής Επιτροπής  
[https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/trends\\_to\\_2050\\_update\\_2013.pdf](https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/trends_to_2050_update_2013.pdf)



Δυνατές θέσεις επιλογής αποτελούν κοιτάσματα-ορυχεία πετρελαίου ή φυσικού αερίου. Στις περιπτώσεις αυτές υπάρχουν οι γεωλογικοί σχηματισμοί καθώς και το απαιτούμενο δίκτυο για την μεταφορά και αποθήκευση των ποσοτήτων  $CO_2$ . Εναλλακτικά, μπορεί να επιλεγούν θέσεις στις οποίες υπάρχουν κατάλληλοι γεωλογικοί σχηματισμοί, ωστόσο δεν υπάρχει ήδη εγκατεστημένο δίκτυο, συνεπώς το κόστος αυξάνεται. Τέλος, δύναται να επιλεγεί θέση η οποία δεν διαθέτει κάποιο φυσικό γεωλογικό σχηματισμό ούτε δίκτυο αλλά πρέπει να κατασκευαστεί εξ αρχής και η δεξαμενή αποθήκευσης και το δίκτυο μεταφοράς, συνεπώς το κόστος στην περίπτωση αυτή αυξάνεται περαιτέρω.

Το κεφαλαιουχικό κόστος των νέων επενδύσεων ανά μονάδα ισχύος ( $icp_{i,n,t}(\sum_{\tau \leq t} I_{i,n,\tau})$ ) εξαρτάται από τη γεωγραφική θέση του σταθμού ή τη μορφολογία του εδάφους. Επιπλέον, μεταβάλλεται εάν η θέση του σταθμού είναι απομακρυσμένη από το οδικό ή το ηλεκτρικό δίκτυο. Το κεφαλαιουχικό κόστος των μονάδων συμπαραγωγής ηλεκτρισμού – θερμότητας είναι αυξημένο ώστε να περιλαμβάνει το επιπλέον κόστος της τεχνολογίας συμπαραγωγής (απομάστευσης ατμού από την γεννήτρια).

Αναφορικά με το κόστος ανακαίνισης παλιών μονάδων ανά μονάδα ισχύος ( $ice_{i,n,t}(\sum_{\tau \leq t} EI_{i,n,\tau})$ ), αυτό εξαρτάται από το μέγεθος του σταθμού όπως επίσης και από την παλαιότητα του (έτος κατασκευής).

Το κεφαλαιουχικό κόστος ανά μονάδα εγκατεστημένης ισχύος των επενδύσεων σε αντλησιοταμιευτικούς σταθμούς ( $npx_{i,\tau,t}(\rho\rho_{i,\tau})$ ) εξαρτάται από τη γεωγραφική θέση του σταθμού και τη μορφολογία του εδάφους. Το κεφαλαιουχικό κόστος κατασκευής ενός αντλησιοταμιευτικού σταθμού δίπλα σε φυσική λίμνη είναι μειωμένο συγκριτικά με το κόστος του σταθμού εάν η χωρητικότητα της λίμνης είναι μικρή ή η τοποθεσία δεν βρίσκεται κοντά σε φυσική λίμνη, δεδομένου ότι στην περίπτωση αυτή είναι απαραίτητη η κατασκευή φράγματος και περισσότερων εγκαταστάσεων.

Το κόστος δικτύου εξαρτάται από το κόστος χρήσης της διασύνδεσης που θα χρησιμοποιηθεί καθώς και από την ποσότητα ενέργειας που θα μεταφερθεί. Το μοναδιαίο κόστος χρήσης κάθε διασύνδεσης ( $gcu_{k,t}$ ) καθορίζεται από τον ρυθμιστή του δικτύου.

Συμπερασματικά, οι παράγοντες που επηρεάζουν την τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης είναι:

Τα έσοδα τα οποία υπολογίζονται ως εξής

$$\sum_s p_{i,s,t} \cdot D_{i,s,t}$$

Και το κόστος στο οποίο αθροίζονται

1. Το κόστος αγοράς καυσίμου

$$\left( \sum_f f p_{i,f,t}(F_{i,f,t}) \cdot F_{i,f,t} \right)$$

2. Το μεταβλητό κόστος των σταθμών ηλεκτροπαραγωγής, το οποίο μεταβάλλεται καθώς μεταβάλλεται η παραγόμενη ποσότητα του σταθμού, όπως για παράδειγμα οι ιδιοκαταναλώσεις

$$\left( \sum_n \sum_{\tau \leq t} \sum_s v c_{i,n,\tau,t}(G_{i,n,\tau,s,t}) \cdot G_{i,n,\tau,s,t} \right)$$

3. Το σταθερό κόστος των σταθμών

$$\sum_n \sum_{\tau \leq t} f c_{i,n,\tau,t}(K_{i,n,\tau,t}) \cdot K_{i,n,\tau,t}$$

4. Το κεφαλαιουχικό κόστος των επενδύσεων σε νέες μονάδες

$$\sum_n \left( \sum_{\tau \leq t} n i_{i,n,\tau,t}(\rho_{i,n,\tau}) \cdot i c p_{i,n,\tau} \left( \sum_{\tau \tau \leq t} I_{i,n,\tau \tau} \right) \cdot I_{i,n,\tau} \right)$$

και σε ανακαίνιση παλαιών μονάδων

$$\sum_n \left( \sum_{\tau \leq t} n e_{i,n,\tau,t}(\rho_{i,n,\tau}) \cdot i c e_{i,n,\tau} \left( \sum_{\tau \tau \leq t} E I_{i,n,\tau \tau} \right) \cdot E I_{i,n,\tau} \right)$$

5. Το κόστος αγοράς αδειών εκπομπής

$$E T S p_t \cdot E M_{i,t}$$

6. Το κόστος μεταφοράς και αποθήκευσης των κατακρατούμενων τόνων CO<sub>2</sub>

$$c e_{i,t}(E S_{i,t}) \cdot E S_{i,t}$$

7. Το κεφαλαιουχικό κόστος των επενδύσεων σε αντλησιοταμιευτικούς σταθμούς

$$\sum_{\tau \leq t} n p x_{i,\tau,t}(\rho p_{i,\tau}) \cdot P C X_{i,\tau,t}$$

8. Το κόστος χρήσης του δικτύου, το οποίο καθορίζεται από το διαχειριστή του δικτύου

$$\sum_t e^{-\delta_t t} \cdot \left( \sum_k \sum_s h r s_s \cdot F L_{k,s,t} \cdot g c u_{k,t} \right)$$

Η αντικειμενική συνάρτηση προς μεγιστοποίηση είναι

$$\begin{aligned}
 & \sum_{t=1}^T e^{-\delta t} \cdot [ \sum_i [ \sum_s p_{i,s,t} \cdot D_{i,s,t} \\
 & - \sum_f f p_{i,f,t}(F_{i,f,t}) \cdot F_{i,f,t} \\
 & - \sum_n \sum_{\tau \leq t} \sum_s v c_{i,n,\tau,t}(G_{i,n,\tau,s,t}) \cdot G_{i,n,\tau,s,t} \\
 & - \sum_n \sum_{\tau \leq t} f c_{i,n,\tau,t}(K_{i,n,\tau,t}) \cdot K_{i,n,\tau,t} \\
 & - \sum_n (\sum_{\tau \leq t} n i_{i,n,\tau,t}(\rho_{i,n,\tau}) \cdot i c p_{i,n,\tau}(\sum_{\tau \leq t} I_{i,n,\tau,\tau}) \cdot I_{i,n,\tau}) \\
 & - \sum_n (\sum_{\tau \leq t} n e_{i,n,\tau,t}(\rho_{i,n,\tau}) \cdot i c e_{i,n,\tau}(\sum_{\tau \leq t} E I_{i,n,\tau,\tau}) \cdot E I_{i,n,\tau}) \\
 & - c e_{i,t}(\sum_{\tau \leq t} E S_{i,\tau}) \cdot E S_{i,t} \\
 & - E T S p_t \cdot E M_{i,t} \\
 & - \sum_{\tau \leq t} n p x_{i,\tau,t}(\rho \rho_{i,\tau}) \cdot P C X_{i,\tau,t} \\
 & ] - \sum_k \sum_s h r s_s \cdot F L_{k,s,t} \cdot g c u_{k,t} ] \tag{4-64}
 \end{aligned}$$

Η παραπάνω συνάρτηση **(4-64)** αντιπροσωπεύει την παρούσα αξία του κέρδους από την παραγωγή και προσφορά του ηλεκτρισμού για όλα τα χρόνια στα οποία επεκτείνεται η μελέτη.

#### 4.3.12 Υπαρξη και μοναδικότητα λύσης

Μια συνάρτηση είναι κυρτή (Rockafellar, Convex Analysis, 1970) αν και μόνο αν ισχύει

$$f((1 - \lambda) \cdot x + \lambda \cdot y) \leq (1 - \lambda) \cdot f(x) + \lambda \cdot f(y), 0 < \lambda < 1 \tag{4-65}$$

Όλοι οι περιορισμοί του αιτιοκρατικού υποδείγματος είναι γραμμικές συναρτήσεις, οπότε συνάγεται το συμπέρασμα ότι είναι κυρτές. Επιπλέον, τα σύνολα  $x$  που προκύπτουν από κυρτή συνάρτηση ως  $\{x | f(x) \leq a\}$  είναι επίσης κυρτά. Για δύο σύνολα που είναι κυρτά, ισχύει ότι η τομή τους είναι κυρτό σύνολο (Rockafellar, Convex Analysis, 1970), οπότε προκύπτει ότι ο χώρος εφικτών λύσεων ως τομή των κυρτών συνόλων που ορίζονται από κάθε περιορισμό είναι κυρτό σύνολο.

Στο συγκεκριμένο υπόδειγμα η βελτιστοποίηση αφορά την μεγιστοποίηση της αντικειμενικής συνάρτησης. Όταν ο χώρος εφικτών λύσεων είναι κυρτός και το προς επίλυση πρόβλημα είναι η εύρεση μεγίστου, τότε αρκεί η αντικειμενική συνάρτηση να είναι γνησίως κοίλη ή αντίστοιχα η πρώτη παράγωγός της να είναι γνησίως φθίνουσα, ώστε η λύση να είναι μοναδική (Rockafellar, Convex Analysis, 1970).

Η αντικειμενική συνάρτηση υπολογίζει το κέρδος επιχείρησης που λειτουργεί στην αγορά. Αυτό προκύπτει από την αφαίρεση της συνάρτησης του κόστους παραγωγής του ηλεκτρισμού ( $g$ ) από

την συνάρτηση εσόδων της επιχείρησης ( $f$ ). Τα έσοδα της επιχείρησης ως συνάρτηση του ζητούμενου ηλεκτρισμού είναι κοίλη συνάρτηση με αποτέλεσμα η πρώτη παράγωγος να είναι φθίνουσα. Η πρώτη παράγωγος της συνάρτησης του κόστους παραγωγής είναι αύξουσα όπως μπορεί να εξαχθεί από την πρόσθεση γνησίως αυξουσών συναρτήσεων μεταβλητού και κεφαλαιουχικού κόστους.

Για τις συναρτήσεις αυτές ισχύει:

$$f' \searrow \qquad \qquad \qquad g' \nearrow \qquad \qquad \qquad (4-66)$$

Χωρίς βλάβη της γενικότητας υπάρχουν  $q_1, q_2$  με  $q_1 < q_2$  τέτοια ώστε να ισχύει:

$$f'|_{q_1} > g'|_{q_1} \qquad \qquad \qquad f'|_{q_2} < g'|_{q_2} \qquad \qquad \qquad (4-67)$$

Σε διαφορετική περίπτωση η επιχείρηση θα είχε αρνητικά κέρδη το οποίο δεν είναι μακροχρόνια σταθερή κατάσταση.

Η πρώτη παράγωγος της αντικειμενικής συνάρτησης που είναι η αφαίρεση ( $f - g$ ) είναι γνησίως φθίνουσα και με δεδομένη την ισχύ της **(4-67)** υπάρχει διάστημα  $(q_1, q_2)$  τέτοιο ώστε τα κέρδη της επιχείρησης να είναι θετικά. Επιπλέον υπάρχει σημείο  $q$  στο οποίο η πρώτη παράγωγος της συνάρτησης των εσόδων  $f'$  είναι ίση με τη συνάρτηση κόστους  $g'$  και  $q \in (q_1, q_2)$ , δηλαδή τέτοιο ώστε να ισχύει ότι

$$f'|_q = g'|_q \qquad \qquad \qquad (4-68)$$

Το σημείο αυτό αποτελεί λύση της αντικειμενικής συνάρτησης και είναι μοναδικό δεδομένου ότι η πρώτη παράγωγος της είναι γνησίως μονότονη.

#### 4.4 Μοντελοποίηση ατελούς ανταγωνισμού – ισορροπία κατά Nash-Cournot

Κατά την ανάλυση της αγοράς όπως παρουσιάστηκε στα προηγούμενα υποκεφάλαια έγινε η υπόθεση ότι οι επιχειρήσεις στην αγορά λειτουργούν υπό καθεστώς τέλει ανταγωνισμού. Στην συνέχεια θα αναλυθεί η αγορά στην οποία οι επιχειρήσεις ανταγωνίζονται κατά Nash – Cournot.

Σε αυτή την περίπτωση οι επιχειρήσεις παραγωγής ηλεκτρισμού συμπεριφέρονται «ολιγοπωλιακά» στην αγορά ηλεκτρισμού. Στην περίπτωση του ανταγωνισμού κατά Cournot η αντίληψη που έχουν οι επιχειρήσεις για την ελαστικότητα ζήτησης μεταβάλλεται ενδογενώς και είναι συνάρτηση του μεριδίου αγοράς της επιχείρησης και του αριθμού των επιχειρήσεων που δραστηριοποιούνται στον κλάδο. Στο ολιγοπώλιο Cournot οι επιχειρήσεις που δραστηριοποιούνται στην αγορά γνωρίζουν την συνάρτηση ζήτησης και αποφασίζουν

ταυτόχρονα τις ποσότητες που θα πουλήσει η κάθε μία. Επιπλέον στην περίπτωση του ατελή ανταγωνισμού κατά Nash-Cournot, οι επιχειρήσεις θεωρούν δεδομένη την παραγωγή των άλλων επιχειρήσεων και προσπαθούν να μεγιστοποιήσουν το κέρδος τους μεταβάλλοντας την δική τους παραγωγή.

Σε αυτό το υποκεφάλαιο έχει υποτεθεί ότι η αντίστροφη συνάρτηση ζήτησης είναι γραμμική όπως

$$P_{i,s,t}(D_{i,s,t}) = a_{i,s,t} - b_{i,s,t} \cdot D_{i,s,t} \quad \forall i, s, t \quad (4-69)$$

Όπου  $a_{i,s,t}, b_{i,s,t}$  είναι εξωγενείς συντελεστές που προκύπτουν από την θεώρηση ενός σημείου  $P_{0,i,s,t}, D_{0,i,s,t}$  και την ελαστικότητα ζήτησης ως προς την τιμή στο συγκεκριμένο σημείο.

Έτσι στο πρόβλημα μεγιστοποίησης της κάθε επιχείρησης τα έσοδα αναπαριστάνονται ως

$$\sum_i \sum_{t=1}^T e^{-\delta_{i,t}t} \cdot Sl_{fm,i,s,t} \cdot \left( a_{i,s,t} - b_{i,s,t} \cdot \left( Sl_{fm,i,s,t} + \sum_{\substack{fm1 \\ fm1 \neq fm}} Sl_{fm1,i,s,t} \right) \right) \quad (4-70)$$

Όπου  $Sl_{fm,i,s,t}$  είναι οι πωλήσεις της επιχείρησης  $fm$  στην χώρα-κόμβο  $i$  την τυπική ώρα  $s$  την χρονιά  $t$  [GW]

Όπως φαίνεται η τιμή ηλεκτρισμού στο πρόβλημα της κάθε επιχείρησης δεν είναι εξωγενής αλλά συνάρτηση των δικών της πωλήσεων καθώς και των πωλήσεων των υπόλοιπων παικτών στην αγορά που αναπαριστάνονται με την μπάρα  $a_{i,s,t} - b_{i,s,t} \cdot \left( Sl_{fm,i,s,t} + \sum_{\substack{fm1 \\ fm1 \neq fm}} \bar{Sl}_{fm1,i,s,t} \right)$ . Η κάθε επιχείρηση θεωρεί ως δεδομένες τις πωλήσεις των υπολοίπων παικτών και αποφασίζει τις δικές της πωλήσεις με σκοπό να μεγιστοποιήσει τα κέρδη της. Προκύπτει η συνάρτηση αντίδρασης της κάθε επιχείρησης για οποιαδήποτε τιμή έχουν οι πωλήσεις των υπόλοιπων παικτών

$Sl_{fm,i,s,t} = \frac{1}{2 \cdot b_{i,s,t}} * \left[ a_{i,s,t} - b_{i,s,t} * \sum_{fm1 \neq fm}^{fm1} \bar{SI}_{fm1,i,s,t} - MC \right]^3$  όπου MC είναι το οριακό κόστος της επιχείρησης.

Αν συμβολίσουμε με  $Sl_{fm,i,s,t}^*$  τις βέλτιστες πωλήσεις της κάθε επιχείρησης, τότε μπορούμε να ορίσουμε την ισορροπία κατά Nash.

**Ορισμός 4-1.** Το σύνολο  $(Sl_{fm,i,s,t}^*)$  βρίσκεται σε ισορροπία κατά Nash αν και μόνο αν για κάθε επιχείρηση ισχύει

$$Sl_{fm,i,s,t}^* = \frac{1}{2 \cdot b_{i,s,t}} * \left[ a_{i,s,t} - b_{i,s,t} * \sum_{fm1 \neq fm}^{fm1} \bar{SI}_{fm1,i,s,t}^* - MC \right].$$

Ο παραπάνω ορισμός αναφέρει ότι στην αγορά επικρατεί ισορροπία κατά Nash όταν ο κάθε παίκτης της αγοράς επιλέγει την βέλτιστη για αυτόν πολιτική με δεδομένο ότι και οι υπόλοιποι παίκτες στην αγορά έχουν επιλέξει την βέλτιστη για αυτούς πολιτική.

Η αντικειμενική συνάρτηση του προβλήματος μεγιστοποίησης της κάθε επιχείρησης όταν στην αγορά επικρατεί ανταγωνισμός κατά Cournot γίνεται

$$\begin{aligned} & \sum_{t=1}^T e^{-\delta t} \cdot \left[ \sum_i \left[ \sum_s nh_s \cdot Sl_{fm,i,s,t} \cdot \left( a_{i,s,t} - b_{i,s,t} \cdot \left( Sl_{fm,i,s,t} + \sum_{fm1 \neq fm}^{fm1} \bar{SI}_{fm1,i,s,t} \right) \right) \right. \right. \\ & - \sum_f fp_{fm,i,f,t}(F_{fm,i,f,t}) \cdot F_{fm,i,f,t} \\ & - \sum_n \sum_{\tau \leq t} \sum_s vc_{i,n,\tau,t}(G_{fm,i,n,\tau,t}) \cdot G_{fm,i,n,\tau,t} \\ & - \sum_n \sum_{\tau \leq t} fc_{i,n,\tau,t}(K_{fm,i,n,\tau,t}) \cdot K_{fm,i,n,\tau,t} \\ & - \sum_n (\sum_{\tau \leq t} ni_{fm,i,n,\tau,t}(\rho_{fm,i,n,\tau}) \cdot icp_{i,n,\tau}(\sum_{fm1} \sum_{\tau \leq t} I_{fm1,i,n,\tau,\tau}) \cdot I_{fm,i,n,\tau}) \\ & - \sum_n (\sum_{\tau \leq t} ne_{fm,i,n,\tau,t}(\rho_{fm,i,n,\tau}) \cdot ice_{i,n,\tau}(\sum_{fm1} \sum_{\tau \leq t} EI_{fm1,i,n,\tau,\tau}) \cdot EI_{fm,i,n,\tau}) \\ & - ce_{i,t}(\sum_{fm1} \sum_{\tau \leq t} ES_{fm1,i,\tau}) \cdot ES_{fm,i,t} \\ & - ETS\rho_t \cdot EM_{fm,i,t} \\ & - \sum_{\tau \leq t} np_{i,\tau,t}(\rho_{i,\tau}) \cdot PCX_{i,\tau,t} \\ & \left. \right] - \sum_k \sum_s hrs_s \cdot FL_{k,s,t} \cdot gc_{u,k,t} \end{aligned} \tag{4-71}$$

<sup>3</sup> Η συνάρτηση αντίδρασης προκύπτει από την συνθήκη μεγιστοποίησης του κέρδους της επιχείρησης

Οι προϋποθέσεις για την κυρτότητα του χώρου εφικτών λύσεων ισχύουν όπως έχουν αναλυθεί στο υποκεφάλαιο 4.3.12. Η αντικειμενική συνάρτηση είναι γνησίως κοίλη ως προσθαφαίρεση γνησίως κοίλων συναρτήσεων. Άρα προκύπτει ότι το πρόβλημα της κάθε επιχείρησης έχει μοναδικό βέλτιστο. Άρα οι συνθήκες πρώτης τάξεως είναι αναγκαίες και ικανές για την επίλυση του προβλήματος και την εύρεση την μοναδικής βέλτιστης λύσης.

Για την επίλυση του μοντέλου αυτού χρησιμοποιούνται οι αρχές της μικτής συμπληρωματικότητας όπως έχουν εξηγηθεί στο υποκεφάλαιο 3.5. Πρέπει να διευκρινιστεί ότι έχει υποτεθεί χωρίς βλάβη της γενικότητας ότι όλοι οι περιορισμοί αφορούν την παραγωγή ή το μέρος της ζήτησης που καλύπτει η εκάστοτε επιχείρηση. Οι περιορισμοί που αφορούν την λειτουργία των μονάδων ανάγονται στην κάθε επιχείρηση. Οι περιορισμοί που αφορούν το σύστημα όπως οι περιορισμοί εφεδρείας έχει γίνει η υπόθεση ότι ο διαχειριστής του συστήματος επιβάλλει ανάλογο περιορισμό στο μέρος της ζήτησης που καλύπτει η κάθε επιχείρηση.

Επιπλέον όπως φαίνεται από την **(4-71)** δεν υπάρχει ξεχωριστή οντότητα που να προσομοιώνει τον λειτουργό του δικτύου. Στην διατριβή έχει γίνει η υπόθεση ότι οι επιχειρήσεις που λειτουργούν στην αγορά είναι «καθετοποιημένες». Αυτό σημαίνει ότι είναι οι ίδιες επιχειρήσεις που παράγουν τον ηλεκτρισμό και ταυτόχρονα τον πωλούν. Δηλαδή μια επιχείρηση είναι ταυτόχρονα και παραγωγός και πωλητής ηλεκτρισμού. Ο λειτουργός του Ευρωπαϊκού Ηλεκτρικού Δικτύου όπως προσομοιώνεται στο υποκεφάλαιο 4.3.10 αναλαμβάνει μόνο την «φυσική» μεταφορά του ηλεκτρισμού στους διάφορους κόμβους παραγωγής και ζήτησης. Δηλαδή στην αντικειμενική συνάρτηση αποφασίζονται οι «εμπορικές» ροές μεταξύ των κόμβων και των επιχειρήσεων παραγωγής και πώλησης και ο λειτουργός του ηλεκτρικού δικτύου αναλαμβάνει την υποχρέωση να πραγματοποιήσει τις «φυσικές» ροές.

Η επίλυση του παραπάνω προβλήματος μπορεί να γίνει με δύο διαφορετικές μεθόδους. Η πρώτη αφορά όπως αναφέρουμε και παραπάνω με την χρήση των συνθηκών Karush-Kuhn-Tucker. Σε αυτή την περίπτωση, το πρόβλημα της κάθε επιχείρησης μορφοποιείται ως σύστημα συμπληρωματικών ανισοτήτων με τις αντίστοιχες δυϊκές μεταβλητές. Επιπλέον, στο πρόβλημα προστίθεται ο περιορισμός ισότητας της κάλυψης της ζήτησης. Στην συγκεκριμένη περίπτωση την οποία μελετάμε στην διατριβή επειδή οι επιχειρήσεις έχουν υποτεθεί συμμετρικές είναι αρκετή η μοντελοποίηση του προβλήματος της μίας μόνο επιχείρησης. Πρέπει να διευκρινιστεί ότι εξαιτίας της μορφής των θεωρούμενων συναρτήσεων ισχύουν οι συνθήκες κανονικότητας που είναι ικανές και αναγκαίες συνθήκες ώστε το μη-γραμμικό πρόβλημα της κάθε επιχείρησης να είναι ισοδύναμο με την γραφή που προκύπτει από την γραφή του προβλήματος με χρήση των συνθηκών Karush-Kuhn-Tucker.

Η δεύτερη μέθοδος για την επίλυση του προβλήματος η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί εξαιτίας και της συμμετρικότητας των επιχειρήσεων είναι μέσω επαναλήψεων . Αρχικά η

επιχείρηση της οποίας το πρόβλημα επιλύουμε θεωρεί μια δεδομένη ποσότητα όσον αφορά την παραγωγή των άλλων επιχειρήσεων. Στην συνέχεια επιλύεται το πρόβλημα της επιχείρησης. Με δεδομένη την συμμετρικότητα των επιχειρήσεων αναπροσαρμόζεται η θεωρούμενη ποσότητα που παράγουν οι υπόλοιπες επιχειρήσεις και το πρόβλημα επιλύεται ξανά. Αυτή η διαδικασία συνεχίζεται μέχρι η ποσότητα παραγωγής της συμμετρικής επιχείρησης που προκύπτει ως αποτέλεσμα επίλυσης του προβλήματος να είναι ίση με την θεωρούμενη ποσότητα παραγωγής των υπόλοιπων συμμετρικών επιχειρήσεων ανά επιχείρηση.

#### 4.4.1 Μακροχρόνιος βέλτιστος αριθμός συμμετρικών επιχειρήσεων λειτουργίας στην αγορά

Στην παρούσα διατριβή μελετήθηκε η επίπτωση της αβεβαιότητας που αντιμετωπίζουν οι επιχειρήσεις στον «βέλτιστο» αριθμό επιχειρήσεων που θα επικρατήσουν στην αγορά στην μακροχρόνια ισορροπία. Αρχικά θα αποδείξουμε τον βέλτιστο αριθμό επιχειρήσεων για το αιτιοκρατικό υπόδειγμα και στην συνέχεια στα επόμενα κεφάλαια θα καταδείξουμε την διαφορά που προκύπτει με την εισαγωγή της αβεβαιότητας.

Για την απλοποίηση των πράξεων θα μελετηθεί ο παραπάνω ισχυρισμός στο παρακάτω απλοποιημένο μοντέλο

$$\text{Max}_q [a - b * (q + Q_{-i})] * q - \left(\frac{C}{v} + MC * q\right) \quad (4-72)$$

Όπου  $q$  είναι η ποσότητα που παράγει η επιχείρηση της οποίας το πρόβλημα επιλύουμε,  $Q_{-i}$  είναι η ποσότητα που παράγουν οι υπόλοιπες συμμετρικές εταιρίες,  $C$  είναι τα σταθερό κόστος όλου του συστήματος και  $\frac{C}{v}$  είναι το σταθερό κόστος που επωμίζεται η κάθε επιχείρηση,  $a, b$  είναι οι συντελεστές της γραμμικής συνάρτησης ζήτησης και  $MC$  είναι το μεταβλητό κόστος ανά μονάδα παραγόμενου ηλεκτρισμού.

Το πρόβλημα της (4-72) γράφεται σε συνθήκες Karush-Kuhn-Tucker ως εξής

$$[a - b * (q + Q_{-i})] * q - b * q - MC = 0 \quad \perp \quad q > 0 \quad (4-73)$$

Επιπλέον για τον υπολογισμό της ποσότητας μακροχρόνιας ισορροπίας της αγοράς ισχύει η παρακάτω συνθήκη.

$$[a - b * (q + Q_{-i})] * q = \left(\frac{C}{v} + MC * q\right) \quad (4-74)$$

Ή



$$[a - b * Q] * q = \left( \frac{c * q}{Q} + MC * q \right) = q * \left( \frac{c}{Q} + MC \right) \quad (4-75)$$

από την οποία προκύπτει ότι  $[a - b * Q] = \left( \frac{c}{Q} + MC \right)$  όπου Q είναι η συνολική πωλούμενη ποσότητα ηλεκτρισμού στην αγορά.

Συνδυάζοντας τις **(4-72)** και **(4-75)** προκύπτει ότι

$$Q = \frac{a - MC + \sqrt{(MC - a)^2 - 4 * b * c}}{2 * b} \quad (4-76)$$

Από την **(4-76)** προκύπτει ότι η συνολική πωλούμενη ποσότητα στην μακροχρόνια ισορροπία της αγοράς εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά της συνάρτησης ζήτησης καθώς και το σταθερό και μεταβλητό κόστος της τυπικής συμμετρικής επιχείρησης που λειτουργεί στην αγορά.



## Κεφάλαιο 5

### 5 Εισαγωγή αβεβαιοτήτων

---

#### 5.1 Παράγοντες αβεβαιότητας

Στην παρούσα διατριβή, ο κύριος σκοπός είναι η μοντελοποίηση της βέλτιστης ανάπτυξης του συστήματος ηλεκτροπαραγωγής μέσω επενδύσεων σε μονάδες καθώς και η αναπαράσταση της μεταφοράς και της λειτουργίας του συστήματος με έμφαση την δυνατότητα υπολογισμού των αναμενόμενων οικονομικών αποτελεσμάτων των επενδύσεων.

Οι επιχειρήσεις παραγωγής ηλεκτρισμού που λειτουργούν στις διάφορες αγορές-χώρες λειτουργούν σε ένα αβέβαιο περιβάλλον. Όσον αφορά τον μακροπρόθεσμο ορίζοντα, οι τιμές των καυσίμων μπορούν να μεταβάλλονται αρκετά. Η τιμή του αργού πετρελαίου πριν το 1970 ήταν αρκετά χαμηλή, κάτι που είχε ως συνέπεια οι μεταβολές της να ήταν επίσης μικρές κατ' απόλυτο τιμή και δεν δημιουργούσαν πρόβλημα στον σχεδιασμό των επιχειρήσεων. Μετά όμως την κρίση και την μεγάλη άνοδο της τιμής του αργού μέχρι τα μέσα της δεκαετίας του 1970, η τιμή έπεσε ξανά σε χαμηλά επίπεδα. Μεταξύ του 1980 και του 2000, οι τιμές του αργού παρέμειναν χαμηλές κυρίως λόγω νέων ανακαλύψεων κοιτασμάτων και της αδυναμίας των μελών του OPEC να συντονιστούν ώστε να περιοριστεί η παραγωγή αργού πετρελαίου. Από τις αρχές του 2000, οι τιμές του αργού ανέβαιναν μέχρι το 2008 που άγγιξαν πολύ υψηλά νούμερα. Αυτό συνέβαινε κυρίως λόγω της μεγάλης ανάπτυξης του Ακαθάριστου Εγχώριου Προϊόντος (ΑΕΠ) των αναπτυσσόμενων χωρών και της δυσκολίας των επιχειρήσεων παραγωγής αργού να βρουν νέα κοιτάσματα για να αντισταθμιστεί η μείωση της παραγωγής των γνωστών μεγάλων κοιτασμάτων. Στην συνέχεια από το 2008 μέχρι σήμερα, η τιμή του αργού έπεσε πάλι σε χαμηλά επίπεδα. Στο μέλλον, αντίθετα με δεδομένο ότι προβλέπεται ότι θα γίνεται συνέχεια πιο δύσκολη η εύρεση νέων κοιτασμάτων και η παραγωγή των ήδη γνωστών θα φθίνει προβλέπεται ότι η τιμή του αργού θα τείνει να αυξάνει αλλά όμως ο ρυθμός αύξησης είναι αβέβαιος. Επίσης, υπάρχουν μη συμβατικές πηγές παραγωγής

αργού πετρελαίου όπως το πετρέλαιο από ασφαλική άμμο καθώς και μη συμβατικές τεχνικές για την αύξηση του ποσοστού εξόρυξης από τα ήδη γνωστά κοιτάσματα. Οι τεχνολογίες αυτές όμως δεν έχουν ωριμάσει ακόμα κάτι που αναμένεται να συμβεί στο μέλλον. Ο χρόνος όμως ωρίμανσης καθώς και ο ρυθμός είναι αβέβαιος. Άρα προκύπτει ότι η τιμή του αργού πετρελαίου θα παραμείνει αρκετά μεταβλητή και στο μέλλον.

Η τιμή του φυσικού αερίου ακολουθεί την τιμή του αργού. Αυτό αναμένεται να συμβεί και στον μεσοπρόθεσμο ορίζοντα. Στην μακροπρόθεσμο ορίζοντα όμως αναμένεται να υπάρξει μείωση της συσχέτισης των τιμών τους. Περίπου του 75% των παγκόσμιων κοιτασμάτων φυσικού αερίου βρίσκονται σε συγκεκριμένες περιοχές οι οποίες δοκιμάζονται από πολιτικά προβλήματα και εδαφικές διαφορές. Επιπλέον, η παραγωγή από τα κοιτάσματα «γίγαντες», όπως αποκαλούνται τα οποία είναι κοιτάσματα με φθινό κόστος παραγωγής και μεγάλων ποσοτήτων εξόρυξης, φθίνει. Η ανάπτυξη νέων κοιτασμάτων, τα οποία θα μπορούσαν να λύσουν το πρόβλημα, στηρίζεται σε μελέτες σχετικά με πιθανά και δυνατά (probable or possible reserves) κοιτάσματα στα οποία υπάρχει αβεβαιότητα και ως προς την ύπαρξή τους αλλά και ως το μέγεθός τους. Όλα τα παραπάνω συντείνουν στην υπόθεση ότι η τιμή του φυσικού αερίου είναι αρκετά μεταβλητή και προβλέπεται και στο μέλλον να παραμείνει μεταβλητή με την μεταβλητότητά της να αυξάνεται.

Η τιμή της βιομάζας παρουσιάζει επίσης μεταβλητότητα. Η παραγωγή της βιομάζας σε μεγάλη κλίμακα στο μέλλον θα βασίζεται σε καλλιέργειες μεγάλης κλίμακας οι οποίες δεν είναι πλήρως γνωστές σήμερα ως προς το κόστος και την αποτελεσματικότητά τους. Επιπλέον, η ετήσια παραγόμενη ποσότητα βιομάζας εξαρτάται σημαντικά από τις καιρικές συνθήκες. Όλα τα παραπάνω συντείνουν ώστε οι τιμές των προϊόντων βιομάζας να παρουσιάζουν μεγάλη μεταβλητότητα.

Ένας άλλος παράγοντας που συμβάλλει στην αβεβαιότητα που αντιμετωπίζουν οι επιχειρήσεις ηλεκτρισμού είναι η ζήτηση ηλεκτρισμού των μελλοντικών ετών που αφορούν τα έτη επίλυσης του μοντέλου. Από την μια πλευρά, λαμβάνονται διάφορα μέτρα για την αύξηση της ενεργειακής αποδοτικότητας με συνέπεια η ζήτηση ηλεκτρισμού να έχει φθίνουσα τάση. Υλοποιούνται δράσεις για την αντικατάσταση παλιού και μη ενεργειακά αποδοτικού εξοπλισμού με νέο με μικρότερη κατανάλωση για το ίδιο παραγόμενο χρήσιμο έργο. Από την άλλη μεριά, ο εξηλεκτρισμός των μεταφορών αναμένεται να αυξήσει την ζήτηση ηλεκτρισμού. Επιπλέον, ο ηλεκτρισμός υποκαθιστά άλλα καύσιμα στην βιομηχανία με αποτέλεσμα την περαιτέρω αυξητική τάση στην ζήτηση ηλεκτρισμού. Από τα παραπάνω συνάγεται το συμπέρασμα, ότι η ζήτηση ηλεκτρισμού των μελλοντικών ετών είναι αβέβαιη.

Σε αυτό το πλαίσιο, οι πολιτικές σχετικά με την καταπολέμηση της κλιματικής αλλαγής συνεπάγονται την επιβολή περιορισμών σχετιζόμενων με το περιβάλλον στις επιχειρήσεις που λειτουργούν στις διάφορες αγορές ηλεκτρισμού. Το κύριο εργαλείο για την επίτευξη στόχων μείωσης των εκπομπών CO<sub>2</sub> είναι μέσω της αγοράς δικαιωμάτων εκπομπών CO<sub>2</sub> (ETS Emission Trading Scheme) που λειτουργεί στην Ευρωπαϊκή Ένωση. Οι επιχειρήσεις ηλεκτρισμού είναι πλήρως ενταγμένες σε αυτήν την αγορά με ορισμένες εξαιρέσεις επιχειρήσεων μερικών χωρών μελών με χαμηλό σε σχέση με τον μέσο όρο Ακαθάριστο Εγχώριο Προϊόν (ΑΕΠ) σε βράχυ-/μέσο-πρόθεσμο ορίζοντα. Από αυτήν την αγορά προκύπτει μια ορισμένη τιμή για κάθε δικαίωμα εκπομπής την οποία είναι υποχρεωμένες να πληρώνουν οι επιχειρήσεις ηλεκτρισμού για τις εκπομπές τους. Το μέγεθος και το εύρος της τιμής των δικαιωμάτων εκπομπών εξαρτάται σημαντικά από την ένταση των πολιτικών σχετικά με την μείωση των εκπομπών CO<sub>2</sub> αλλά και την χρήση τεχνολογιών με λιγότερες ή και μηδενικές εκπομπές ανά παραγόμενη MWh ηλεκτρισμού. Οι επιχειρήσεις ηλεκτρισμού έχουν την δυνατότητα να επενδύσουν σε νέες τεχνολογίες οι οποίες εκπέμπουν λιγότερο CO<sub>2</sub> κατά την παραγωγή ηλεκτρισμού όπως είναι η τεχνολογία κατακράτησης και αποθήκευσης του CO<sub>2</sub> και οι ΑΠΕ. Η πρώτη εμπειριάζει μεγάλη αβεβαιότητα σχετικά τον χρόνο ωρίμανσής της καθώς και ως προς την αποδοτικότητά της. Οι ΑΠΕ για να μπορέσουν να ενταχθούν σε ένα σύστημα σε μεγάλη κλίμακα πρέπει να υπάρχουν συστήματα αποθήκευσης είτε σε δυναμική είτε σε χημική μορφή ενέργειας. Αυτά όμως εμπειρίζουν μεγάλους κινδύνους σχετικά με την διαθεσιμότητά τους. Έτσι, οι επιχειρήσεις ηλεκτρισμού στην προσπάθειά τους να μην αναλάβουν ρίσκο επενδύοντας σε ανώριμες τεχνολογίες μπορούν να αναβάλλουν τις επενδύσεις τους μέχρι την ωρίμανση των νέων τεχνολογιών. Με αυτή την πρακτική όμως αντιμετωπίζουν τον κίνδυνο να αντιμετωπίσουν μεγάλες τιμές δικαιωμάτων εκπομπών CO<sub>2</sub> με αποτέλεσμα να χάσουν το ανταγωνιστικό τους πλεονέκτημα και μερίδιο αγοράς σε σχέση με ανταγωνιστές. Από τα παραπάνω προκύπτει ότι το μέγεθος των εκπομπών CO<sub>2</sub> έχει μεγάλη μεταβλητότητα, το οποίο έχει ως συνέπεια την μεγάλη διακύμανση της τιμής των δικαιωμάτων εκπομπών CO<sub>2</sub> σε συνάρτηση με την ένταση της πολιτικής μείωσης των εκπομπών.



## Κεφάλαιο 6

### 6 Λήψη Απόφασης σε περιβάλλον με αβεβαιότητα

---

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζουμε συνοπτικά την θεωρία λήψης απόφασης σε στοχαστικό περιβάλλον (Hirshleifer & Riley, 2002), (Mas-Colell, Whinston, & Green, 1995).

#### 6.1 Ορισμοί

Στα προβλήματα λήψης απόφασης υπό καθεστώς αβεβαιότητας, πρέπει να διαχωρίσουμε τον αποφασίζοντα και τις ενέργειές στις οποίες προβαίνει από την «φύση» η οποία αποφασίζει την τελική κατάσταση-τιμή των αβέβαιων παραμέτρων αίροντας την αβεβαιότητα. Ο αποφασίζων επιλέγει μεταξύ ενεργειών, αποφάσεων ή μεταξύ δράσεων, επιλογών και κινήσεων. Η «φύση» αίροντας την αβεβαιότητα επιλέγει την κατάσταση των τυχαίων-αβέβαιων παραμέτρων. Το αποτέλεσμα είναι ο αποφασίζων να λειτουργεί στην κατάσταση που η φύση επέλεξε αναλαμβάνοντας όλες τις συνέπειες.

Για να τυποποιήσουμε και γενικεύσουμε την παραπάνω ορολογία και να μελετήσουμε την λήψη απόφασης σε καθεστώς αβεβαιότητας ορίζουμε τα παρακάτω στοιχεία

- το σύνολο  $X$  των πράξεων που είναι διαθέσιμες στον αποφασίζοντα  $(1, \dots, x, \dots, X)$ , όπου με  $x$  αναφερόμαστε σε συγκεκριμένη πράξη εκ του συνόλου
- το σύνολο  $S$  των δυνατών καταστάσεων της φύσης  $(1, \dots, s, \dots, S)$ , όπου με  $s$  αναφερόμαστε σε συγκεκριμένη δυνατή κατάσταση εκ του συνόλου
- συνάρτηση ενδεχομένων  $v(x, s)$  η οποία δίνει το αποτέλεσμα των ενεργειών του αποφασίζοντα και της επιλογής κατάστασης της «φύσης»
- συνάρτηση πιθανότητας  $\pi(s)$  η οποία εκφράζει την αντίληψη του αποφασίζοντα σχετικά με την πιθανότητα εμφάνισης των διαφορετικών καταστάσεων της φύσης
- συνάρτηση χρησιμότητας η οποία μετρά την επιθυμητότητα των διαφόρων δυνατών ενδεχομένων των καταστάσεων της φύσης

Η συνάρτηση χρησιμότητας σε βέβαιο περιβάλλον ορίζει τις προτιμήσεις του αποφασίζοντα σχετικά με τις διάφορες επιλογές. Σε αβέβαιο περιβάλλον, η συνάρτηση χρησιμότητας η οποία εφαρμόζεται επί των ενδεχομένων έχει ως στόχο ο αποφασίζων να επιλέξει μεταξύ των διαφόρων ενεργειών του οι οποίες καταλήγουν σε διαφορετικά ενδεχόμενα αναλόγως της κατάστασης της φύσης. Σε αυτό το σημείο πρέπει να διευκρινιστεί η διαφορά μεταξύ βέβαιου και αβέβαιου περιβάλλοντος. Στο βέβαιο περιβάλλον, η συνάρτηση χρησιμότητας εφαρμόζεται επί των διαφόρων επιλογών του αποφασίζοντα, ο οποίος στην συνέχεια επιλέγει την «καλύτερη», αυτή που βελτιστοποιεί την χρησιμότητά του. Στο αβέβαιο περιβάλλον αντιθέτως, η συνάρτηση χρησιμότητας εφαρμόζεται επί των τελικών αποτελεσμάτων-ενδεχομένων-καταστάσεων της «φύσης» αφού αρθεί η αβεβαιότητα. Με βάση την χρησιμότητα που ο αποφασίζων έχει αναθέσει σε κάθε ενδεχόμενο, προκύπτει η χρησιμότητα των διαφόρων ενεργειών του ως συνάρτηση της χρησιμότητας των επακόλουθων τις κάθε ενέργειάς του. Πρέπει δηλαδή να διευκρινιστεί ότι στο βέβαιο περιβάλλον η χρησιμότητα εφαρμόζεται επί των διαφόρων επιλογών του αποφασίζοντα (η κάθε ενέργεια οδηγεί με βέβαιη και αιτιοκρατική μέθοδο στο τελικό αποτέλεσμα), ενώ στο αβέβαιο περιβάλλον η χρησιμότητα ανατίθεται στα διαφορετικά ενδεχόμενα των ενεργειών του αποφασίζοντα και στην συνέχεια με κάποια συνάρτηση προκύπτει η χρησιμότητα των διαφόρων ενεργειών του. Θα αναλύσουμε αναλυτικότερα στην συνέχεια αυτή την διαφορά.

Η συνάρτηση πιθανότητας  $\pi(s)$  μπορεί να είναι διακριτή ή συνεχής ως προς τις καταστάσεις της φύσης. Στην περίπτωση που οι καταστάσεις της φύσης είναι διακριτές, τότε ο αποφασίζων υποτίθεται ότι αναθέτει σε κάθε κατάσταση  $s$  της φύσης μια πιθανότητα εμφάνισης  $\pi(s) \in [0,1]$ , η οποία ανήκει στο διάστημα από μηδέν έως ένα τέτοια ώστε το άθροισμα των  $\pi(s)$  όλων των δυνατών καταστάσεων της «φύσης» για κάθε ενέργεια του αποφασίζοντα να ισούται με ένα ( $\sum_s \pi_s = 1$ ). Στην περίπτωση που οι καταστάσεις της φύσης μεταβάλλονται συνεχώς, τότε ο αριθμός των διαφορετικών καταστάσεων για κάθε ενέργεια είναι μη μετρήσιμα άπειρος. Η πιθανότητα εμφάνισης μιας οποιασδήποτε κατάστασης παρότι είναι απειροελάχιστη δεν είναι μηδενική δηλαδή η εμφάνισή της είναι δυνατή. Το άθροισμα των πιθανοτήτων όλων των καταστάσεων της φύσης είναι  $\int_0^S \pi(s) ds = 1$ .

Κάθε επακόλουθο-ενδεχόμενο είναι το αποτέλεσμα των επιλογών του αποφασίζοντα σε συνδυασμό με την κατάσταση που «επέλεξε» η φύση. Στην παρούσα διατριβή υποθέτουμε ότι τα διαφορετικά ενδεχόμενα είναι μετρήσιμα. Μετρήσιμο είναι ένα ενδεχόμενο όταν μπορεί να περιγραφεί από εναλλακτικά καλάθια καταναλωτικών αγαθών τα οποία ο αποφασίζων μπορεί να αξιολογήσει χρησιμοποιώντας την συνάρτηση χρησιμότητας. Επίσης, στην γενικότητα τους τα επακόλουθα μπορεί να είναι



βέβαια ή αβέβαια. Στην πρώτη περίπτωση το επακόλουθο είναι βέβαιο αφού μετά την άρση της αβεβαιότητας δεν εξαρτάται πλέον από την φύση, ενώ στην δεύτερη περίπτωση το επακόλουθο εξαρτάται από μια επόμενη κατάσταση της «φύσης».

Στην παρούσα διατριβή, το πρόβλημα που επιλύουμε αφορά στην βέλτιστη ανάπτυξη ενός ηλεκτρικού συστήματος υπό καθεστώς αβεβαιότητας, τα επακόλουθα αποτιμώνται σε χρηματικούς όρους και είναι βέβαια όντας τα κέρδη της επιχείρησης.

## 6.2 Συνάρτηση χρησιμότητας και κανόνας αναμενόμενης χρησιμότητας

Η συνάρτηση χρησιμότητας εφαρμόζεται επί των ενδεχομένων και εμμέσως επί των ενεργειών του αποφασίζοντα. Στην συνέχεια της διατριβής και για την αποφυγή συγχύσεων, θα ακολουθήσουμε την εξής σημειογραφία

- $v(c)$  είναι η συνάρτηση χρησιμότητας η οποία εφαρμόζεται επί των ενδεχομένων που προκύπτουν από τις ενέργειες του αποφασίζοντα και την κατάσταση της «φύσης». Ονομάζονται και συναρτήσεις χρησιμότητας Bernoulli (Mas-Colell, Whinston, & Green, 1995)
- $U(x)$  είναι η συνάρτηση χρησιμότητας που ορίζεται επί των ενεργειών του αποφασίζοντα και προκύπτει εμμέσως από την  $v(c)$ . Ονομάζεται αναμενόμενη συνάρτηση χρησιμότητας von Neumann-Morgenstern (v.N-M).

Στην συνέχεια θα αναπτύξουμε τον ορισμό και τις ιδιότητες των παραπάνω δύο συναρτήσεων με την υπόθεση ότι οι πιθανότητες των διαφόρων ενδεχομένων είναι αντικειμενικά γνωστές. Με τον όρο «αντικειμενικά γνωστές» για τις πιθανότητες των διαφόρων ενδεχομένων εννοούμε τις περιπτώσεις που είτε οι πιθανότητες είναι γνωστές αντικειμενικά είτε όλοι οι συμμετέχοντες στην υπό μελέτη αγορά συμφωνούν σχετικά με την αριθμητική τιμή τους για τα διάφορα ενδεχόμενα.

Το βασικό δομικό στοιχείο για την ανάπτυξη της θεωρίας λήψης αποφάσεων σε στοχαστικό περιβάλλον είναι η έννοια της απλής λοταρίας. Στην συνέχεια δίνουμε τον ορισμό της.

**Ορισμός 6-1** Απλή λοταρία  $L$  είναι μια λίστα  $L = (c_1, \dots, c_n, \dots, c_N; p_1, \dots, p_n, \dots, p_N)$  με  $p_N \geq 0$  για όλα τα ενδεχόμενα  $n$  και  $c_n$  είναι το χρηματικό αποτέλεσμα του κάθε ενδεχομένου με  $\sum_n p_n = 1$  όπου  $p_n$  είναι η πιθανότητα εμφάνισης του ενδεχομένου  $n$ .

Στον παραπάνω ορισμό, το αποτέλεσμα είναι βέβαιο αφού με την άρση της αβεβαιότητας το χρηματικό αποτέλεσμα είναι  $c_n$ . Στην γενικότερη έκδοσή του, η οποία

είναι γνωστή ως σύνθετη λοταρία, τα αποτελέσματα είναι τα ίδια λοταρίες. Έτσι προκύπτει ο επόμενος ορισμός

Ορισμός 6-2 Δοθέντων  $K$  απλών λοταριών  $L_k = (c_1^k, \dots, c_N^k; p_1^k, \dots, p_N^k), k = 1, \dots, K$  και πιθανότητες  $\alpha_k \geq 0$  με  $\sum_k \alpha_k = 1$ , η σύνθετη λοταρία  $(L_1, \dots, L_K; \alpha_1, \dots, \alpha_K)$  είναι η εναλλακτική με κίνδυνο η οποία έχει ως αποτέλεσμα την απλή λοταρία  $L_k$  με πιθανότητα  $\alpha_k$  για κάθε  $k = 1, \dots, K$ .

Από τους παραπάνω δύο ορισμούς προκύπτει ότι η σύνθετη λοταρία  $(L_1, \dots, L_K; \alpha_1, \dots, \alpha_K)$  μπορεί να αντιστοιχιστεί με απλή λοταρία  $L = (p_1, \dots, p_N)$  η οποία εν τέλει δίνει τα ίδια αποτελέσματα με την σύνθετη με αντίστοιχες πιθανότητες  $p_n = \sum_k \alpha_k p_n^k$ .

Έχουμε ήδη αναπτύξει μέθοδο μοντελοποίησης των διαφόρων ενδεχομένων με ρίσκο δηλαδή έχουμε δώσει τους ορισμούς της απλής και της σύνθετης λοταρίας καθώς και την ισοδυναμία της σύνθετης με απλή λοταρία. Η ανάλυση που θα ακολουθήσει βασίζεται σε συνεπειοκρατικές παραδοχές. Αυτό σημαίνει ότι για την λήψη της απόφασης, ο αποφασίζων είναι αδιάφορος μεταξύ μιας σύνθετης λοταρίας και της αντίστοιχης ισοδύναμής της απλής. Με τον όρο «ισοδύναμη» εννοούμε ότι έχει τελικό αποτέλεσμα τα ίδια ενδεχόμενα-αποτελέσματα με τις ίδιες πιθανότητες

Υποθέτουμε ότι  $\mathcal{L}$  είναι το σύνολο όλων των απλών λοταριών το οποίο ορίζεται επί του συνόλου των δυνατών αποτελεσμάτων  $\mathcal{C}$ . Επιπλέον, υποθέτουμε ότι ο αποφασίζων επιδεικνύει ορθολογικές προτιμήσεις  $\succeq$  στον χώρο  $\mathcal{L}$ . Αυτό σημαίνει ότι εκτός των ιδιοτήτων της ανακλαστικότητας, μεταβατικότητας και πληρότητας οι οποίες ισχύουν για τις σχέσεις προτιμήσεων σε βέβαιο περιβάλλον, ισχύουν επιπλέον τα αξιώματα της συνέχειας και της ανεξαρτησίας τα οποία αναλύονται στην συνέχεια.

Ορισμός 6-3 Αξίωμα συνέχειας. Η σχέση προτιμήσεων  $\succeq$  στον χώρο των απλών λοταριών  $\mathcal{L}$  είναι συνεχής αν για κάθε  $L, L', L''$ , τα σύνολα  $\{\alpha \in [0,1]: \alpha L + (1 - \alpha)L' \succeq L''\} \subset [0,1]$  και  $\{\alpha \in [0,1]: L'' \succeq \alpha L + (1 - \alpha)L'\} \subset [0,1]$  είναι κλειστά.

Άλλη διατύπωση του παραπάνω ορισμού. Αν  $L \leq M \leq N$  τότε υπάρχει πιθανότητα  $p \in [0,1]$  τέτοιο ώστε  $pL + (1 - p)N \sim M$ .

Το αξίωμα της συνέχειας αξιώνει ότι για μικρές αλλαγές στις πιθανότητες δεν αλλάζει η ταξινόμηση μεταξύ δύο λοταριών. Στην συνέχεια αναφέρουμε το αξίωμα της ανεξαρτησίας

Ορισμός 6-4 Αξίωμα ανεξαρτησίας. Η σχέση προτίμησης  $\succeq$  στον χώρο των απλών λοταριών  $\mathcal{L}$  ικανοποιεί το αξίωμα της ανεξαρτησίας αν για όλα τα  $L, L', L'' \in \mathcal{L}$  και  $a \in (0,1)$  ισχύει  $L \succeq L'$  εάν και μόνο εάν  $aL + (1-a)L'' \succeq aL' + (1-a)L''$

Το αξίωμα της ανεξαρτησίας σχετικά με τις προτιμήσεις είναι πολύ βασικό στην ανάπτυξη της θεωρίας προτιμήσεων υπό καθεστώς αβεβαιότητας. Στην θεωρία των προτιμήσεων του καταναλωτή σε καθεστώς βεβαιότητας η χρησιμότητα που προκύπτει από την κατανάλωση ενός προϊόντος μπορεί να είναι είτε σε άμεση συνάρτηση με την κατανάλωση άλλων προϊόντων (βλ. υποκατάστατα ή συμπληρωματικά προϊόντα) είτε σε έμμεση συνάρτηση μέσω του περιορισμένου προϋπολογισμού του αποφασίζοντα. Αντίθετα, σε περιβάλλον υπό καθεστώς αβεβαιότητας, η χρησιμότητα εφαρμόζεται επί του τελικού επακόλουθου-ενδεχομένου που προκύπτει από τις ενέργειες του αποφασίζοντα και την τελική κατάσταση της φύσης. Αυτό σημαίνει ότι ο αποφασίζων δεν μπορεί να «καταναλώσει» ταυτόχρονα πολλά από τα ενδεχόμενα αλλά μόνο ένα επακόλουθο-ενδεχόμενο θα γίνει πραγματικότητα. Άρα προκύπτει ότι ο αποφασίζων για να «αξιολογήσει» το κάθε ενδεχόμενο χρησιμοποιεί την συνάρτηση χρησιμότητας επί των τελικών ενδεχομένων. Από τα παραπάνω συνεπάγεται ότι τα ενδεχόμενα που έχουν την ίδια χρησιμότητα είναι για τον αποφασίζοντα πλήρως «υποκατάστατα» και ο αποφασίζων είναι πλήρως αδιάφορος μεταξύ αυτών.

Σύμφωνα με την θεωρία προτιμήσεων και συναρτήσεων χρησιμότητας σε βέβαιο περιβάλλον, οι καμπύλες αδιαφορίας μεταξύ πλήρως υποκατάστατων προϊόντων είναι γραμμικές. Στην συνέχεια θα αναφέρουμε το θεώρημα που δηλώνει την γραμμικότητα της  $U(x)$  ως προς τις πιθανότητες η οποία προέρχεται από το αξίωμα της ανεξαρτησίας που ισχύει για τις σχέσεις προτιμήσεων. Πρώτα όμως ορίζουμε την αναπαράσταση της αναμενόμενης χρησιμότητας.

Ορισμός 6-5 Ορισμός αναπαράστασης αναμενόμενης χρησιμότητας. Η συνάρτηση χρησιμότητας  $U: \mathcal{L} \rightarrow \mathbb{R}$  έχει την μορφή αναμενόμενης χρησιμότητας αν υπάρχουν αριθμοί  $(u_1, \dots, u_N)$  στα  $N$  τελικά ενδεχόμενα-επακόλουθα τέτοια ώστε για κάθε απλή λοταρία  $L = (p_1, \dots, p_N) \in \mathcal{L}$  ισχύει

$$U(L) = u_1 p_1 + \dots + u_N p_N$$

Μια συνάρτηση χρησιμότητας  $U: \mathcal{L} \rightarrow \mathbb{R}$  η οποία έχει την μορφή της αναμενόμενης χρησιμότητας λέγεται von Neumann-Morgenstern (v.N-M) αναμενόμενη συνάρτηση χρησιμότητας.

Πρόταση 6-1 Μια συνάρτηση χρησιμότητας  $U: \mathcal{L} \rightarrow \mathbb{R}$  είναι της μορφής της αναμενόμενης χρησιμότητας αν και μόνο αν είναι γραμμική

Η απόδειξη για την παραπάνω πρόταση μπορεί να βρεθεί στον (Mas-Colell, Whinston, & Green, 1995). Πρέπει να αναφέρουμε ακόμα ότι η μέτρηση της συνάρτησης χρησιμότητας επί των ενεργειών του αποφασίζοντα  $U(x)$  γίνεται ποσοτικά (cardinal utility function) και η μορφή της αναμενόμενης χρησιμότητας διατηρείται μόνο με γραμμικούς μετασχηματισμούς ώστε να συνεχίζουν να ισχύουν τα προαναφερθέντα αξιώματα.

Στην συνέχεια αναφέρουμε το θεώρημα της αναμενόμενης χρησιμότητας (Mas-Colell, Whinston, & Green, 1995) από το οποίο προκύπτει η γραμμικότητα της  $U(x)$ .

Θεώρημα 6-1 Υποθέτουμε ότι η σχέση προτιμήσεων  $\succeq$  στον χώρο των λοταριών  $\mathcal{L}$  είναι ορθολογική και ικανοποιεί τα αξιώματα της συνέχειας και της ανεξαρτησίας. Τότε η σχέση  $\succeq$  μπορεί να αναπαρασταθεί από συνάρτηση χρησιμότητας που είναι της μορφής αναμενόμενης χρησιμότητας. Αυτό σημαίνει ότι μπορούμε να αναθέσουμε νούμερα  $u_n$  σε κάθε επακόλουθο-ενδεχόμενον  $n = 1, \dots, N$  με τέτοιο τρόπο ώστε για δύο λοταρίες  $L = (p_1, \dots, p_N)$  και  $L' = (p'_1, \dots, p'_N)$  να ισχύει

$$L \succeq L' \text{ εάν και μόνο εάν } \sum_{n=1}^N u_n p_n \geq \sum_{n=1}^N u_n p'_n$$

Η απόδειξη του παραπάνω θεωρήματος μπορεί να βρεθεί στον (Mas-Colell, Whinston, & Green, 1995).

Το παραπάνω θεώρημα είναι πολύ σημαντικό μιας και μας δίνει την μορφή των συναρτήσεων που εκφράζουν την χρησιμότητα των ενεργειών του αποφασίζοντα.

### 6.2.1 Συνάρτηση χρησιμότητας επί των ενδεχομένων

Στην συνέχεια θα αναφερθούμε στην μορφή της συνάρτησης χρησιμότητας των διαφόρων ενδεχομένων  $c$ ,  $u(c)$ . Η συνάρτηση χρησιμότητας των ενδεχομένων  $u(c)$  πρέπει να μπορεί να ποσοτικοποιήσει την χρησιμότητα και όχι απλά να διατάσσει τα διάφορα ενδεχόμενα. Σε βέβαιο περιβάλλον, η απόφαση σχετικά με την επιλογή μιας ενέργειας είναι ισοδύναμη με την απόφαση επιλογής του ενδεχομένου-επακόλουθου της ενέργειας. Οπότε αν ο αποφασίζων μπορεί να διατάξει τα επακόλουθα-ενδεχόμενα αυτό σημαίνει ότι ήδη έχει εκφράσει τις προτιμήσεις του σχετικά με τις διαθέσιμες ενέργειες. Αντιθέτως σε καθεστώς αβέβαιου περιβάλλοντος δεν είναι προφανές ότι η διάταξη των επακόλουθων-ενδεχομένων οδηγεί σε διάταξη των διαθέσιμων ενεργειών αφού η κάθε ενέργεια συνεπάγεται ένα πιθανοτικό μείγμα ενδεχομένων.

Στην συνέχεια θα αναφερθούμε στην δυνατότητα αυτή η συνάρτηση χρησιμότητας επί των ενδεχομένων να είναι διαφορετική ανάλογα με την κατάσταση της φύσης. Αρχικά ορίζουμε την επεκτεταμένη μορφή της αναμενόμενης χρησιμότητας

Ορισμός 6-6 Η σχέση προτίμησης  $\succeq$  έχει την μορφή της επεκτεταμένης αναμενόμενης χρησιμότητας αν για κάθε  $s \in S$ , υπάρχει συνάρτηση  $u_s: \mathbb{R}_+ \rightarrow \mathbb{R}$  τέτοια ώστε για κάθε  $(x_1, \dots, x_S) \in \mathbb{R}_+^S$  και  $(x'_1, \dots, x'_S) \in \mathbb{R}_+^S$  ισχύει  $(x_1, \dots, x_S) \succeq (x'_1, \dots, x'_S)$  αν και μόνο αν  $\sum_s \pi_s u_s(x_s) \geq \sum_s \pi_s u_s(x'_s)$

Σύμφωνα με το Θεώρημα 6-1, προκύπτει ότι η συνάρτηση χρησιμότητας επί των ενδεχομένων είναι η ίδια για όλες τις καταστάσεις της φύσης, δηλαδή είναι ανεξάρτητη της φύσης, Με την γενίκευση που προκύπτει από τον Ορισμός 6-6, η συνάρτηση χρησιμότητας  $u(c)$  μπορεί να είναι διαφορετική ανάλογα με την κατάσταση της φύσης  $u_s(c) \forall s \in [1, \dots, S]$ . Στην συνέχεια θα αναφερθούμε στις αναγκαίες συνθήκες (Mas-Colell, Whinston, & Green, 1995) ώστε να είναι δυνατή η παραπάνω αναπαράσταση.

Αρχικά επεκτείνουμε τον χώρο στον οποίο ορίζονται οι προτιμήσεις. Έτσι, θεωρούμε ότι σε κάθε ενδεχόμενο της φύσης το αποτέλεσμα επί του οποίου κρίνεται το ενδεχόμενο δεν είναι ένα και μοναδικό αλλά είναι ένα τυχαίο μέγεθος με πιθανοτική κατανομή  $F_s(\cdot)$ . Στην συνέχεια συμβολίζουμε τα διάφορα ενδεχόμενα ως  $L = (F_1, \dots, F_S)$ . Από τα παραπάνω προκύπτει ότι το  $L$  έχει την μορφή σύνθετης λοταρίας κατά την οποία αντιστοιχίζεται ένα τυχαίο ενδεχόμενο σε κάθε κατάσταση της φύσης. Ορίζουμε ως  $\mathcal{L}$  το σύνολο όλων των λοταριών αυτής της μορφής. Ορίζουμε την επέκταση του Ορισμός 6-4 στον χώρο των σύνθετων λοταριών

Ορισμός 6-7 Επεκτεταμένο αξίωμα ανεξαρτησίας. Η σχέση προτίμησης  $\succeq$  στον χώρο  $\mathcal{L}$  ικανοποιεί το επεκτεταμένο αξίωμα ανεξαρτησίας αν για όλα τα  $L, L', L'' \in \mathcal{L}$  και  $\alpha \in (0,1)$  αν  $L \succeq L'$  αν και μόνο αν  $\alpha L + (1 - \alpha)L'' \succeq \alpha L' + (1 - \alpha)L''$

Το αξίωμα της συνέχειας ορίζεται όπως Ορισμός 6-3. Με βάση τα προαναφερθέντα αξιώματα προκύπτει το παρακάτω θεώρημα (Mas-Colell, Whinston, & Green, 1995)

Θεώρημα 6-2 Επεκτεταμένο θεώρημα αναμενόμενης χρησιμότητας. Υποθέτοντας ότι η σχέση προτιμήσεων  $\succeq$  στον χώρο των λοταριών  $\mathcal{L}$  όπως έχει οριστεί παραπάνω ικανοποιεί τα αξιώματα συνέχειας και ανεξαρτησίας, προκύπτει ότι μπορούμε να αναθέσουμε συναρτήσεις χρησιμότητας  $u_s(\cdot)$  για κάθε κατάσταση  $s$  τέτοια ώστε για κάθε  $L = (F_1, \dots, F_S)$  και  $L' = (F'_1, \dots, F'_S)$  να ισχύει

$$L \succeq L' \text{ αν και μόνο αν } \sum_s \left( \int u_s(x_s) dF_s(x_s) \right) \geq \sum_s \left( \int u_s(x_s) dF'_s(x_s) \right)$$

Από το Θεώρημα 6-2 προκύπτει ότι όταν ικανοποιούνται τα αξιώματα ανεξαρτησίας και συνέχειας στον χώρο των σύνθετων λοταριών επιπλέον των αξιωμάτων πληρότητας, μεταβατικότητας και ανακλαστικότητας τότε είναι δυνατό η συνάρτηση χρησιμότητας να διαφέρει ανάλογα με την κατάσταση της φύσης και ταυτόχρονα να διατηρούνται οι σχέσεις προτιμήσεων που εκφράζουν τον αποφασίζοντα.

Από τα παραπάνω προκύπτει ότι ενώ η συνάρτηση χρησιμότητας μπορεί να διαφέρει στις διαφορετικές καταστάσεις της φύσης, δεν μπορεί όμως να είναι διαφορετική για την ίδια κατάσταση της φύσης και για κάθε ενέργεια του αποφασίζοντα. Δηλαδή δεν γίνεται να αξιολογήσουμε με διαφορετική συνάρτηση χρησιμότητας την ίδια κατάσταση της φύσης αν αυτή έχει προκύψει από διαφορετικό συνδυασμό ενεργειών του αποφασίζοντα. Το παραπάνω δεν μπορεί να γίνει αφού θα παραβίαζε το αξίωμα της ανεξαρτησίας. Ο αποφασίζων με δεδομένο ότι καταλήγει με την άρση της αβεβαιότητας στο ίδιο αποτέλεσμα και λαμβάνοντας υπόψιν το αξίωμα της ανεξαρτησίας πρέπει αναθέσει την ίδια χρησιμότητα.

Στην παρούσα διατριβή, τα διάφορα ενδεχόμενα που προκύπτουν από τις ενέργειες του χρήστη και τις καταστάσεις της φύσης αποτιμώνται σε χρηματικούς όρους αφού υπό αξιολόγηση είναι τα κέρδη της επιχείρησης. Παρότι στην γενικότητα ο αποφασίζων μπορεί να εκδηλώνει διαφορετικές προτιμήσεις ανάλογα με την κατάσταση της φύσης, υποθέτουμε ότι η συνάρτηση χρησιμότητας που προσομοιώνει τις προτιμήσεις του αποφασίζοντα είναι η ίδια σε όλες τις καταστάσεις της φύσης.

Η επιλογή της ίδιας συνάρτησης χρησιμότητας σε όλες τις δυνατές καταστάσεις της φύσης δηλώνει μια συγκεκριμένη συμπεριφορά. Ο αποφασίζων θα επιλέξει τις επενδύσεις που έχουν την μικρότερη μεταβλητότητα στα αποτελέσματά τους σε σχέση με την κατάσταση της φύσης. Αρχικά, η συνάρτηση χρησιμότητας επί των αποτελεσμάτων  $v(c)$  υποθέτουμε ότι είναι κοίλη αφού προσομοιώνει συμπεριφορά αποστροφής προς τον κίνδυνο με  $v'(c) > 0$  και  $\succ (φθίνουσα)$  και εφαρμόζεται επί των χρηματικών αποτελεσμάτων των διαφόρων καταστάσεων της φύσης. Στην συνέχεια υποθέτουμε ότι ο αποφασίζων αντιμετωπίζει την επιλογή μεταξύ δύο λοταριών  $L = (c_1, c_2; \pi_1, \pi_2)$  και  $L' = (c'_1, c'_2; \pi_1, \pi_2)$  με ίδια μέση τιμή  $E[L] = \pi_1 c_1 + \pi_2 c_2 = \pi_1 c'_1 + \pi_2 c'_2 = E[L']$ . Η χρησιμότητα που προκύπτει για κάθε λοταρία με βάση το Θεώρημα 6-1 προκύπτει  $U(L) = \pi_1 v(c_1) + \pi_2 v(c_2)$  και  $U(L') = \pi_1 v(c'_1) + \pi_2 v(c'_2)$ . Με δεδομένη την κυρτότητα της  $v(\cdot)$  προκύπτει ότι ο αποφασίζων θα επιλέξει την λοταρία της οποίας τα αποτελέσματα έχουν την μικρότερη διακύμανση. Στην περίπτωση

όμως που η συνάρτηση χρησιμότητας  $u(c)$  είναι διαφορετική ανάλογα με την κατάσταση της φύσης, ο αποφασίζων μπορεί σαν βέλτιστη επένδυση να επιλέξει αυτή που δεν έχει την ελάχιστη μεταβλητότητα στα αποτελέσματά της για τα διάφορα ενδεχόμενα της φύσης.

### 6.3 Αποστροφή κινδύνου

Υπάρχουν διάφορες συμπεριφορές για την αντιμετώπιση του κινδύνου. Ο αποφασίζων μπορεί να είναι επιρρεπής, ουδέτερος ή να αποστρέφεται τον κίνδυνο. Στην περίπτωση του επιρρεπή προς τον κίνδυνο αποφασίζοντα, οι επιλογές του σχετικά με τις επενδύσεις συντείνουν στην αύξηση του πλούτου-κέρδους του με παράλληλη αύξηση του ρίσκου που αναλαμβάνει. Όταν ο αποφασίζων είναι ουδέτερος προς τον κίνδυνο τότε επιδιώκει με τις αποφάσεις του την μεγιστοποίηση του κέρδους του ανεξαρτήτως του κινδύνου που αναλαμβάνει. Στην περίπτωση που ο αποφασίζων αποστρέφεται τον κίνδυνο, τότε με τις επιλογές προσπαθεί να μειώσει την μεταβλητότητα των αποτελεσμάτων των ενεργειών του στις διάφορες καταστάσεις της φύσης.

Στην παρούσα διατριβή, όπως έχει ήδη αναφερθεί, μελετάμε την βέλτιστη ανάπτυξη συστήματος προσομοίωσης του ηλεκτρικού τομέα. Με δεδομένο ότι οι επιλογές κάθε επιχείρησης σχετίζονται με επενδύσεις και το αποτέλεσμα των ενεργειών αποτιμάται σε χρηματικούς όρους αφού είναι το κέρδος της επιχείρησης στις διάφορες καταστάσεις της φύσης, υποθέτουμε ότι η επιχείρηση λειτουργεί αποστρεφόμενη τον κίνδυνο, αφού θεωρούμε ότι προσπαθεί εκτός της μεγιστοποίησης των κερδών και την ελαχιστοποίηση της μεταβλητότητάς του.

Σε αυτό το υποκεφάλαιο θα αναφερθούμε στην έννοια της αποστροφής προς τον κίνδυνο και στις ιδιότητες που αυτή συνεπάγεται σχετικά με την συνάρτηση χρησιμότητας. Στο παρόν υποκεφάλαιο, υποθέτουμε ότι το αποτέλεσμα της λοταρίας είναι συνεχές, κάτι που συνεπάγεται ότι μπορούμε να περιγράψουμε το αποτέλεσμα με την χρήση αθροιστικής πιθανοτικής συνάρτησης  $F: \mathbb{R} \rightarrow [0,1]$ . Αυτό σημαίνει ότι για κάθε  $x$ ,  $F(x)$  είναι η πιθανότητα το τελικό αποτέλεσμα της λοταρίας να είναι μικρότερο ή ίσο του  $x$ . Εξαιτίας του αξιώματος της ανεξαρτησίας, του οποίου υποθέτουμε την ισχύ προκύπτει ότι η αθροιστική συνάρτηση πιθανότητας  $F(\cdot)$  μιας σύνθετης λοταρίας  $(L_1, \dots, L_K; \alpha_1, \dots, \alpha_K)$  είναι το σταθμισμένο άθροισμα των αθροιστικών πιθανοτικών κατανομών της κάθε απλής λοταρίας  $F(x) = \sum_k \alpha_k F_k(x)$  όπου  $F_k(\cdot)$  είναι η αθροιστική συνάρτηση πιθανότητας της απλής λοταρίας  $L_k$ . Για την εφαρμογή του Θεώρημα 6-1, χρειάζεται να ορίσουμε την συνάρτηση χρησιμότητας επί των ενδεχομένων αποτελεσμάτων  $u(c)$ , για την οποία ισχύουν οι περιορισμοί και οι ιδιότητες που έχουμε ήδη αναφέρει και την συνάρτηση χρησιμότητας επί των ενεργειών  $U(\cdot)$  η οποία στην

περίπτωση που ενέργειες του αποφασίζοντα είναι συνεχείς ορίζεται ως  $U(F) = \int v(c)dF(c)$ .

Αρχικά θα δώσουμε τον ορισμό της συμπεριφοράς αποστροφής προς τον κίνδυνο

Ορισμός 6-8 (Mas-Colell, Whinston, & Green, 1995). Συμπεριφορά αποστροφής προς τον κίνδυνο. Υποθέτουμε ότι ο αποφασίζων προσομοιώνεται όσον αφορά τις ενέργειές του από την μεγιστοποίηση της αναμενόμενης χρησιμότητας. Αυτός εκδηλώνει συμπεριφορά αποστροφής προς τον κίνδυνο όταν η συνάρτηση χρησιμότητας επί των ενδεχομένων  $v(c)$  είναι κοίλη.

Από τον Ορισμός 6-8 προκύπτει ότι  $v\left(\frac{x_1+x_2}{2}\right) \geq \frac{v(x_1)+v(x_2)}{2}$ . Αυτό σημαίνει ότι ο αποφασίζων προτιμά το βέβαιο ενδεχόμενο να κερδίσει  $\frac{x_1+x_2}{2}$  από την λοταρία η οποία δίνει  $x_1$  με πιθανότητα 0.5 και  $x_2$  με πιθανότητα 0.5.

Σε αυτό το υποκεφάλαιο αναπτύξαμε την θεωρία σχετικά με την συμπεριφορά του αποφασίζοντα προς τον κίνδυνο μελετώντας την συνάρτηση χρησιμότητας  $v(\cdot)$ . Στο επόμενο υποκεφάλαιο αναπτύσσουμε την θεωρία σχετικά με την σύγκριση των πιθανοτικών ενδεχομένων που προκύπτουν από τις διάφορες ενέργειες του αποφασίζοντα.

#### 6.4 Μετρικές εκτίμησης συμπεριφοράς αποφασίζοντα σε σχέση με τον κίνδυνο

Σε αυτή την ενότητα αρχικά παρουσιάζουμε μετρικές για την εκτίμηση της συμπεριφοράς που προσομοιώνεται με την συνάρτηση χρησιμότητας  $v(\cdot)$ .

Στην συνέχεια θα αναφέρουμε δύο διαφορετικές μετρικές σχετικές με την αξιολόγηση της αποστροφής προς τον κίνδυνο. Γίνεται η υπόθεση ότι η συνάρτηση χρησιμότητας επί των ενδεχομένων  $v(c)$  είναι η ίδια σε όλα τα δυνατά ενδεχόμενα της φύσης, ώστε να μπορούν να εξαχθούν συμπεράσματα σχετικά με την συμπεριφορά του αποφασίζοντα ανάλογα με το επίπεδο του οικονομικού του μεγέθους.

Η πρώτη μετρική αφορά τον συντελεστή μέτρησης της αποστροφής προς τον κίνδυνο σε ποσότητες (absolute risk aversion).

Ορισμός 6-9 Δεδομένης συνάρτησης χρησιμότητας επί των ενδεχομένων  $u(\cdot)$ , ο συντελεστής μέτρησης της αποστροφής προς τον κίνδυνο σε ποσότητες Arrow-Pratt ορίζεται ως  $r_A(c) = -u''(c)/u'(c)$ .



Με βάση την τιμή του παραπάνω δείκτη, μπορούμε να κατατάξουμε τις συναρτήσεις χρησιμότητας επί των ενδεχομένων  $v(\cdot)$  σε τρεις μεγάλες κατηγορίες. Όταν η  $r_A(c)$  είναι φθίνουσα καθώς αυξάνει το οικονομικό μέγεθος του αποφασίζοντα, τότε ο αποφασίζων που προσομοιώνεται εκδηλώνει αυξανόμενη αποστροφή προς τον κίνδυνο κατά τις ποσότητες (increasing absolute risk aversion-IARA). Όταν ο δείκτης  $r_A(c)$  είναι σταθερός τότε ο αποφασίζων εκδηλώνει σταθερή αποστροφή προς τον κίνδυνο κατά τις ποσότητες (constant absolute risk aversion-CARA). Όταν ο δείκτης  $r_A(c)$  είναι αύξων σε σχέση με το  $c$  τότε ο αποφασίζων εκδηλώνει μειούμενη αποστροφή προς τον κίνδυνο (decreasing absolute risk aversion-DARA)

Η δεύτερη μετρική αξιολογεί ενδεχόμενα των οποίων το αποτέλεσμα είναι ποσοστιαία κέρδη ή ζημιές επί της περιουσίας του αποφασίζοντα ή της αξίας της επιχείρησης.

Ορισμός 6-10 Δεδομένης συνάρτησης χρησιμότητας επί των ενδεχομένων  $u(\cdot)$ , ο συντελεστής της σχετικής αποστροφής προς τον κίνδυνο ορίζεται ως  $r_R(c) = -cu''(c)/u'(c)$ .

Όταν ο δείκτης  $r_B(c)$  είναι αύξων σε σχέση με το  $c$  (οικονομικό μέγεθος αποφασίζοντα), τότε ο αποφασίζων εκδηλώνει αυξανόμενη αποστροφή προς τον κίνδυνο ως ποσοστό του οικονομικού μεγέθους (increasing relative risk aversion-IRRA). Όταν ο δείκτης  $r_B(c)$  είναι σταθερός σε σχέση με το  $c$  τότε ο αποφασίζων εκδηλώνει σταθερή αποστροφή προς τον κίνδυνο ως ποσοστό του οικονομικού μεγέθους (constant relative risk aversion-CRRA) και όταν ο δείκτης  $r_B(c)$  είναι φθίνων σε σχέση με το  $c$  τότε ο αποφασίζων εκδηλώνει φθίνουσα αποστροφή προς τον κίνδυνο ως ποσοστό του οικονομικού του μεγέθους (decreasing relative risk aversion-DRRA)

## 6.5 Στοχαστική επικράτηση

Στην προηγούμενη ενότητα, εξαγάγαμε συμπεράσματα από την μορφή της συνάρτησης χρησιμότητας σε σχέση με την αποστροφή προς τον κίνδυνο του αποφασίζοντα ανάλογα με το οικονομικό του μέγεθος. Σε αυτή την ενότητα, θα δώσουμε μεθόδους σύγκρισης των πιθανοτικών κατανομών των χρηματικών αποδόσεων των διαφόρων ενδεχομένων για τις διάφορες ενέργειες του αποφασίζοντα. Θα τις συγκρίνουμε με βάση είτε την απόδοση στις διάφορες καταστάσεις είτε την μεταβλητότητα των αποδόσεών τους. Στην περίπτωση που μια πιθανοτική κατανομή αποδόσεων είναι καλύτερη (έχει μεγαλύτερη μέση τιμή) έναντι μιας άλλης τότε η πρώτη πιθανοτική απόδοση επικρατεί πιθανοτικά της δεύτερης κατά πρώτη τάξη. Ενώ στην περίπτωση που δύο πιθανοτικές κατανομές αποδόσεων έχουν την ίδια μέση τιμή ενώ η μία έχει μικρότερη μεταβλητότητα τότε λέμε ότι αυτή επικρατεί στοχαστικά της άλλης κατά δεύτερα τάξη.

Αρχικά υποθέτουμε δύο διαφορετικές αθροιστικές πιθανοτικές κατανομές αποδόσεων  $F(\cdot)$  και  $G(\cdot)$  και οι ορισμοί έχουν ως εξής

Ορισμός 6-11 Στοχαστική επικράτηση πρώτης τάξης. Η κατανομή των αποδόσεων της  $F(\cdot)$  επικρατεί στοχαστικά κατά πρώτη τάξη της κατανομής αποδόσεων  $G(\cdot)$  αν για κάθε μη φθίνουσα συνάρτηση  $u: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ , ισχύει

$$\int u(c)dF(c) \geq \int u(c)dG(c)$$

Άμεση συνέπεια του παραπάνω ορισμού είναι ότι αν για κάθε ενδεχόμενο  $c$  ισχύει ότι  $F(c) \leq G(c)$ , τότε η  $F(\cdot)$  επικρατεί στοχαστικά κατά πρώτη τάξη της  $G(\cdot)$ . Ενώ για την στοχαστική επικράτηση δευτέρας τάξης ισχύει

Ορισμός 6-12 Στοχαστική επικράτηση δευτέρας τάξης. Αν οι δύο αθροιστικές πιθανοτικές κατανομές  $F(\cdot)$  και  $G(\cdot)$  έχουν τον ίδιο μέσο, τότε η  $F(\cdot)$  επικρατεί στοχαστικά κατά δεύτερα τάξη της  $G(\cdot)$  αν για κάθε μη φθίνουσα κοίλη συνάρτηση  $u: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ , ισχύει ότι

$$\int u(c)dF(c) \geq \int u(c)dG(c)$$

Από τα παραπάνω προκύπτει ότι όταν μια πιθανοτική κατανομή αποδόσεων επικρατεί στοχαστικά κατά πρώτη τάξη μιας άλλης κατανομής τότε ο μέση τιμή των αποδόσεων της πρώτης είναι μεγαλύτερη από την ίδια μέση τιμή της δεύτερης. Το αντίθετο δεν ισχύει.

Στα επόμενα κεφάλαια αναπτύσσουμε στοχαστικά υποδείγματα βέλτιστης ανάπτυξης συστήματος ηλεκτροπαραγωγής και στην συνέχεια εξετάζουμε τα αποτελέσματα που προκύπτουν υπό το πρίσμα της θεωρίας του παρόντος κεφαλαίου.

## Κεφάλαιο 7

### 7 Αξιολόγηση της πιθανοτικής κατανομής της αντικειμενικής συνάρτησης με χρήση της μεθόδου αναμενόμενης τιμής της κατανομής (Expected Value)

---

#### 7.1 Εισαγωγή

Σε υπόδειγμα προσομοίωσης της ηλεκτρικής αγοράς όπου μελετάται ο μεσομακροχρόνιος βέλτιστος ενεργειακός σχεδιασμός της, οι αποφάσεις που λαμβάνονται αναφορικά με τις επενδύσεις και τη λειτουργία επηρεάζονται από τις τιμές των παραμέτρων του προβλήματος. Στο κεφάλαιο 4, αναπτύχθηκε αιτιοκρατικό υπόδειγμα παραγωγής και προσφοράς του ηλεκτρισμού στο οποίο όλες οι παράμετροι είναι γνωστές με βεβαιότητα για όλα τα μελλοντικά έτη τα οποία επιλύει το υπόδειγμα. Στην παρούσα ενότητα αντιθέτως οι τιμές ορισμένων παραμέτρων του υποδείγματος υποτίθενται στοχαστικές, όπου γνωστή είναι μόνο η πιθανοτική κατανομή των τιμών τους. Επιπλέον, σε περιβάλλον με αβεβαιότητα βασικό κριτήριο για τη λήψη απόφασης αποτελεί η συμπεριφορά του αποφασίζοντα απέναντι στον κίνδυνο.

Έχει παρατηρηθεί πως επιχειρήσεις που λειτουργούν σε αγορές ηλεκτρικής ενέργειας υπό καθεστώς μονοπωλίου ή ολιγοπωλίου παρουσιάζουν συμπεριφορές που είναι ουδέτερες ως προς τον κίνδυνο (risk neutral). Αυτό σημαίνει πως η επιχείρηση είναι αδιάφορη ως προς το ρίσκο που αναλαμβάνει προβαίνοντας στις επενδυτικές αποφάσεις που λαμβάνει. Στην περίπτωση αυτή οι επενδυτικές αποφάσεις λαμβάνονται με γνώμονα την μεγιστοποίηση της παρούσας αξίας του αναμενόμενου κέρδους ή οφέλους. Αντίστοιχες συμπεριφορές παρατηρούνται από επιχειρήσεις κρατικής ιδιοκτησίας και επιχειρήσεις που καλύπτονται από μακροχρόνια συμβόλαια με το κράτος ή με εγγύηση του δημοσίου.

Στην παρούσα ενότητα αναλύεται το πλήρες υπόδειγμα βέλτιστης ανάπτυξης συστήματος και λειτουργίας ηλεκτρικού συστήματος σε μακροχρόνιο ορίζοντα στο οποίο η επιχείρηση ακολουθεί συμπεριφορά που είναι ουδέτερη ως προς τον κίνδυνο, δηλαδή βελτιστοποιεί την αναμενόμενη τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης.

Οι τιμές των καυσίμων ( $\widetilde{fp}_{i,f,t}$ ), οι τιμές αγοράς δικαιωμάτων εκπομπών CO<sub>2</sub> ( $\widetilde{ETS}p_t$ ) και η παράμετρος  $\widetilde{\alpha}_{i,s,t}$  της αντίστροφης συνάρτησης ζήτησης του ηλεκτρισμού όπως έχει αναφερθεί στο υποκεφάλαιο 4.2.2 θεωρούνται ότι ακολουθούν πιθανοτικές κατανομές με γνωστή συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας. Όλες οι τιμές των υπόλοιπων παραμέτρων του προβλήματος θεωρούνται γνωστές με βεβαιότητα για όλα τα έτη. Δεδομένης της υπόθεσης πιθανοτικών μεγεθών, η αντικειμενική συνάρτηση του υποδείγματος όπως παρουσιάστηκε στο κεφάλαιο 4, είναι πιθανοτικό μέγεθος, τα χαρακτηριστικά της κατανομής του οποίου μπορούν να βρεθούν αναλυτικά.

Στη γενική περίπτωση, για διακριτή τυχαία μεταβλητή  $X$  με πιθανότητα  $p_i$  εμφάνισης της τιμής  $X_i$ , η αναμενόμενη τιμή της τυχαίας μεταβλητής  $X$  συμβολίζεται με  $\mathcal{E}(X)$  και δίνεται από την σχέση:

$$\mathcal{E}(X) = \sum_{i=1}^n p_i \cdot X_i \quad (7-1)$$

, ενώ αν η τυχαία μεταβλητή  $X$  είναι συνεχής με συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας  $f(x)$ , η αναμενόμενη τιμή της τυχαίας μεταβλητής  $X$  δίνεται από την σχέση:

$$\mathcal{E}(X) = \int_{-\infty}^{+\infty} xf(x)dx \quad (7-2)$$

Η ενσωμάτωση της αβεβαιότητας στο υπόδειγμα αναπαράστασης του ηλεκτρικού τομέα απαιτεί την θεώρηση συμπεριφοράς της επιχείρησης ως προς την αξιολόγηση του κινδύνου. Όταν οι επενδυτικές αποφάσεις λαμβάνονται με βάση την παρούσα αξία του αναμενόμενου κέρδους (σταθμισμένο με τις αντίστοιχες πιθανότητες), τότε ο αποφασίζων εκδηλώνει συμπεριφορά ουδετερότητας ως προς τον κίνδυνο (risk neutral).

Για την προσομοίωση των προτιμήσεων της επιχείρησης χρησιμοποιείται η μέθοδος της αναμενόμενης τιμής. Αναπτύσσουμε μαθηματικό υπόδειγμα στο οποίο ενσωματώνουμε την αβεβαιότητα με χρήση πιθανοτικής αντικειμενικής συνάρτησης και πιθανοτικών περιορισμών. Η αντικειμενική συνάρτηση του υποδείγματος διατυπώνει ως στόχο την μεγιστοποίηση του αναμενόμενου κέρδους της επιχείρησης.

Συγκεκριμένα, ως αναμενόμενη απόδοση (expected return) ορίζεται η απόδοση την οποία οι επενδυτές προσδοκούν να αποκομίσουν στο μέλλον από μία επένδυση. Η

αναμενόμενη απόδοση μιας επένδυσης είναι ο σταθμισμένος μέσος όρος των αναμενόμενων αποδόσεων της, σταθμισμένες με την αντίστοιχη πιθανότητα. Υπολογίζεται με τον ακόλουθο τύπο:

$$E(X) = \sum_{i=1}^n p_i \cdot X_i \quad (7-3)$$

Όπου:  $E(X)$  η αναμενόμενη απόδοση της επένδυσης

$n$  το πλήθος των πιθανών τιμών-καταστάσεων της πιθανοτικής παραμέτρου

$X_i$  η απόδοση της επένδυσης όταν έχει προκύψει η  $i$  κατάσταση της φύσης

$p_i$  η πιθανότητα εμφάνισης της τιμής  $i$  κατάστασης της φύσης

## 7.2 Ανάπτυξη του μαθηματικού υποδείγματος αναμενόμενης τιμής

Στη συνέχεια, αναπτύσσουμε το υπόδειγμα προσομοίωσης αγοράς που αναπαριστά ηλεκτρικό τομέα στον οποίο λειτουργεί επιχείρηση υπό καθεστώς τέλει ανταγωνισμού.

Τα πιθανοτικά μεγέθη του υποδείγματος είναι οι τιμές των καυσίμων ( $\widetilde{f}p_{i,f,t}$ ), οι τιμές των δικαιωμάτων εκπομπών CO2 ( $\widetilde{ETS}p_t$ ) και η παράμετρος  $\widetilde{a}_{i,s,t}$  της αντίστροφης συνάρτησης ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας.

Η αντικειμενική συνάρτηση μεγιστοποιεί την αναμενόμενη τιμή του κέρδους της επιχείρησης που λειτουργεί στην αγορά διαχρονικά δηλαδή για όλα τα έτη επίλυσης του υποδείγματος.

Η αντικειμενική συνάρτηση του υποδείγματος μπορεί να γραφεί στη μορφή:

$$\max E[P(x; d; \tilde{r})] \quad (7-4)$$

όπου:  $x$  οι άγνωστες μεταβλητές του προβλήματος

$\tilde{r}$  οι πιθανοτικές παράμετροι του προβλήματος που ακολουθούν γνωστές κατανομές με μέση τιμή  $\bar{r}$

$d$  οι παράμετροι των οποίων οι τιμές είναι γνωστές με βεβαιότητα

$\tilde{P}(x; d; \tilde{r})$  συνάρτηση που αναπαριστά την αντικειμενική συνάρτηση του αιτιοκρατικού υποδείγματος ως στοχαστική μεταβλητή

$P(x; \mathbf{d}; \bar{r})$  η μέση τιμή της συνάρτησης  $\tilde{P}(x; \mathbf{d}; \tilde{r})$ , δηλαδή η μέση τιμή της πιθανοτικής κατανομής του συνολικού κέρδους της επιχείρησης που λειτουργεί στην αγορά

Στο υπόδειγμα του παρόντος κεφαλαίου η αντικειμενική συνάρτηση αναπτύσσεται θεωρώντας ότι οι στοχαστικές παράμετροι ακολουθούν κανονικές κατανομές με δεδομένες μέσες τιμές, διακυμάνσεις και συσχετίσεις μεταξύ τους. Οι παράμετροι αυτοί παρουσιάζουν συσχέτιση μεταξύ τους αλλά θεωρούνται ανεξάρτητες μεταξύ διαφορετικών ετών. Πιο συγκεκριμένα, το συνολικό κέρδος ( $\tilde{P}$ ) ως πιθανοτικό μέγεθος υπολογίζεται από τον τύπο **(7-5)**:

$$\tilde{P} = \sum_{t=1}^T e^{-\delta_t \cdot t} \cdot \left\{ \sum_i \left[ \begin{aligned} & (\tilde{\alpha}_{i,s,t} - \beta_{i,s,t} \cdot D_{i,s,t}) \cdot D_{i,s,t} && \text{(έσοδα)} \\ & - \sum_f \tilde{f} p_{i,f,t}(F_{i,f,t}) \cdot F_{i,f,t} \\ & - \sum_n \sum_{\tau \leq t} \sum_s v c_{i,n,\tau,t}(G_{i,n,\tau,s,t}) \cdot G_{i,n,\tau,s,t} \\ & - \sum_n \sum_{\tau \leq t} f c_{i,n,\tau,t}(K_{i,n,\tau,t}) \cdot K_{i,n,\tau,t} \\ & - \sum_n (\sum_{\tau \leq t} n i_{i,n,\tau,t}(\rho_{i,n,\tau}) \cdot i c p_{i,n,\tau}(\sum_{\tau \leq t} I_{i,n,\tau,\tau}) \cdot I_{i,n,\tau}) && \text{(-κόστος)} \\ & - \sum_n (\sum_{\tau \leq t} n e_{i,n,\tau,t}(\rho_{i,n,\tau}) \cdot i c e_{i,n,\tau}(\sum_{\tau \leq t} E I_{i,n,\tau,\tau}) \cdot E I_{i,n,\tau}) \\ & - c e_{i,t}(\sum_{\tau \leq t} E S_{i,\tau}) \cdot E S_{i,t} \\ & - \overline{E T S} p_t \cdot E M_{i,t} \\ & - \sum_{\tau \leq t} n p x_{i,\tau,t}(\rho_{i,\tau}) \cdot P C X_{i,\tau,t} \end{aligned} \right. \right. \quad \left. \left. \right] - \sum_k \sum_s h r s_s \cdot F L_{k,s,t} \cdot g c u_{k,t} \right\} \quad (7-5)$$

Για την επίλυση του προβλήματος, έγινε δειγματοληψία των κανονικών κατανομών των στοχαστικών παραμέτρων του προβλήματος θεωρώντας τα μεγέθη συσχετισμένα σύμφωνα με πίνακα διακύμανσης – συν διακύμανσης. Τα δείγματα υπολογίζονται όπως αναλύθηκε στο κεφάλαιο 3.3.

Η αντικειμενική συνάρτηση της κάθε επιχείρησης που λειτουργεί στην αγορά είναι όπως η **(7-4)** που περιλαμβάνει την μέση τιμή του κέρδους της επιχείρησης

$$MAX \sum_{sm} \left\{ \sum_{t=1}^T e^{-\delta_t \cdot t} \cdot \left\{ \sum_i \left[ (\alpha_{sm,i,s,t} - \beta_{i,s,t} \cdot D_{i,s,t}) \cdot D_{i,s,t} \right. \right. \right. \quad (7-6)$$



επιλύεται με τη μέθοδο του ακέραιου προγραμματισμού. Συνεπώς το πρόβλημα επιλύεται με τη μέθοδο του ακέραιου προγραμματισμού.

### 7.3 Ισοδυναμία στοχαστικής βελτιστοποίησης με χρήση μέσης τιμής με αντίστοιχο αιτιοκρατικό

Σε αυτό το υποκεφάλαιο θα αναπτύξουμε την ισοδυναμία της στοχαστικής βελτιστοποίησης με χρήση της αναμενόμενης τιμής με αντίστοιχο αιτιοκρατικό υπόδειγμα. Στην βιβλιογραφία είναι αρκετά διαδεδομένη η θεώρηση ότι κάποια από τις άγνωστες παραμέτρους του προβλήματος ακολουθεί πιθανοτική κατανομή και σε συνδυασμό με χρήση της αναμενόμενης τιμής προκύπτει πρόβλημα στοχαστικής βελτιστοποίησης.

Αρχικά, ο (Theil, 1983) απέδειξε το παρακάτω θεώρημα. Θεωρούμε το πρόβλημα

$$\begin{aligned} \text{Max}_{x,y} \mathcal{E} \left[ A(x) + \sum_{i=1}^m A_i(x)y_i + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m A_{ij}y_iy_j \right] \\ \text{s. t. } y = g(x) + e \end{aligned} \quad (7-8)$$

Όπου  $e$  είναι εξωγενείς παράμετροι του προβλήματος  $m$  διαστάσεων που ακολουθούν πιθανοτική κατανομή με μηδενική μέση τιμή.

Θεώρημα 7-1. Αν υπάρχει λύση στο πρόβλημα (7-8) τότε η λύση αυτού του προβλήματος είναι ίδια με του παρακάτω προβλήματος

$$\begin{aligned} \text{Max}_{x,y} \mathcal{E} \left[ A(x) + \sum_{i=1}^m A_i(x)y_i + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m A_{ij}y_iy_j \right] \\ \text{s. t. } y = g(x) \end{aligned} \quad (7-9)$$

όπου οι παράμετροι που ακολουθούν πιθανοτική κατανομή έχουν αντικατασταθεί από την μέση τιμή τους.

Το παραπάνω θεώρημα έχει επεκταθεί από τον ίδιο και για πρόβλημα πολλών περιόδων. Στην συνέχεια γενικεύουμε την έννοια της ισοδυναμίας με αιτιοκρατικό υπόδειγμα. Θεωρούμε το υπόδειγμα (Laffont, 1989)



$$\begin{aligned} & \text{Max}_x \int_{\mathcal{R}^P} u(x, g(x, e), e) f(e, x) de \\ & \text{s. t. } y = g(x, e) \quad x \in \mathcal{R}^n, y \in \mathcal{R}^m \end{aligned} \quad (7-10)$$

όπου το διάνυσμα  $e$  των παραμέτρων που ακολουθούν πιθανοτική κατανομή και  $f(e, x)$  η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας με  $E[e] = 0$ .

Το πρόβλημα (7-10) αποδεικνύεται ότι είναι ισοδύναμο με το αντίστοιχο αιτιοκρατικό

$$\begin{aligned} & \text{Max}_x u(x, g(x, 0), 0) \\ & \text{s. t. } y = g(x, 0) \quad x \in \mathcal{R}^n, y \in \mathcal{R}^m \end{aligned} \quad (7-11)$$

όπου οι τυχαίες παράμετροι έχουν αντικατασταθεί από την μέση τιμή τους. Στην δίνουμε το θεώρημα που δείχνει την ισοδυναμία

Θεώρημα 7-2 (Laffont, 1989). Αν η  $u(x, y, e)$  και η  $g(x, e)$  είναι διπλά παραγωγίσιμες, αν η  $f(e, x)$  είναι διπλά παραγωγίσιμη ως προς  $x$  και αν υπάρχει μοναδική λύση στο πρόβλημα (7-11) τότε το πρόβλημα (7-10) είναι ισοδύναμο με το αιτιοκρατικό πρόβλημα (7-11) κατά πρώτη τάξη αν ο πίνακας Hessian της συνάρτησης  $u(x, g(x, 0), 0)$  δεν είναι ιδιόμορφος

Το παραπάνω θεώρημα επεκτείνεται και σε υποδείγματα πολλών περιόδων

Σύμφωνα με το παρόν υποκεφάλαιο, προκύπτει ότι η αντικειμενική συνάρτηση (7-6) γράφεται με αντικατάσταση των πιθανοτικών μεγεθών από την μέση τιμή τους ως

$$\begin{aligned} & \text{MAX} \left\{ \sum_{t=1}^T e^{-\delta_t \cdot t} \cdot \left\{ \sum_i \left[ (\bar{\alpha}_{i,s,t} - \beta_{i,s,t} \cdot D_{i,s,t}) \cdot D_{i,s,t} \right. \right. \right. \\ & - \sum_f \bar{f} p_{i,f,t}(F_{i,f,t}) \cdot F_{i,f,t} \\ & - \sum_n \sum_{\tau \leq t} \sum_s v c_{i,n,\tau,t}(G_{i,n,\tau,s,t}) \cdot G_{i,n,\tau,s,t} \\ & - \sum_n \sum_{\tau \leq t} f c_{i,n,\tau,t}(K_{i,n,\tau,t}) \cdot K_{i,n,\tau,t} \\ & - \sum_n (\sum_{\tau \leq t} n i_{i,n,\tau,t}(\rho_{i,n,\tau}) \cdot i c p_{i,n,\tau}(\sum_{\tau \leq t} I_{i,n,\tau,\tau}) \cdot I_{i,n,\tau}) \\ & - \sum_n (\sum_{\tau \leq t} n e_{i,n,\tau,t}(\rho_{i,n,\tau}) \cdot i c e_{i,n,\tau}(\sum_{\tau \leq t} E I_{i,n,\tau,\tau}) \cdot E I_{i,n,\tau}) \\ & - c e_{i,t}(\sum_{\tau \leq t} E S_{i,\tau}) \cdot E S_{i,t} \\ & - \bar{E T S} p_t \cdot E M_{i,t} \\ & \left. \left. \left. - \sum_{\tau \leq t} n p x_{i,\tau,t}(\rho \rho_{i,\tau}) \cdot P C X_{i,\tau,t} \right] - \sum_k \sum_s h r s_s \cdot F L_{k,s,t} \cdot g c u_{k,t} \right\} \right\} \end{aligned} \quad (7-12)$$

#### 7.4 Αγορά υπό καθεστώς ατελούς ανταγωνισμού

Όπως έχει αναπτυχθεί στο υποκεφάλαιο 7.3 η βελτιστοποίηση της αναμενόμενης τιμής της πιθανοτικής κατανομής της αντικειμενικής συνάρτησης είναι ισοδύναμη με την βελτιστοποίηση της αντικειμενικής συνάρτησης όπου οι πιθανοτικές εξωγενείς παράμετροι έχουν αντικατασταθεί από την μέση τιμή τους. Αυτή η ισοδυναμία συνεχίζει να ισχύει όταν η αγορά λειτουργεί υπό καθεστώς ατελούς ανταγωνισμού και συγκεκριμένα όταν οι επιχειρήσεις ανταγωνίζονται κατά Nash-Cournot. Έτσι η βέλτιστη λύση του προβλήματος μιας επιχείρησης που συμμετέχει σε αγορά στην οποία οι παίκτες ανταγωνίζονται κατά Nash-Cournot είναι ισοδύναμη με το πρόβλημα όπως αναπτύχθηκε στο υποκεφάλαιο 4.4.

## Κεφάλαιο 8

### 8 Αξιολόγηση της πιθανοτικής κατανομής της αντικειμενικής συνάρτησης με χρήση της προσέγγισης του Markowitz

---

#### 8.1 Εισαγωγή

Η επιχείρηση που λειτουργεί σε αγορά ηλεκτρικής ενέργειας λαμβάνει αποφάσεις σε περιβάλλον με αβεβαιότητα (έλλειψη πληροφορίας), οι οποίες περιλαμβάνουν τις επενδύσεις που θα πραγματοποιήσει είτε αυτές αναφέρονται σε κατασκευή νέων μονάδων είτε σε επέκταση ήδη υπαρχόντων, καθώς και αποφάσεις που αφορούν τη λειτουργία των διαθέσιμων μονάδων της. Οι αποφάσεις αυτές εξαρτώνται από την συμπεριφορά της απέναντι στον κίνδυνο. Για μια επιχείρηση ηλεκτροπαραγωγής που λειτουργεί σε αγορά υπό καθεστώς ανταγωνισμού κύριος στόχος δεν αποτελεί μόνο η μεγιστοποίηση του αναμενόμενου οφέλους αλλά και η αποφυγή του συχνά μεγάλου κινδύνου ανεπανόρθωτης ζημίας της επιχείρησης λόγω τυχόν οικονομικά αποτυχημένων επενδυτικών αποφάσεων.

Με άλλα λόγια, στόχος της επιχείρησης είναι να μεγιστοποιήσει το κέρδος της με τον ελάχιστο δυνατό κίνδυνο. Για την προσομοίωση της συμπεριφοράς αυτής αναπτύσσεται υπόδειγμα το οποίο αποτελεί επέκταση του υποδείγματος όπως παρουσιάστηκε στο κεφάλαιο 4 ώστε να περιλαμβάνει πιθανοτικά μεγέθη, και συνεπώς πιθανοτική αντικειμενική συνάρτηση, η αξιολόγηση της οποίας γίνεται με χρήση της προσέγγισης του Markowitz, δηλαδή του κέρδους της επιχείρησης. Στην παρούσα ενότητα θεωρείται ότι η επιχείρηση δραστηριοποιείται στην αγορά υπό καθεστώς τέλει ανταγωνισμού.

Οι διάφορες τιμές των πιθανοτικών μεγεθών σε συνδυασμό με τις ενέργειες της επιχείρησης, δηλαδή τις επενδύσεις που θα πραγματοποιήσει οδηγούν σε πλήθος

επακόλουθων, δηλαδή το κέρδος της επιχείρησης. Οι πιθανότητες εμφάνισης των ενδεχομένων είναι αντικειμενικά γνωστές.

Κατά την αξιολόγηση του κινδύνου με χρήση της προσέγγισης του Markowitz η επιχείρηση επιδιώκει να μεγιστοποιήσει το κέρδος της μειώνοντας παράλληλα τον κίνδυνο. Για μικρές αλλαγές στις πιθανότητες δεν αλλάζουν οι επενδύσεις που θα πραγματοποιήσει η επιχείρηση, δηλαδή η σχέση προτίμησης αυτή ικανοποιεί το αξίωμα της συνέχειας και το αξίωμα της ανεξαρτησίας, συνεπώς έχει τη μορφή της επεκτεταμένης αναμενόμενης χρησιμότητας και μπορούμε να αναθέσουμε σε αυτήν συναρτήσεις χρησιμότητας που προσομοιώνουν τις προτιμήσεις της επί των ενδεχομένων. Στην παρούσα διατριβή, υποθέτουμε ότι σε όλα τα δυνατά ενδεχόμενα η συνάρτηση χρησιμότητας επί των ενδεχομένων  $u(\cdot)$  είναι η ίδια. Η συνάρτηση αυτή είναι κοίλη καθώς προσομοιώνει συμπεριφορά αποστροφής προς τον κίνδυνο με  $u'(\cdot) > 0$  και εφαρμόζεται επί του οικονομικού αποτελέσματος των διαφόρων καταστάσεων της φύσης.

Η συνάρτηση χρησιμότητας που προσομοιώνει αυτή τη συμπεριφορά είναι η λογαριθμική συνάρτηση, δηλαδή, ακολουθώντας τη σημειογραφία όπως παρουσιάστηκε στα προηγούμενα κεφάλαια,  $u(c) = \ln c$ . Για την πρώτη παράγωγο της συνάρτησης αυτής είναι  $u' = 1/c$  και για τη δεύτερη:  $u'' = -1/c^2$ . Ο συντελεστής μέτρησης της αποστροφής προς τον κίνδυνο υπολογίζεται όπως  $r_A = -u''/u' = (-1/c^2)/(1/c) = 1/c$ , εντάσσεται δηλαδή στην κατηγορία της φθίνουσας αποστροφής σε ποσότητες (decreasing absolute risk aversion – DARA). Επιπλέον, ο συντελεστής σχετικής αποστροφής προς τον κίνδυνο υπολογίζεται όπως  $r_R = -cu''/u' = (-c/c^2)/(1/c) = 1 > 0$  συνεπώς εντάσσεται στην κατηγορία της σταθερής σχετικής αποστροφής προς τον κίνδυνο (constant relative risk aversion – CRRA).

Στη συνέχεια θα αναλυθούν οι διάφορες παραλλαγές των μεθόδων αξιολόγησης του κινδύνου με χρήση της προσέγγισης του Markowitz. Ονομάζουμε  $\tilde{P}(x; \mathbf{d}; \tilde{\mathbf{r}})$  την πιθανοτική κατανομή της αντικειμενικής συνάρτησης, με μέσο  $P(x; \mathbf{d}; \bar{\mathbf{r}})$  και διακύμανση  $\Sigma_P^2(x; \mathbf{d}; \tilde{\mathbf{r}})$ .

Στην πρώτη κατηγορία, ανήκουν τα υποδείγματα των οποίων η αντικειμενική συνάρτηση αξιολογεί την πιθανοτική κατανομή του εξεταζόμενου μεγέθους, για παράδειγμα του συνολικού κέρδους από τη λειτουργία ενός ενεργειακού συστήματος, με χρήση της μέσης τιμής και της διακύμανσης και μπορούν να γραφούν στη μορφή **(8-1)**

$$\begin{aligned} \max B \cdot P(x; \mathbf{d}; \bar{\mathbf{r}}) - \frac{1}{2} \cdot \Sigma_p^2(x; \mathbf{d}; \tilde{\mathbf{r}}) & \quad \max B \cdot P(x; \mathbf{d}; \bar{\mathbf{r}}) - \frac{1}{2} \cdot \Sigma_p(x; \mathbf{d}; \tilde{\mathbf{r}}) \\ \text{υ.π. } Prob[f(x; \mathbf{d}; \tilde{\mathbf{r}}) \leq \pi] \geq \gamma & \quad \text{υ.π. } Prob[f(x; \mathbf{d}; \tilde{\mathbf{r}}) \leq \pi] \geq \gamma \\ g(x; \mathbf{d}) \leq 0 & \quad g(x; \mathbf{d}) \leq 0 \\ h(x; \mathbf{d}) = 0 & \quad h(x; \mathbf{d}) = 0 \end{aligned} \quad \begin{matrix} \text{(8-1)} \\ \text{(8-2)} \end{matrix}$$

όπου:  $x$  οι άγνωστες μεταβλητές του προβλήματος

$\tilde{\mathbf{r}}$  οι πιθανοτικές παράμετροι του προβλήματος που ακολουθούν γνωστές κατανομές

$\mathbf{d}$  οι παράμετροι των οποίων οι τιμές είναι γνωστές με βεβαιότητα

$\pi, \gamma$  προκαθορισμένα κατώφλια

$B$  ο συντελεστής βαρύτητας της μέσης τιμής

$f(x; \mathbf{d}; \tilde{\mathbf{r}})$  συνάρτηση των αγνώστων μεταβλητών του προβλήματος, των πιθανοτικών μεγεθών και των παραμέτρων των οποίων οι τιμές είναι γνωστές με βεβαιότητα

$g(x; \mathbf{d}), h(x; \mathbf{d})$  συναρτήσεις των αγνώστων μεταβλητών του προβλήματος και των παραμέτρων των οποίων οι τιμές είναι γνωστές με βεβαιότητα

Παραλλαγή της προσέγγισης αυτής αποτελεί η χρήση της τυπικής απόκλισης  $\Sigma_p(x; \mathbf{d}; \tilde{\mathbf{r}}) = \sqrt{\Sigma_p^2(x; \mathbf{d}; \tilde{\mathbf{r}})}$  στην αντικειμενική συνάρτηση έναντι της διακύμανσης της πιθανοτικής κατανομής, όπως παρουσιάζεται στο υπόδειγμα (8-2).

Μια διαφορετική προσέγγιση του ίδιου προβλήματος αποτελεί η ελαχιστοποίηση της διακύμανσης **(8-3)** ή της τυπικής απόκλισης **(8-4)** της πιθανοτικής κατανομής του εξεταζόμενου μεγέθους με δεδομένο ότι η μέση τιμή του κέρδους ικανοποιεί κάποιο ελάχιστο όριο.

$$\begin{aligned} \min \frac{1}{2} \cdot \Sigma_p^2(x; \mathbf{d}; \tilde{\mathbf{r}}) & \quad \min \frac{1}{2} \cdot \Sigma_p(x; \mathbf{d}; \tilde{\mathbf{r}}) \\ \text{υ.π. } P(x; \mathbf{d}; \bar{\mathbf{r}}) \geq \kappa & \quad \text{υ.π. } P(x; \mathbf{d}; \bar{\mathbf{r}}) \geq \kappa \\ Prob[f(x; \mathbf{d}; \tilde{\mathbf{r}}) \leq \pi] \geq \gamma & \quad Prob[f(x; \mathbf{d}; \tilde{\mathbf{r}}) \leq \pi] \geq \gamma \\ g(x; \mathbf{d}) \leq 0 & \quad g(x; \mathbf{d}) \leq 0 \\ h(x; \mathbf{d}) = 0 & \quad h(x; \mathbf{d}) = 0 \end{aligned} \quad \begin{matrix} \text{(8-3)} \\ \text{(8-4)} \end{matrix}$$

Όπου:  $\kappa$  η ελάχιστη τιμή της μέσης τιμής

Επιπρόσθετα, το μοντέλο μπορεί να γραφεί ως η μεγιστοποίηση της μέσης τιμής της πιθανοτικής κατανομής του εξεταζόμενου μεγέθους προσαυξημένη κατά ένα ποσοστό της διακύμανσης της κατανομής **(8-5)** ή αντίστοιχα προσαυξημένη κατά ένα ποσοστό της τυπικής απόκλισης της κατανομής **(8-6)**.

$$\max P(\mathbf{x}; \mathbf{d}; \bar{\mathbf{r}}) - A \cdot \Sigma_p^2(\mathbf{x}; \mathbf{d}; \tilde{\mathbf{r}})$$

$$\text{υ.π. } Prob[f(\mathbf{x}; \mathbf{d}; \tilde{\mathbf{r}}) \leq \pi] \geq \gamma$$

$$g(\mathbf{x}; \mathbf{d}) \leq 0$$

$$h(\mathbf{x}; \mathbf{d}) = 0$$

**(8-5)**

$$\max P(\mathbf{x}; \mathbf{d}; \bar{\mathbf{r}}) - A \cdot \Sigma_p(\mathbf{x}; \mathbf{d}; \tilde{\mathbf{r}})$$

$$\text{υ.π. } Prob[f(\mathbf{x}; \mathbf{d}; \tilde{\mathbf{r}}) \leq \pi] \geq \gamma$$

$$g(\mathbf{x}; \mathbf{d}) \leq 0$$

$$h(\mathbf{x}; \mathbf{d}) = 0$$

**(8-6)**

Όπου:  $A$  ο συντελεστής βαρύτητας της διακύμανσης

Τα αποτελέσματα των υποδειγμάτων στα οποία χρησιμοποιούνται η μέση τιμή και η διακύμανση του προς αξιολόγηση μεγέθους ως μέτρα του κινδύνου (mean variance models) διαφοροποιούνται ιδιαίτερα αναλόγως την επιλογή του συντελεστή  $A$ , δηλαδή αναλόγως τη βαρύτητα που δίνεται στη διακύμανση της κατανομής. Επιλέγοντας μικρό συντελεστή  $A$ , το υπόδειγμα τείνει στη μεγιστοποίηση της μέσης τιμής. Στην περίπτωση αυτή μπορεί να επιλεγούν συνδυασμοί επενδύσεων με μεγάλο ρίσκο εάν αυτοί έχουν μεγάλη μέση τιμή. Απεναντίας, επιλέγοντας μεγάλες τιμές του συντελεστή  $A$  υπερεκτιμάται ο κίνδυνος.

Η μεθοδολογία αυτή όπως αναπτύχθηκε προηγουμένως έχει επεκταθεί περαιτέρω ώστε να περιλαμβάνει μια συνάρτηση χρησιμότητας του κέρδους από τη λειτουργία  $U(\mathbf{x}; \mathbf{d}; \tilde{\mathbf{r}})$ . Στην περίπτωση αυτή, η **(8-1)** και **(8-2)** προσαρμόζονται ως εξής:

$$\max B \cdot P(U(\mathbf{x}; \mathbf{d}; \bar{\mathbf{r}})) - \frac{1}{2} \cdot \Sigma_p^2(U(\mathbf{x}; \mathbf{d}; \tilde{\mathbf{r}}))$$

$$\text{υ.π. } Prob[f(\mathbf{x}; \mathbf{d}; \tilde{\mathbf{r}}) \leq \pi] \geq \gamma \quad \mathbf{(8-7)}$$

$$g(\mathbf{x}; \mathbf{d}) \leq 0$$

$$h(\mathbf{x}; \mathbf{d}) = 0$$

$$\max B \cdot P(U(\mathbf{x}; \mathbf{d}; \bar{\mathbf{r}})) - \frac{1}{2} \cdot \Sigma_p(U(\mathbf{x}; \mathbf{d}; \tilde{\mathbf{r}}))$$

$$\text{υ.π. } Prob[f(\mathbf{x}; \mathbf{d}; \tilde{\mathbf{r}}) \leq \pi] \geq \gamma \quad \mathbf{(8-8)}$$

$$g(\mathbf{x}; \mathbf{d}) \leq 0$$

$$h(\mathbf{x}; \mathbf{d}) = 0$$

Μία διαφορετική προσέγγιση αποτελεί η μεγιστοποίηση της μέσης τιμής της πιθανοτικής κατανομής του εξεταζόμενου μεγέθους προσαυξημένη κατά την «ημιαπόκλιση» (semideviation) της κατανομής  $R_p(\mathbf{x}; \mathbf{d}; \tilde{\mathbf{r}})$ , η οποία υπολογίζεται με βάση τον τύπο **(8-9)**:

$$R_p(x; \mathbf{d}; \tilde{\mathbf{r}}) = E \left[ |\min(P(x; \mathbf{d}; \tilde{\mathbf{r}}) - \kappa, 0)| \right] \quad (8-9)$$

Όπου:  $\kappa$  η επιδιωκόμενη τιμή της μέσης τιμής

$R_p(x; \mathbf{d}; \tilde{\mathbf{r}})$  η «ημιαπόκλιση» της πιθανοτικής κατανομής του εξεταζόμενου μεγέθους  $\tilde{P}(x; \mathbf{d}; \tilde{\mathbf{r}})$  που αποτελεί συνάρτηση του διανύσματος των τιμών των πιθανοτικών μεγεθών  $\tilde{\mathbf{r}}$  και επιδιώκεται να έχει τιμή  $\kappa$

## 8.2 Ανάπτυξη του μαθηματικού υποδείγματος βέλτιστης ανάπτυξης και λειτουργίας ηλεκτρικού τομέα σύμφωνα με την προσέγγιση Markowitz για την αντιμετώπιση της αβεβαιότητας

Τα πιθανοτικά μεγέθη του υποδείγματος είναι οι τιμές των καυσίμων ( $\tilde{f}_{i,f,t}$ ), οι τιμές των δικαιωμάτων εκπομπών CO<sub>2</sub> ( $\tilde{ETS}_{p,t}$ ) και η παράμετρος  $\tilde{a}_{i,s,t}$  της αντίστροφης συνάρτησης ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας.

Το σύστημα μεγιστοποιεί την αναμενόμενη τιμή του συνολικού κέρδους της επιχείρησης που λειτουργεί στην αγορά λαμβάνοντας υπόψιν την τυπική απόκλιση του πολλαπλασιασμένη επί ένα συντελεστή  $A$ . Σε ένα σύστημα στο οποίο εφαρμόζεται αξιολόγηση της πιθανοτικής κατανομής του κέρδους με χρήση της προσέγγισης του Markowitz, η βελτιστοποίηση επιδιώκει τη μεγιστοποίηση του κέρδους και ταυτόχρονα την κατά το δυνατόν αποφυγή κινδύνου. Θα επιλεγεί δηλαδή το μίγμα επενδύσεων το οποίο έχει μεγάλη μέση τιμή και μικρή τυπική απόκλιση.

Στο παρόν υπόδειγμα επιλέξαμε τη μεθοδολογία όπως αναπτύχθηκε στην (8-6), όπου ο συντελεστής  $A$  είναι ίσος με 1.

$$\max \left[ P(x; \mathbf{d}; \tilde{\mathbf{r}}) - \Sigma_p(x; \mathbf{d}; \tilde{\mathbf{r}}) \right] \quad (8-10)$$

Όπου:  $P(x; \mathbf{d}; \tilde{\mathbf{r}})$  η μέση τιμή της πιθανοτικής κατανομής του συνολικού κέρδους της επιχείρησης που λειτουργεί στην αγορά

$\Sigma_p(x; \mathbf{d}; \tilde{\mathbf{r}})$  η τυπική απόκλιση της κατανομής του συνολικού κέρδους.

Το συνολικό κέρδος ( $\tilde{P}$ ) υπολογίζεται από τον τύπο (7-5).

Οι περιορισμοί μένουν όπως στο κεφάλαιο 4. Ο αιτιοκρατικός περιορισμός (4-26) μετατρέπεται σε πιθανοτικό, ο οποίος, δεδομένου ότι τα πιθανοτικά μεγέθη

ακολουθούν κανονικές κατανομές, μπορεί να γραφεί στην αιτιοκρατική ισοδύναμη μορφή του **(9-20)**, όπως αναλύεται στο κεφάλαιο 9.5.

Στο υπόδειγμα του παρόντος κεφαλαίου η αντικειμενική συνάρτηση αναπτύσσεται θεωρώντας ότι οι στοχαστικές παράμετροι ακολουθούν κανονικές κατανομές με δεδομένες μέσες τιμές, διακυμάνσεις και συσχετίσεις μεταξύ τους. Οι παράμετροι αυτοί παρουσιάζουν συσχέτιση μεταξύ τους αλλά θεωρούνται ανεξάρτητες μεταξύ διαφορετικών ετών.

Η αντικειμενική συνάρτηση είναι όπως η **(8-11)** που περιλαμβάνει την μέση τιμή και την τυπική απόκλιση των κερδών της επιχείρησης

$$\begin{aligned}
 & MAX \left\{ \sum_{t=1}^T e^{-\delta_t \cdot t} \cdot \left[ \sum_i \left[ \left( \bar{\alpha}_{i,s,t} - \frac{1}{2} \beta_{i,s,t} \cdot D_{i,s,t} \right) \cdot D_{i,s,t} \right. \right. \right. \\
 & - \sum_f \bar{f} p_{i,f,t} (F_{i,f,t}) \cdot F_{i,f,t} \\
 & - \sum_n \sum_{\tau \leq t} \sum_s v c_{i,n,\tau,t} (G_{i,n,\tau,s,t}) \cdot G_{i,n,\tau,s,t} \\
 & - \sum_n \sum_{\tau \leq t} f c_{i,n,\tau,t} (K_{i,n,\tau,t}) \cdot K_{i,n,\tau,t} \\
 & - \sum_n (\sum_{\tau \leq t} n i_{i,n,\tau,t} (\rho_{i,n,\tau}) \cdot i c p_{i,n,\tau} (\sum_{\tau \leq t} I_{i,n,\tau,\tau}) \cdot I_{i,n,\tau}) \\
 & - \sum_n (\sum_{\tau \leq t} n e_{i,n,\tau,t} (\rho_{i,n,\tau}) \cdot i c e_{i,n,\tau} (\sum_{\tau \leq t} E I_{i,n,\tau,\tau}) \cdot E I_{i,n,\tau}) \\
 & - c e_{i,t} (\sum_{\tau \leq t} E S_{i,\tau}) \cdot E S_{i,t} \\
 & - \overline{ETS} p_t \cdot E M_{i,t} \\
 & \left. - \sum_{\tau \leq t} n p x_{i,\tau,t} (\rho_{i,\tau}) \cdot P C X_{i,\tau,t} \right] - \sum_k \sum_s h r s_s \cdot F L_{k,s,t} \cdot g c u_{k,t} \left. \right] - \Sigma_P \left. \right\} \tag{8-11}
 \end{aligned}$$

Όπου:  $\Sigma_P = \sum_{t=1}^T e^{-\delta_t \cdot t} \cdot \sum_i [\sigma^2_{i,t,1} + \sigma^2_{i,t,2} + 2 \cdot Cov_{i,t} + \sigma^2_{i,t,3}]$  η διακύμανση του συνολικού κέρδους τους συστήματος

$[\sigma^2_{i,t,1} + \sigma^2_{i,t,2} + 2 \cdot Cov_{i,t} + \sigma^2_{i,t,3}]$  η διακύμανση του ετήσιου κέρδους. Προκύπτει ως άθροισμα της διακύμανσης των πιθανοτικών τιμών των καυσίμων ( $\sigma^2_{i,t,1}$ ), της διακύμανσης των πιθανοτικών τιμών αγοράς των δικαιωμάτων εκπομπών  $CO_2$  ( $\sigma^2_{i,t,2}$ ), της συν διακύμανσης των τιμών των καυσίμων με τις τιμές αγοράς των δικαιωμάτων εκπομπών  $CO_2$  ( $Cov_{i,t}$ ) και της διακύμανσης του του σταθερού όρου της αντίστροφης συνάρτησης ζήτησης ( $\sigma^2_{i,t,3}$ ):

$$\sigma^2_{i,t,1} = \sum_f (F_{i,f,t}) \cdot V f_{i,t,f,f} \cdot (F_{i,f,t}) \quad \forall i, t \tag{8-12}$$



$$\sigma^2_{i,t,2} = EM_{i,t}^2 \sigma_{ETS_p}^2 \quad \forall i,t \quad (8-13)$$

$$Cov_{i,t} = \sum_f F_{i,f,t} \cdot CovFE_t \cdot EM_{i,t} + \sum_f \sum_{ff \neq f} (F_{i,f,t}) \cdot Vf_{i,t,f,ff} \cdot (F_{i,ff,t}) \quad \forall i,t \quad (8-14)$$

$$\sigma^2_{i,t,3} = \sum_s D_{i,s,t}^2 \sigma_{\alpha_{i,\sigma,t}}^2 \quad \forall i,t \quad (8-15)$$

$Vf_{i,t,f,ff}$  ο πίνακας συσχέτισης των τιμών των καυσίμων

$CovFE_t$  ο πίνακας συν-διακύμανσης των τιμών των καυσίμων που έχουν θεωρηθεί πιθανοτικά μεγέθη και των τιμών των δικαιωμάτων εκπομπών CO<sub>2</sub>.

Στο σημείο αυτό πρέπει να διευκρινιστεί η μορφή της (8-11). Αυτή η αντικειμενική συνάρτηση αναφέρεται στην βελτιστοποίηση προβλήματος επιχείρησης που λειτουργεί σε αγορά τέλει ανταγωνισμού. Η αγορά υπό καθεστώς τέλει ανταγωνισμού μπορεί να μοντελοποιηθεί με δύο τρόπους σύμφωνα με την βιβλιογραφία. Πρώτον, μπορούμε να γράψουμε το πρόβλημα της κάθε επιχείρησης που λειτουργεί στην αγορά ως πρόβλημα με δεδομένη και εξωγενή την τιμή πώλησης των προϊόντων και το οποελαχιστοποιεί το κόστος παραγωγής. Η τιμή πώλησης των προϊόντων σε αυτή την γραφή προκύπτει ως δυική τιμή της ισορροπίας προσφοράς και ζήτησης. Μια άλλη γραφή της αναπαράστασης αγοράς υπό καθεστώς τέλει ανταγωνισμού είναι η βελτιστοποίηση του κοινωνικού πλεονάσματος, την οποία γραφή έχουμε χρησιμοποιήσει.

Για την επίλυση του προβλήματος, έγινε δειγματοληψία των κανονικών κατανομών των στοχαστικών παραμέτρων του προβλήματος θεωρώντας τα μεγέθη συσχετισμένα σύμφωνα με πίνακα διακύμανσης – συν διακύμανσης. Τα δείγματα υπολογίζονται όπως αναλύθηκε στο κεφάλαιο 3.3.

Στο υπόδειγμα χρησιμοποιούμε το δειγματικό μέσο και τη δειγματική τυπική απόκλιση όπως προκύπτουν από τα δείγματα, επομένως η αντικειμενική συνάρτηση δύναται να επιλυθεί με τη μέθοδο του μη γραμμικού προγραμματισμού (NLP – non-linear programming). Στο υπόδειγμα, πλέον των αιτιοκρατικών περιορισμών υπεισέρχεται πιθανοτικός περιορισμός, ο οποίος επιλύεται με τη μέθοδο του ακέραιου προγραμματισμού. Συνεπώς το πρόβλημα επιλύεται με τη μέθοδο του ακέραιου προγραμματισμού.

Το παρόν υπόδειγμα διαφοροποιείται σημαντικά από το υπόδειγμα στο οποίο η αξιολόγηση γίνεται με χρήση της μεθόδου μεγιστοποίησης της πιθανότητας αποφυγής ζημίας, όπως αναλύεται στο επόμενο κεφάλαιο 9. Στο υπόδειγμα του κεφαλαίου 9 επιδιώκεται η μεγιστοποίηση της πιθανότητας το συνολικό κέρδος της επιχείρησης που λειτουργεί στην αγορά να είναι θετικό. Αντιθέτως, το παρόν υπόδειγμα λαμβάνει υπόψη τη μέση τιμή και την τυπική απόκλιση της πιθανοτικής κατανομής της αντικειμενικής συνάρτησης. Το πρόβλημα επιλέγει μίγμα επενδύσεων που βελτιστοποιεί τη μέση τιμή και την τυπική απόκλιση της κατανομής δηλαδή προσπαθεί να βρει το βέλτιστο σημείο ισορροπίας μεταξύ βέλτιστης μέσης τιμής και βέλτιστης τυπικής απόκλισης.

### 8.2.1 Ύπαρξη και μοναδικότητα λύσης

Ο πιθανοτικός περιορισμός είναι της μορφής

$$\begin{aligned}
 & P[(1 + mup) \cdot \tilde{g}(x; d; \tilde{r}) \geq \tilde{f}(x; d; \tilde{r})] \geq 1 - \lambda \Rightarrow \\
 & P[(1 + mup) \cdot \tilde{g}(x; d; \tilde{r}) - \tilde{f}(x; d; \tilde{r}) \geq 0] \geq 1 - \lambda \Rightarrow \\
 & P\left[\frac{\left((1 + mup) \cdot \tilde{g}(x; d; \tilde{r}) - \tilde{f}(x; d; \tilde{r})\right) - \left((1 + mup) \cdot g(x; d; \bar{r}) - f(x; d; \bar{r})\right)}{\Sigma_{f,g}(x; d; \tilde{r})}\right. \\
 & \quad \left. \geq \frac{0 - \left((1 + mup) \cdot g(x; d; \bar{r}) - f(x; d; \bar{r})\right)}{\Sigma_{f,g}(x; d; \tilde{r})}\right] \geq 1 - \lambda \Rightarrow \tag{8-16} \\
 & \frac{-\left((1 + mup) \cdot g(x; d; \bar{r}) - f(x; d; \bar{r})\right)}{\Sigma_{f,g}(x; d; \tilde{r})} \leq \mathcal{F}_{N(0,1)}^{-1}(\lambda) \Rightarrow \\
 & \frac{-\left((1 + mup) \cdot g(x; d; \bar{r}) - f(x; d; \bar{r})\right)}{\Sigma_{f,g}(x; d; \tilde{r})} \leq -\mathcal{F}_{N(0,1)}^{-1}(1 - \lambda) \Rightarrow \\
 & (1 + mup) \cdot g(x; d; \bar{r}) - \Sigma_{f,g}(x; d; \tilde{r}) \cdot \mathcal{F}_{N(0,1)}^{-1}(1 - \lambda) - f(x; d; \bar{r}) \geq 0
 \end{aligned}$$

Όπου:  $x$  οι άγνωστες μεταβλητές του προβλήματος

$\tilde{r}$  οι πιθανοτικές παράμετροι του προβλήματος που ακολουθούν γνωστές κατανομές

$d$  οι παράμετροι των οποίων οι τιμές είναι γνωστές με βεβαιότητα

$f(x; d; \bar{r})$  η μέση τιμή της συνάρτησης των εσόδων  $f(x; d; \tilde{r})$

$g(x; d; \bar{r})$  η μέση τιμή της συνάρτησης του κόστους  $g(x; d; \tilde{r})$

$\Sigma_{f,g}(x; \mathbf{d}; \tilde{\mathbf{r}})$  η τυπική απόκλιση του κέρδους της επιχείρησης που προκύπτει ως  $\tilde{f}(x; \mathbf{d}; \tilde{\mathbf{r}}) - \tilde{g}(x; \mathbf{d}; \tilde{\mathbf{r}})$ , οποία πρέπει να αναφερθεί ότι είναι συνάρτηση της ζητούμενης ηλεκτρικής ενέργειας και ισχύει ότι  $\Sigma_{f,g}(x; \mathbf{d}; \tilde{\mathbf{r}}) > 0$ .

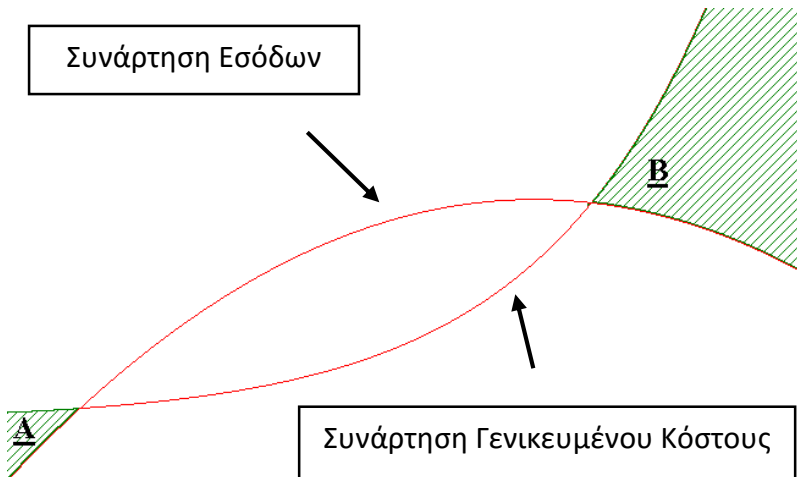
Εάν  $1 - \lambda \geq 0,5$ , τότε:

$$\begin{aligned}
 1 - \lambda &\geq 0,5 \Rightarrow \\
 \mathcal{F}_{N(0,1)}^{-1}(1 - \lambda) &\geq 0 \Rightarrow \tag{8-17} \\
 \Sigma_{f,g}(x; \mathbf{d}; \tilde{\mathbf{r}}) \cdot \mathcal{F}_{N(0,1)}^{-1}(1 - \lambda) &\nearrow
 \end{aligned}$$

Αφού το  $\Sigma_{f,g}(x; \mathbf{d}; \tilde{\mathbf{r}}) > 0$ . Επειδή όμως η  $\Sigma_{f,g}(x; \mathbf{d}; \tilde{\mathbf{r}})$  αναπαριστά την τυπική απόκλιση της κατανομής, προκύπτει ότι είναι κοίλη συνάρτηση ως προς την μεταβλητή  $x$ .

Η συνάρτηση  $(1 + \mu ip) \cdot g(x; \mathbf{d}; \tilde{\mathbf{r}})$  είναι γνησίως αύξουσα αφού η  $g(x; \mathbf{d}; \tilde{\mathbf{r}})$  που είναι η συνάρτηση μέσου κόστους της επιχείρησης είναι γνησίως αύξουσα και η συνάρτηση  $f(x; \mathbf{d}; \tilde{\mathbf{r}})$  που είναι η συνάρτηση μέσων εσόδων της επιχείρησης είναι κοίλη όπως έχουν ήδη αναπτυχθεί στο κεφάλαιο 4.

Άρα ο χώρος εφικτών λύσεων που ορίζεται από την (8-16) στη γενική περίπτωση μπορεί να είναι μη κυρτός όπως παρουσιάζεται στο Γράφημα 2 από την αφαίρεση της συνάρτησης εσόδων από την συνάρτηση Γενικευμένου Κόστους που εμπεριέχει τον κίνδυνο. Οι χώροι που είναι εφικτοί σύμφωνα με την (8-16) είναι ο Α και ο Β όπως παρουσιάζονται στο παρακάτω γράφημα.



Γράφημα 2: Χώρος εφικτών λύσεων του πιθανοτικού περιορισμού

Ο χώρος Α όπως παρουσιάζεται στο Γράφημα 2 αποτελεί χώρο μη εφικτών λύσεων λόγω άλλων περιορισμών του προβλήματος, οπότε ο χώρος των εφικτών λύσεων της (8-16) θα είναι μόνο ο χώρος Β, ο οποίος είναι κυρτός. Επιπλέον υπάρχει θεώρημα που αναφέρει ότι για την περίπτωση

του περιορισμού **(8-16)** όταν το  $1-\lambda > 0,5$  τότε είναι κυρτός. Συνεπώς, ο χώρος εφικτών λύσεων του πιθανοτικού περιορισμού είναι κυρτός χώρος.

Επιπλέον, όλοι οι αιτιοκρατικοί περιορισμοί που είναι γραμμικές συναρτήσεις ορίζουν κυρτό σύνολο εφικτής περιοχής του προβλήματος όπως έχει αναπτυχθεί στο 4.3.12 (Rockafellar, Convex Analysis, 1970).

Η τομή κυρτών συνόλων είναι κυρτό σύνολο (Rockafellar, Convex Analysis, 1970), οπότε προκύπτει ότι ο χώρος εφικτών λύσεων του προβλήματος είναι κυρτός.

Στη γενική περίπτωση, η αντικειμενική συνάρτηση του παρόντος κεφαλαίου είναι της μορφής  $\mu(x) - A\sigma(x)$ . Όπου  $\mu(x)$  η συνάρτηση της μέσης τιμής του κέρδους της επιχείρησης και  $\sigma(x)$  η συνάρτηση της τυπικής απόκλισης του κέρδους της επιχείρησης.

Η πρώτη παράγωγός της υπολογίζεται ως

$$\frac{\partial(\mu(x) - A\sigma(x))}{\partial x} = \mu'(x) - A\sigma'(x) \quad (1) \quad (8-18)$$

Ισχύει  $\sigma(x) > 0$  και  $\sigma'(x) > 0$

Χωρίς βλάβη της γενικότητας υπάρχουν  $q_1, q_2$  με  $q_1 < q_2$  τέτοια ώστε να ισχύει:

$$\mu(q_1) = \mu(q_2) = 0 \quad (8-19)$$

και για  $x$  με  $q_1 < x < q_2$ , ισχύει  $\mu(x) > 0$ .

Σε διαφορετική περίπτωση δεν μπορεί να διατηρηθεί η επιχείρηση στην αγορά με αρνητικό κέρδος για μακρό χρονικό διάστημα.

Για το βέλτιστο σημείο  $q_k$  ισχύει

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\mu(x) - A\sigma(x))}{\partial x} &= 0 \Rightarrow \\ \mu'(q_k) - A\sigma'(q_k) &= 0 \Rightarrow \\ \mu'(q_k) &= A\sigma'(q_k) \geq 0 \end{aligned} \quad (8-20)$$

Για τα σημεία  $q_1$  και  $q_2$  ισχύει

$$\begin{array}{ll} \mu(q_1) = 0 & \mu(q_2) = 0 \\ \mu'(q_1) \geq 0 & \mu'(q_2) \leq 0 \\ \sigma(q_1) > 0 & \sigma(q_2) > 0 \\ \sigma'(q_1) > 0 & \sigma'(q_2) > 0 \end{array} \quad (8-21)$$

Επομένως σύμφωνα με την **(8-21)** είναι  $q_k \leq q$ , όπου  $q$  είναι το βέλτιστο επίπεδο παραγωγής του αιτιοκρατικού υποδείγματος.

### 8.3 Μοντελοποίηση ατελούς ανταγωνισμού – ισορροπία κατά Nash-Cournot στο υπόδειγμα αντιμετώπισης της αβεβαιότητας σύμφωνα με την προσέγγιση Markowitz

Στα προηγούμενα υποκεφάλαια του παρόντος κεφαλαίου αναλύθηκε η συμπεριφορά επιχειρήσεων που λειτουργούν σε αγορά υπό καθεστώς τέλει ανταγωνισμού. Στην συνέχεια θα αναλυθεί η αγορά στην οποία οι επιχειρήσεις λειτουργούν υπό καθεστώς ατελούς ανταγωνισμού – ισορροπία κατά Nash-Cournot. Στην περίπτωση του ανταγωνισμού κατά Cournot οι επιχειρήσεις που λειτουργούν στην αγορά γνωρίζουν την συνολική συνάρτηση ζήτησης και θεωρούν δεδομένη την παραγωγή των άλλων επιχειρήσεων στην προσπάθειά τους να μεγιστοποιήσουν το κέρδος τους μεταβάλλοντας την δική τους παραγωγή.

Σε αυτήν την υποενότητα η αντίστροφη συνάρτηση ζήτησης είναι γραμμική, όπως παρουσιάζεται στην εξίσωση **(4-69)**, συνεπώς στο πρόβλημα μεγιστοποίησης του κέρδους κάθε επιχείρησης, τα έσοδα αναπαρίσταται όπως παρουσιάζεται στην εξίσωση **(4-70)** και το κέρδος της κάθε επιχείρησης όπως στην **(4-71)**.

Η τιμή ηλεκτρισμού στο πρόβλημα μεγιστοποίησης της κάθε επιχείρησης δεν είναι εξωγενής παράμετρος του προβλήματος της επιχείρησης (δηλαδή δεν προκύπτει από την δυική τιμή του περιορισμού ισορροπίας προσφοράς και ζήτησης) αλλά είναι συνάρτηση των ιδίων πωλήσεων της επιχείρησης καθώς και των δεδομένων θεωρούμενων πωλήσεων των υπολοίπων επιχειρήσεων που δραστηριοποιούνται στην αγορά. Διευκρινίζεται ότι στην αγορά επικρατεί ισορροπία κατά Nash όταν κάθε επιχείρηση της αγοράς επιλέγει την βέλτιστη για αυτήν πολιτική με δεδομένο ότι οι υπόλοιπες επιχειρήσεις στην αγορά έχουν επιλέξει την βέλτιστη για αυτές πολιτική.

Η αντικειμενική συνάρτηση του προβλήματος μεγιστοποίησης της κάθε επιχείρησης όταν στην αγορά επικρατεί ανταγωνισμός κατά Cournot γίνεται όπως η **(8-22)**. Σημειώνεται ότι τα μεγέθη που σημειώνονται με την  $(\bar{\quad})$  αναπαριστούν την μέση τιμή του αντίστοιχου πιθανοτικού μεγέθους.

$$\begin{aligned}
 & MAX \left\{ \sum_{t=1}^T e^{-\delta_t \cdot t} \cdot \left[ \sum_i \left[ \right. \right. \right. \\
 & \sum_s nh_s \cdot Sl_{fm,i,s,t} \cdot \left( a_{i,s,t} - b_{i,s,t} \cdot \left( Sl_{fm,i,s,t} + \sum_{fm1 \neq fm}^{fm1} \overline{Sl}_{fm1,i,s,t} \right) \right) \\
 & - \sum_f \overline{fp}_{i,f,t}(F_{i,f,t}) \cdot F_{fm,i,f,t} \\
 & - \sum_n \sum_{\tau \leq t} \sum_s vc_{i,n,\tau,t}(G_{fm,i,n,\tau,s,t}) \cdot G_{fm,i,n,\tau,s,t} \\
 & - \sum_n \sum_{\tau \leq t} fc_{i,n,\tau,t}(K_{fm,i,n,\tau,t}) \cdot K_{fm,i,n,\tau,t} \\
 & - \sum_n (\sum_{\tau \leq t} ni_{i,n,\tau,t}(\rho_{i,n,\tau}) \cdot icp_{i,n,\tau}(\sum_{\tau \leq t} I_{fm,i,n,\tau,\tau}) \cdot I_{fm,i,n,\tau}) \\
 & - \sum_n (\sum_{\tau \leq t} nei_{i,n,\tau,t}(\rho_{i,n,\tau}) \cdot ice_{i,n,\tau}(\sum_{\tau \leq t} EI_{fm,i,n,\tau,\tau}) \cdot EI_{fm,i,n,\tau}) \\
 & - ce_{i,t}(\sum_{\tau \leq t} ES_{fm,i,\tau}) \cdot ES_{fm,i,t} \\
 & - \overline{ETS}p_t \cdot EM_{fm,i,t} \\
 & - \sum_{\tau \leq t} npx_{i,\tau,t}(\rho_{i,\tau}) \cdot PCX_{i,\tau,t} \\
 & \left. \left. \left. \right] \right] - \Sigma_p \right\}
 \end{aligned} \tag{8-22}$$

Όπου:  $\Sigma_p = \sum_{t=1}^T e^{-\delta_t \cdot t} \cdot \sum_i [\sigma^2_{i,t,1} + \sigma^2_{i,t,2} + 2 \cdot Cov_{i,t} + \sigma^2_{i,t,3}]$  η διακύμανση του συνολικού κέρδους τους συστήματος

$[\sigma^2_{i,t,1} + \sigma^2_{i,t,2} + 2 \cdot Cov_{i,t} + \sigma^2_{i,t,3}]$  η διακύμανση του ετήσιου κέρδους, η οποία υπολογίζεται με χρήση των εξισώσεων **(8-12)-(8-15)** με την διαφορά ότι σε αυτήν την περίπτωση τα μεγέθη αφορούν την κάθε επιχείρηση.

Οι προϋποθέσεις για την κυρτότητα του χώρου εφικτών λύσεων ισχύουν όπως έχουν αναλυθεί στο υποκεφάλαιο 4.3.12. Η αντικειμενική συνάρτηση είναι γνησίως κοίλη ως γραμμικός συνδυασμός γνησίως κοίλων συναρτήσεων. Άρα προκύπτει ότι το πρόβλημα της κάθε επιχείρησης έχει μοναδικό βέλτιστο και επειδή για στην αγορά έχουν υποτεθεί συμμετρικές επιχειρήσεις προκύπτει ότι υπάρχει μοναδικό βέλτιστο στην αγορά. Συνεπώς, οι συνθήκες πρώτης τάξεως είναι αναγκαίες και ικανές για την επίλυση του προβλήματος και την εύρεση την μοναδικής βέλτιστης λύσης.

Για την επίλυση του μοντέλου αυτού χρησιμοποιούνται οι αρχές της μικτής συμπληρωματικότητας όπως έχουν εξηγηθεί στο υποκεφάλαιο 3.5. Χωρίς βλάβη της γενικότητας έχει υποτεθεί ότι όλοι οι περιορισμοί αφορούν την παραγωγή ή το μέρος της ζήτησης που καλύπτει η εκάστοτε επιχείρηση. Οι περιορισμοί που αφορούν την λειτουργία των μονάδων ανάγονται στην κάθε επιχείρηση. Για τους περιορισμούς που

αφορούν το σύστημα, όπως οι περιορισμοί εφεδρείας, έχει γίνει η υπόθεση ότι ο διαχειριστής του συστήματος επιβάλλει ανάλογο περιορισμό στο μέρος της ζήτησης που καλύπτει η κάθε επιχείρηση.

Σε ατελή ανταγωνισμό, η επιχείρηση που δραστηριοποιείται στην αγορά έχει τη δυνατότητα να επηρεάσει την τιμή του ηλεκτρισμού ώστε να αντισταθμίσει μέρος της αβεβαιότητας σχετικά με την ανάκτηση του κεφαλαιουχικού κόστους των επενδύσεων. Στο σημείο αυτό πρέπει να διευκρινίσουμε ότι δεν έχουμε μοντελοποιήσει τον ρυθμιστή της αγοράς ως ξεχωριστό παίκτη αλλά τον έχουμε μοντελοποιήσει έμμεσα στο πρόβλημα βελτιστοποίησης της κάθε επιχείρησης. Ο ρυθμιστής της αγοράς θα επενέβαινε στην περίπτωση που οι επιχειρήσεις έκαναν κατάχρηση της ολιγοπωλιακής τους θέσης στην αγορά και αύξαναν υπέρμετρα τις τιμές ηλεκτρισμού δρώντας σαν καρτέλ. Στην περίπτωση αυτή, θα επενέβαινε ο ρυθμιστής ώστε οι τιμές ηλεκτρισμού να μην αποκλίνουν σημαντικά από το συνολικό κόστος της κάθε επιχείρησης πλέον του εύλογου κέρδους τους για την ανάληψη ρίσκου. Έτσι η κάθε επιχείρηση φοβούμενη ότι μπορεί να προκαλέσει την ανάμειξη του ρυθμιστή έχει ενσωματώσει στο πρόβλημά της περιορισμό σχετικά με την πιθανότητα το κέρδος της να ξεπεράσει κάποιο άνω όριο κέρδους. Ο περιορισμός σχετικά με το άνω όριο στην πιθανότητα το κέρδος της επιχείρησης να ξεπεράσει κάποιο άνω όριο είναι όπως παρακάτω

$$Prob[ Έσοδα \geq (1 + \mu) * Έξοδα ] \leq 0.05 \quad (8-23)$$

όπου στον παραπάνω περιορισμό η μαθηματική γραφή των εσόδων και των εξόδων της κάθε επιχείρησης είναι όπως στην αντικειμενική συνάρτηση (8-22),  $\mu$  είναι το άνω ποσοστό που η κάθε επιχείρηση θεωρεί ότι μπορεί να δικαιολογηθεί σαν εύλογο στον ρυθμιστή.

### 8.3.1 Επίδραση της αβεβαιότητας στην βέλτιστη λύση του ατελούς ανταγωνισμού ισορροπία κατά Nash-Cournot στο πρόβλημα σύμφωνα με την προσέγγιση Markowitz

Στην συνέχεια θα αναπτύξουμε ένα πιο απλό υπόδειγμα αναπαράστασης επιχείρησης που λειτουργεί στην ηλεκτρική αγορά υπό ατελή ανταγωνισμό κατά Nash-Cournot ώστε να καταδείξουμε τις συνθήκες πρώτης τάξεως που οδηγούν στην βέλτιστη λύση καθώς και την επίδραση της αβεβαιότητας στην βέλτιστη λύση σε αντιδιαστολή με τις αντίστοιχες συνθήκες του αιτιοκρατικού υποδείγματος.

Θεωρούμε ότι αντίστροφη συνάρτηση ζήτησης είναι  $\tilde{a} - \beta(q + Q_{-i})$  με  $\tilde{a}$  να είναι το σταθερό σημείο γνωστό ως πιθανοτική κατανομή και  $\beta$  η κλίση.  $q$  είναι η ποσότητα

ηλεκτρισμού που παράγει η μία από τις συμμετρικές επιχειρήσεις και  $Q_{-i}$  είναι η ποσότητα που παράγουν οι υπόλοιπες συμμετρικές επιχειρήσεις στην αγορά. Επιπλέον υποθέτουμε ότι το σταθερό μέρος του κόστους συμβολίζεται με  $C$  και το μεταβλητό μέρος  $\bar{MC}$ . Με το σύμβολο  $\tilde{\cdot}$  συμβολίζονται οι εξωγενείς του προβλήματος παράμετροι που θεωρούνται πιθανοτικά μεγέθη που ακολουθούν κανονική κατανομή με ορισμένο πίνακα διακύμανσης συν-διακύμανσης και μέση τιμή. Έτσι το πρόβλημα βελτιστοποίησης της μιας από τις συμμετρικές επιχειρήσεις στην αγορά είναι

$$MAX_q \left( \bar{a} - \beta (q + Q_{-i}) \right) q - \left( \frac{C}{\nu} + \bar{MC} q \right) - A \sqrt{q^2 \sigma_a^2 + q^2 \sigma_{MC}^2} \quad (8-24)$$

$$s.t. \quad h(q) \geq 0 \quad (8-25)$$

$$g(q) = 0$$

Το  $A$  είναι θετικός αριθμός αφού η επιχείρηση έχει στόχο την μεγιστοποίηση των κερδών της και την ελαχιστοποίηση της τυπικής απόκλισης τους.

Επειδή ο πρώτιστος σκοπός του παραπάνω προβλήματος είναι η επίδειξη της επίδρασης της αβεβαιότητας στην βέλτιστη παραγωγή των επιχειρήσεων έχει αγνοηθεί η συν-διακύμανση.

Η συνθήκη βελτιστοποίησης πρώτης τάξεως του προβλήματος (8-24) είναι

$$\left( \bar{a} - \beta (q + Q_{-i}) \right) - \beta q - MC - A \sqrt{\sigma_a^2 + \sigma_{MC}^2} - \lambda h'(q) - k g'(q) = 0 \quad (8-26)$$

Από την οποία με πράξεις και με την υπόθεση ότι οι περιορισμοί είναι γραμμικοί ως προς την παραγόμενη ενέργεια της επιχείρησης ( $h'(q) = g'(q) = 1$ ) προκύπτει ότι

$$q = \frac{\bar{a} - \beta Q_{-i} - MC - A \sqrt{\sigma_a^2 + \sigma_{MC}^2} - \lambda - k}{2\beta} \quad (8-27)$$

Από την (8-27) προκύπτει ότι η ύπαρξη αβεβαιότητας στο πρόβλημα της επιχείρησης με δεδομένη την παραγωγή των υπόλοιπων επιχειρήσεων στην αγορά έχει την επίπτωση ότι η επιχείρηση θα τείνει να μειώσει των πωλούμενο ηλεκτρισμό στην αγορά, με δεδομένο ότι το  $A$  είναι θετικός αριθμός και  $\sqrt{\sigma_a^2 + \sigma_{MC}^2}$  είναι επίσης θετικός αριθμός.

Με αντικατάσταση  $Q_{-i} = (\nu - 1)q$  προκύπτει



$$q = \frac{a - MC - A\sqrt{\sigma_a^2 + \sigma_{MC}^2} - \lambda - k}{\beta + v\beta} \quad (8-28)$$

Στην συνέχεια θα αναλύσουμε την επίδραση της αβεβαιότητας στην συνολική ποσότητα πωλούμενου ηλεκτρισμού σε αγορά που λειτουργεί υπό καθεστώς μακροχρόνιας ισορροπίας της αγοράς. Με τον όρο μακροχρόνια ισορροπία της αγοράς εννοούμε την κατάσταση όπου στην αγορά λειτουργούν τόσες επιχειρήσεις όσες μπορούν να καλύψουν τα έξοδά τους με συγκεκριμένη πιθανότητα η οποία είναι η ελάχιστη που θέτουν οι επιχειρήσεις για να συμμετάσχουν στην αγορά. Έτσι ο πωλούμενος ηλεκτρισμός αγοράς που λειτουργεί υπό καθεστώς μακροχρόνιας ισορροπίας προκύπτει από τον περιορισμό

$$Prob \left[ \left( \tilde{a} - \beta(q + Q_{-i}) \right) q \geq \left( \frac{C}{v} + \tilde{MC} \cdot q \right) \right] = m \quad (8-29)$$

όπου  $m$  είναι η ελάχιστη πιθανότητα που δέχονται οι επιχειρήσεις τα κέρδη τους να είναι θετικά ώστε να συμμετάσχουν στην αγορά και τα σύμβολα με την  $\tilde{\phantom{x}}$  είναι τα πιθανοτικά μεγέθη για τα οποία έχουμε υποθέσει κανονική κατανομή με δεδομένη μέση τιμή και πίνακα διακύμανσης συν-διακύμανσης. Επιπλέον με  $C$  συμβολίζουμε το σταθερό κόστος που υφίσταται η επιχείρηση και το οποίο για να είναι βιώσιμη η επιχείρηση μακροχρόνια θα πρέπει να ανακτηθεί. Θεωρώντας τα πιθανοτικά μεγέθη όπως στο πρόβλημα (8-24) και (8-25) προκύπτει ότι η βέλτιστη ποσότητα πωλούμενου ηλεκτρισμού στην αγορά είναι

$$Q = \frac{a - MC - \Phi^{-1}(m)\sqrt{\sigma_a^2 + \sigma_{MC}^2} + \sqrt{\left( a - MC - \Phi^{-1}(m)\sqrt{\sigma_a^2 + \sigma_{MC}^2} \right)^2 - 4\beta C}}{2\beta} \quad (8-30)$$

Από την (8-30) προκύπτει ότι όσο αυξάνει η αβεβαιότητα τόσο η συνολική ποσότητα που οι επιχειρήσεις είναι διατεθειμένες να πωλήσουν μακροχρόνια στην αγορά μειώνεται.

Από την (8-30) προκύπτει επίσης ότι όσο η αβεβαιότητα σχετικά με την μελλοντική εξέλιξη των κερδών μειώνεται τόσο οι επιχειρήσεις είναι διατεθειμένες να πωλήσουν μεγαλύτερη ποσότητα ηλεκτρισμού με μειωμένες τιμές.

Συνεχίζοντας περαιτέρω την ανάλυση προκύπτει με την αύξηση της αβεβαιότητας μειώνεται ο βέλτιστος αριθμός συμμετρικών επιχειρήσεων στην αγορά.

Χρησιμοποιώντας τις **(8-27)** και **(8-30)** και αντικαθιστώντας το  $Q_{-i} = (v - 1)q$  προκύπτει ότι

$$q = \frac{a - MC - (\Phi^{-1}(m) - 2A)\sqrt{\sigma_a^2 + \sigma_{MC}^2} + \sqrt{\left(a - MC - \Phi^{-1}(m)\sqrt{\sigma_a^2 + \sigma_{MC}^2}\right)^2 - 4\beta C}}{2\beta} \quad (8-31)$$

$$\frac{Q}{q} = \frac{a - MC - \Phi^{-1}(m)\sqrt{\sigma_a^2 + \sigma_{MC}^2} + \sqrt{\left(a - MC - \Phi^{-1}(m)\sqrt{\sigma_a^2 + \sigma_{MC}^2}\right)^2 - 4\beta C}}{a - MC + (\Phi^{-1}(m) - 2A)\sqrt{\sigma_a^2 + \sigma_{MC}^2} - \sqrt{\left(a - MC - \Phi^{-1}(m)\sqrt{\sigma_a^2 + \sigma_{MC}^2}\right)^2 - 4\beta C}} \quad (8-32)$$

Από την **(8-32)** με πράξεις σχετικά με την πρώτη παράγωγο ως προς μεταβολή της αβεβαιότητας (αύξηση τυπικής απόκλισης) προκύπτει ότι το αποτέλεσμα της διαίρεσης που είναι ο βέλτιστος αριθμός επιχειρήσεων στην αγορά μειώνεται.

## Κεφάλαιο 9

### 9 Αξιολόγηση της πιθανοτικής κατανομής της αντικειμενικής συνάρτησης με χρήση της μεθόδου μεγιστοποίησης της πιθανότητας αποφυγής ζημίας (Avoidance of Failure)

---

#### 9.1 Εισαγωγή

Σε υπόδειγμα προσομοίωσης της αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας όπου μελετάται ο μεσομακροχρόνιος βέλτιστος ενεργειακός σχεδιασμός της, η αβεβαιότητα που υπάρχει επηρεάζουν σημαντικά τη λήψη αποφάσεων αναφορικά με τις επενδύσεις, οι οποίες αναφέρονται σε κατασκευή νέων μονάδων είτε σε επέκταση ήδη υπαρχόντων, καθώς και αποφάσεων αναφορικά με τη λειτουργία των διαθέσιμων μονάδων της. Η αβεβαιότητα αυτή ενσωματώνεται στο υπόδειγμα μέσω της θεώρησης στοχαστικών παραμέτρων όπου γνωστή είναι μόνο η πιθανοτική κατανομή των τιμών τους.

Το πρόβλημα επένδυσης στην ηλεκτροπαραγωγή ωστόσο σε ακραίες καταστάσεις έλλειψης πληροφορίας δεν είναι σε θέση να ποσοτικοποιήσει την αβεβαιότητα μέσω κατανομών πιθανοτήτων. Για το λόγο αυτό για μια επιχείρηση ηλεκτροπαραγωγής κύριος σκοπός αποτελεί η βιωσιμότητά της και συνεπώς τίθεται προτεραιότητα στην αποφυγή αποτυχίας που επιφέρει μεγάλες ζημίες. Για να το επιτύχει αυτό η επιχείρηση λαμβάνει εκείνες τις αποφάσεις που της εξασφαλίζουν «ανοσία» (immunity) σε κάθε ενδεχόμενο που είναι άγνωστο πώς θα επέλθει.

Με άλλα λόγια στοχαστικές βελτιστοποιήσεις με έντονα αυξημένη αποστροφή προς το ρίσκο προσεγγίζουν αποφάσεις σε συνθήκες άγνοιας των μελλοντικών ενδεχομένων. Η απόφαση που βασίζεται σε στοχαστική χρησιμότητα υπό συνθήκες έντονης αποστροφής

του ρίσκου προσομοιάζει με συμπεριφορές που επιδιώκουν αποφυγή ζημίας (robustness – avoidance of failure).

Η ζημία – αποτυχία για την επιχείρηση όπως την έχουμε προσομοιώσει ορίζεται από την ύπαρξη αρνητικών κερδών, τα οποία η επιχείρηση προσπαθεί να αποφύγει. Αυτός ο στόχος είναι ισοδύναμος με την μεγιστοποίηση της πιθανότητας ύπαρξης θετικών κερδών. Το χαρακτηριστικό αυτής της συμπεριφοράς είναι ότι ο αποφασίζων αδιαφορεί για το μέγεθος των κερδών και ενδιαφέρεται μόνο για το πρόσημο τους.

Για την προσομοίωση των προτιμήσεων της επιχείρησης χρησιμοποιείται η μέθοδος μεγιστοποίησης της πιθανότητας αποφυγής ζημίας. Αναπτύσσουμε μαθηματικό υπόδειγμα στο οποίο ενσωματώνουμε την αβεβαιότητα με χρήση πιθανοτικής αντικειμενικής συνάρτησης και πιθανοτικών περιορισμών. Η αντικειμενική συνάρτηση του υποδείγματος διατυπώνει ως στόχο την αποφυγή της αποτυχίας της επιχείρησης.

Ορισμένοι περιορισμοί του προβλήματος, επίσης, εξαρτώνται από παραμέτρους που έχουμε θεωρήσει πιθανοτικές. Αυτοί οι περιορισμοί μετατρέπονται σε πιθανοτικούς για τους οποίους ορίζουμε κάποιο ελάχιστο κατώφλι πιθανότητας ικανοποίησης. Στο πλαίσιο των ενεργειακών υποδειγμάτων τέτοιοι περιορισμοί μπορεί να αφορούν τεχνικούς περιορισμούς, περιορισμούς αξιοπιστίας του συστήματος ή περιορισμούς χάραξης πολιτικής. Στο υπόδειγμα που αναπτύξαμε με δεδομένη την θεώρηση σχετικά με τις πιθανοτικές παραμέτρους προκύπτει ότι τα έσοδα, το κόστος και τα κέρδη της επιχείρησης είναι πιθανοτικά μεγέθη.

Όπως εξηγήσαμε προηγουμένως, το πρόβλημα περιλαμβάνει πιθανοτικά μεγέθη δηλαδή περιλαμβάνει πλήθος πιθανοτικών καταστάσεων της φύσης, κάθε μία εκ των οποίων έχει ως αποτέλεσμα ένα σύνολο επακόλουθων, το οποίο θεωρείται ως τυχαίο μέγεθος με πιθανοτική κατανομή. Τα επακόλουθα αυτά αποτιμώνται σε χρηματικούς όρους αφού είναι το κέρδος της επιχείρησης και οι πιθανότητες τους είναι αντικειμενικά γνωστές.

Κατά την αξιολόγηση του κινδύνου με τη μέθοδο της μεγιστοποίησης της πιθανότητας αποφυγής ζημίας ο αποφασίζων επιδιώκει να αποφύγει την αποτυχία. Για να το επιτύχει αυτό επιλέγει μεταξύ των διαφορετικών επιλογών (επενδύσεις) εκείνες που παρουσιάζουν τη μικρότερη πιθανότητα τα κέρδη του να είναι αρνητικά. Η σχέση προτίμησης αυτή ικανοποιεί το αξίωμα της συνέχειας, δεδομένου ότι για μικρές αλλαγές στις πιθανότητες δεν αλλάζουν οι επιλογές του, δηλαδή οι επενδύσεις που θα κατασκευάσει, καθώς και το αξίωμα της ανεξαρτησίας, συνεπώς έχει τη μορφή της επεκτεταμένης αναμενόμενης χρησιμότητας και συνεπώς μπορούμε να αναθέσουμε σε αυτήν συναρτήσεις χρησιμότητας που προσομοιώνουν τις προτιμήσεις του αποφασίζοντα επί των ενδεχομένων. Στην παρούσα διατριβή, υποθέτουμε ότι η

συνάρτηση χρησιμότητας επί των ενδεχομένων  $v(\cdot)$  είναι η ίδια σε όλα τα δυνατά ενδεχόμενα της φύσης, ώστε να μπορούν να εξαχθούν συμπεράσματα σχετικά με την συμπεριφορά του αποφασίζοντα ανάλογα με το επίπεδο των χρηματικών αποτελεσμάτων. Η συνάρτηση αυτή είναι κοίλη αφού προσομοιώνει συμπεριφορά αποστροφής προς τον κίνδυνο (αποφυγή ζημίας) με  $v'(\cdot) > 0$  και φθίνουσα και εφαρμόζεται επί του οικονομικού αποτελέσματος των διαφόρων καταστάσεων της φύσης. Επιπλέον, η επιχείρηση είναι αδιάφορη ως προς το μέγεθος του κέρδους αρκεί αυτή να έχει κέρδος, δηλαδή επιδιώκει θετικά αποτελέσματα, ενώ αποφεύγει τις επενδύσεις που θα μπορούσαν να της επιφέρουν αρνητικά αποτελέσματα.

Η συνάρτηση χρησιμότητας που προσομοιώνει αυτή τη συμπεριφορά είναι της μορφής  $u(c) = 1 - e^{-ac}$ , όπου  $c$  είναι τα ενδεχόμενα τα οποία προκύπτουν ως αποτέλεσμα των ενεργειών του αποφασίζοντα και της επιλογής κατάστασης της φύσης και  $a$  δεδομένος θετικός συντελεστής ( $a \in \mathbb{R}, a \geq 0$ ). Η παράγωγος πρώτης τάξης της συνάρτησης αυτής είναι  $u' = ae^{-ac}$  και η παράγωγος δεύτερης τάξης  $u'' = -a^2e^{-ac}$  συνεπώς ο συντελεστής της σχετικής αποστροφής είναι  $r_R(c) = -cu''/u' = ca^2e^{-ac}/(ae^{-ac}) = ca \nearrow$  (γνησίως αύξουσα συνάρτηση). Η συμπεριφορά που εκδηλώνει ο αποφασίζων κατά την αξιολόγηση με τη μέθοδο αυτή εμπίπτει στην κατηγορία της αυξανόμενης σχετικής αποστροφής προς τον κίνδυνο (increasing relative risk aversion – IRRA). Ο συντελεστής της απόλυτης αποστροφής προς τον κίνδυνο είναι  $r_A(c) = -u''/u' = a^2e^{-ac}/(ae^{-ac}) = a > 0$ . Συνεπώς η συμπεριφορά του αποφασίζοντα με αυτή τη μέθοδο εμπίπτει στην κατηγορία της σταθερής αποστροφής προς τον κίνδυνο σε ποσότητες (constant absolute risk aversion – CARA).

## 9.2 Υπόδειγμα προβλήματος αξιολόγησης κινδύνου με τη μέθοδο της μεγιστοποίησης της πιθανότητας αποφυγής ζημίας

Στη γενική μορφή ένα πρόβλημα στο οποίο επιδιώκεται η μεγιστοποίηση της πιθανότητας αποφυγής κινδύνου μπορεί να γραφεί με τον ακόλουθο τρόπο:

$$\max_x \text{Prob}[\tilde{P}(x; \mathbf{d}; \tilde{r})^4 \geq g] \quad (1)$$

$$\text{υ.π. } \text{Prob}[\tilde{G}(x; \mathbf{d}; \tilde{r}) \leq \pi] \geq \gamma \quad (2) \quad (9-1)$$

$$\Phi(x; \mathbf{d}) \leq \mathbf{b} \quad (3)$$

<sup>4</sup> Με έντονο χρώμα συμβολίζονται μεγέθη πίνακες-διανύσματα

όπου:  $x$  οι άγνωστες μεταβλητές του προβλήματος

$\tilde{r}$  οι πιθανοτικές παράμετροι του προβλήματος που ακολουθούν γνωστές κατανομές

$d, b$  οι παράμετροι των οποίων οι τιμές είναι γνωστές με βεβαιότητα

$\tilde{P}(x; d; \tilde{r})$  συνάρτηση που αναπαριστά την αντικειμενική συνάρτηση του αιτιοκρατικού υποδείγματος με κατώφλι αποτυχίας  $\pi$

$\tilde{G}(x; d; \tilde{r})$  συνάρτηση που αναπαριστά μη γραμμικούς περιορισμούς

$\pi, g, \gamma$  προκαθορισμένα κατώφλια

Έχουμε θεωρήσει ότι οι πιθανοτικές κατανομές των στοχαστικών μεγεθών ακολουθούν την κανονική κατανομή με ορισμένη μέση τιμή για κάθε μέγεθος και πίνακα διακύμανσης-συν διακύμανσης. Στο παρόν κεφάλαιο θα χρησιμοποιήσουμε την μέθοδο του αιτιοκρατικού ισοδύναμου για την γραφή της πιθανοτικής αντικειμενικής συνάρτησης και των πιθανοτικών περιορισμών. Με τον τρόπο αυτό, λαμβάνεται υπόψη η μέση τιμή και η διακύμανση της κατανομής του πιθανοτικού μεγέθους τόσο στους περιορισμούς όσο και στην αντικειμενική συνάρτηση.

### 9.3 Εύρεση αιτιοκρατικού ισοδύναμου υποδείγματος

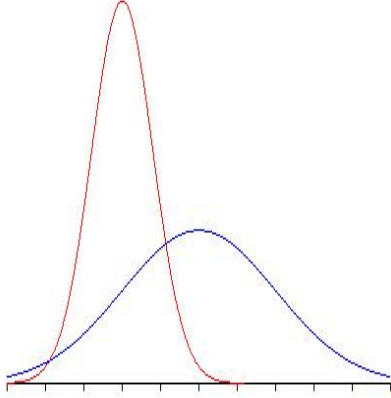
Στην αντικειμενική συνάρτηση του προβλήματος (9-1)  $\tilde{P}(x; d; \tilde{r})$  έχουμε διακρίνει τις παραμέτρους που είναι γνωστές με βεβαιότητα και αυτές που υποτίθενται στοχαστικές με αντίστοιχες πιθανοτικές κατανομές. Όσον αφορά τις στοχαστικές παραμέτρους υποθέτουμε ότι ακολουθούν όπως έχει αναφερθεί κανονική πιθανοτική κατανομή όπως  $\tilde{r} \sim N(\bar{r}, \Sigma_r)$ . Επίσης, γίνεται η υπόθεση ότι οι θεωρούμενες συναρτήσεις είναι γραμμικές ως προς τις στοχαστικές παραμέτρους, έτσι ώστε να μπορεί να βρεθεί η κατανομή της συνάρτησης.

Σύμφωνα με τα παραπάνω η  $\tilde{P}(x; d; \tilde{r})$  ακολουθεί κανονική κατανομή  $\tilde{P}(x; d; \tilde{r}) \sim N(P(x; d; \bar{r}), \Sigma_p^2(x; d; \tilde{r}))$ , όπου  $P(x; d; \bar{r})$  είναι η μέση τιμή της συνάρτησης και  $\Sigma_p^2(x; d; \tilde{r})$  η διακύμανση της συνάρτησης.

για το οποίο επιδιώκεται η μεγιστοποίηση της πιθανότητας να λάβει τιμές μεγαλύτερες ή ίσες μιας τιμής κατωφλίου  $m\pi$ :

$$\max \text{Prob}[\tilde{P}(x; d; \tilde{r}) \geq m\pi] \quad (9-2)$$

Η πιθανοτική κατανομή του μεγέθους  $\tilde{P}(x; \mathbf{d}; \tilde{\mathbf{r}})$  είναι μεταβαλλόμενη και μπορεί να έχει οποιαδήποτε μορφή (Γράφημα 3).



Γράφημα 3: Μορφές της κανονικής κατανομής με διαφορετική μέση τιμή και τυπική απόκλιση

Η **(9-2)** μπορεί να επιλυθεί χρησιμοποιώντας την αθροιστική συνάρτηση κατανομής που προκύπτει για το  $\tilde{P}(x; \mathbf{d}; \tilde{\mathbf{r}})$

$$\frac{1}{2} \left[ 1 + \operatorname{erf} \left( \frac{\tilde{P}(x; \mathbf{d}; \tilde{\mathbf{r}}) - P(x; \mathbf{d}; \bar{\mathbf{r}})}{\Sigma_P(x; \mathbf{d}; \tilde{\mathbf{r}}) \sqrt{2}} \right) \right]$$

όπου  $\Sigma_P(x; \mathbf{d}; \tilde{\mathbf{r}})$  η τυπική απόκλιση της  $\tilde{P}(x; \mathbf{d}; \tilde{\mathbf{r}})$ .

Όμως η συνάρτηση error function είναι αρκετά περίπλοκη συνάρτηση ώστε να χρησιμοποιηθεί σε μεγάλο υπόδειγμα βέλτιστης ανάπτυξης ηλεκτρικού τομέα. Επιπλέον το μέγεθος  $\tilde{P}(x; \mathbf{d}; \tilde{\mathbf{r}})$  είναι η συνάρτηση του κέρδους της επιχείρησης που λειτουργεί στην αγορά η οποία όμως είναι μη γραμμική συνάρτηση της ζήτησης ηλεκτρισμού, της

κατανάλωσης καυσίμου και άλλων παραγόντων, γεγονός που αυξάνει την πολυπλοκότητα.

Για τον λόγο αυτό μετασχηματίζουμε την πιθανοτική κατανομή του μεγέθους  $\tilde{P}(x; \mathbf{d}; \tilde{\mathbf{r}})$  στην τυπική κανονική κατανομή  $\mathcal{N}(0,1)$ :

$$\max \operatorname{Prob} \left[ \frac{\tilde{P}(x; \mathbf{d}; \tilde{\mathbf{r}}) - P(x; \mathbf{d}; \bar{\mathbf{r}})}{\Sigma_P(x; \mathbf{d}; \tilde{\mathbf{r}})} \geq \frac{mp - P(x; \mathbf{d}; \bar{\mathbf{r}})}{\Sigma_P(x; \mathbf{d}; \tilde{\mathbf{r}})} \right] \quad (9-3)$$

Η τυπική κανονική κατανομή ως σταθερή κατανομή έχει σταθερή μορφή και το μέγεθος  $mp$  είναι σταθερό για το πρόβλημα, οπότε η **(9-3)** μπορεί να γραφεί ισοδύναμα:

$$\min \frac{mp - P(x; \mathbf{d}; \bar{\mathbf{r}})}{\Sigma_P(x; \mathbf{d}; \tilde{\mathbf{r}})} \quad (9-4)$$

Ή ισοδύναμα:

$$\max \frac{P(x; \mathbf{d}; \bar{\mathbf{r}})}{\Sigma_P(x; \mathbf{d}; \tilde{\mathbf{r}})} \quad (9-5)$$

Με την υπόθεση ότι το  $mp$  είναι μηδενικό.

Αρά, το πρόβλημα (9-1) εάν θεωρηθεί ότι  $\tilde{r} \sim \mathcal{N}(\bar{r}, \Sigma_r^2)$  μετατρέπεται στο εξής αιτιοκρατικό ισοδύναμό :

$$\begin{aligned} & \max_x \frac{[g - P(x; \mathbf{d}; \bar{r})]}{\Sigma_r} \\ \text{υ.π. } & [\boldsymbol{\pi} - G(x; \mathbf{d}; \bar{r})] - \mathcal{F}^{-1}(\boldsymbol{\gamma}) \cdot \Sigma_r \geq 0 \\ & \Phi(x; \mathbf{d}) \leq \mathbf{b} \end{aligned} \tag{9-6}$$

Όπου  $\mathcal{F}^{-1}$  είναι η αντίστροφη συνάρτηση της κανονικής κατανομής:

$$\mathcal{F}(\boldsymbol{\gamma}) = \int_{-\infty}^{\boldsymbol{\gamma}} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-0.5 \cdot z^2} dz$$

#### 9.4 Ανάπτυξη του πιθανοτικού υποδείγματος

Στην ενότητα αυτή μοντελοποιείται υπόδειγμα προσομοίωσης της αγοράς στην οποία η επιχείρηση λειτουργεί υπό καθεστώς τέλει ανταγωνισμού και εκδηλώνει έντονη αποστροφή προς τον κίνδυνο. Η συμπεριφορά της προσομοιώνεται από τη μέθοδο μεγιστοποίησης της πιθανότητας αποφυγής ζημίας. Στην παρούσα ενότητα θα επεκταθεί το υπόδειγμα όπως αυτό παρουσιάστηκε στο κεφάλαιο 4 ώστε να περιλαμβάνει στοχαστικά μεγέθη.

Οι τιμές των καυσίμων ( $\widetilde{fp}_{i,f,t}$ ), οι τιμές των δικαιωμάτων εκπομπών  $CO_2$  ( $\widetilde{ETSp}_t$ ) και η παράμετρος  $\widetilde{a}_{i,s,t}$  της αντίστροφης συνάρτησης ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας είναι πιθανοτικά μεγέθη.

Η ζήτηση ηλεκτρισμού εξαρτάται από την τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας, η οποία υπολογίζεται ενδογενώς, και είναι αβέβαιη δεδομένου ότι η παράμετρος  $\widetilde{a}_{i,s,t}$  είναι πιθανοτική.

Η αντικειμενική συνάρτηση συνεπώς μπορεί να γραφεί με τον ακόλουθο τρόπο:



$$\max prob \left\{ \sum_{t=1}^T e^{-\delta_t \cdot t} \cdot \left[ \begin{array}{l} \Sigma_i \left[ \begin{array}{l} (\tilde{\alpha}_{i,s,t} - \frac{1}{2} \beta_{i,s,t} \cdot D_{i,s,t}) \cdot D_{i,s,t} \quad (\text{έσοδα}) \\ - \Sigma_f \tilde{f} p_{i,f,t}(F_{i,f,t}) \cdot F_{i,f,t} \\ - \Sigma_n \Sigma_{\tau \leq t} \Sigma_s v c_{i,n,\tau,t}(G_{i,n,\tau,s,t}) \cdot G_{i,n,\tau,s,t} \\ - \Sigma_n \Sigma_{\tau \leq t} f c_{i,n,\tau,t}(K_{i,n,\tau,t}) \cdot K_{i,n,\tau,t} \\ - \Sigma_n (\Sigma_{\tau \leq t} n i_{i,n,\tau,t}(\rho_{i,n,\tau}) \cdot i c p_{i,n,\tau}(\Sigma_{\tau \tau \leq \tau} I_{i,n,\tau \tau,\tau}) \cdot I_{i,n,\tau}) \\ - \Sigma_n (\Sigma_{\tau \leq t} n e_{i,n,\tau,t}(\rho_{i,n,\tau}) \cdot i c e_{i,n,\tau}(\Sigma_{\tau \tau \leq \tau} E I_{i,n,\tau \tau}) \cdot E I_{i,n,\tau}) \\ - c e_{i,t}(\Sigma_{\tau \leq t} E S_{i,\tau}) \cdot E S_{i,t} \\ - \widetilde{ETS} p_t \cdot E M_{i,t} \\ - \Sigma_{\tau \leq t} n p x_{i,\tau,t}(\rho \rho_{i,\tau}) \cdot P C X_{i,\tau,t} \end{array} \right] \right. \\ \left. - \Sigma_t e^{-\delta_t \cdot t} \cdot (\Sigma_k \Sigma_s h r s_s \cdot F L_{k,s,t} \cdot g c u_{k,t}) \right] \right] \geq 0 \quad \left. \right\} \quad (-\text{κόστος}) \quad (9-7)$$

Στο σημείο αυτό πρέπει να διευκρινιστεί η μορφή της **(9-7)(9-11)**. Αυτή η αντικειμενική συνάρτηση αναφέρεται στην βελτιστοποίηση προβλήματος επιχείρησης που λειτουργεί σε αγορά τέλει ανταγωνισμού. Η αγορά υπό καθεστώς τέλει ανταγωνισμού μπορεί να μοντελοποιηθεί με δύο τρόπους σύμφωνα με την βιβλιογραφία. Πρώτον, μπορούμε να γράψουμε το πρόβλημα της κάθε επιχείρησης που λειτουργεί στην αγορά ως πρόβλημα με δεδομένη και εξωγενή την τιμή πώλησης των προϊόντων και το οποελαχιστοποιεί το κόστος παραγωγής. Η τιμή πώλησης των προϊόντων σε αυτή την γραφή προκύπτει ως δυική τιμή της ισορροπίας προσφοράς και ζήτησης. Μια άλλη γραφή της αναπαράστασης αγοράς υπό καθεστώς τέλει ανταγωνισμού είναι η βελτιστοποίηση του κοινωνικού πλεονάσματος, την οποία γραφή έχουμε χρησιμοποιήσει.

Επιπλέον, ο αιτιοκρατικός περιορισμός **(4-26)** του άνω περιθωρίου του κέρδους της επιχείρησης που λειτουργεί στην αγορά μετατρέπεται σε πιθανοτικό περιορισμό του κέρδους, ώστε η πιθανότητα τα έσοδα της επιχείρησης να είναι μικρότερα από το μακροχρόνιο κόστος λειτουργίας πολλαπλασιαζόμενο με ένα επιτρεπόμενο κέρδος  $mu p_t$  να είναι μικρότερη ή ίση μιας τιμής 1-λ:

$$\begin{aligned}
 & \text{prob} \left[ \left( \tilde{\alpha}_{i,s,t} - \beta_{i,s,t} \cdot D_{i,s,t} \right) \cdot D_{i,s,t} \leq (1 + \text{mur}_t) \cdot \left[ \right. \right. \\
 & \quad \sum_f \tilde{f}p_{i,f,t}(F_{i,f,t}) \cdot F_{i,f,t} \\
 & \quad + \sum_n \sum_{\tau \leq t} \sum_s v c_{i,n,\tau,t}(G_{i,n,\tau,s,t}) \cdot G_{i,n,\tau,s,t} \\
 & \quad + \sum_n \sum_{\tau \leq t} f c_{i,n,\tau,t}(K_{i,n,\tau,t}) \cdot K_{i,n,\tau,t} \\
 & \quad + \sum_n \left( \sum_{\tau \leq t} n i_{i,n,\tau,t}(\rho_{i,n,\tau}) \cdot i c p_{i,n,\tau} \left( \sum_{\tau \tau \leq \tau} I_{i,n,\tau \tau,\tau} \right) \cdot I_{i,n,\tau} \right) \\
 & \quad + \sum_n \left( \sum_{\tau \leq t} n e_{i,n,\tau,t}(\rho_{i,n,\tau}) \cdot i c e_{i,n,\tau} \left( \sum_{\tau \tau \leq \tau} E I_{i,n,\tau \tau} \right) \cdot E I_{i,n,\tau} \right) \\
 & \quad + c e_{i,t} \left( \sum_{\tau \leq t} E S_{i,\tau} \right) \cdot E S_{i,t} \\
 & \quad + \widetilde{E T S p}_t \cdot E M_{i,t} \\
 & \quad + \sum_{\tau \leq t} n p x_{i,\tau,t}(\rho \rho_{i,\tau}) \cdot P C X_{i,\tau,t} \\
 & \left. \left. \right] \right] \geq 1 - \lambda
 \end{aligned} \tag{9-8} \quad \forall i, s, t$$

#### 9.4.1 Ύπαρξη και μοναδικότητα λύσης

Ο πιθανοτικός περιορισμός είναι της μορφής **(8-16)** με  $1 - \lambda \geq 0,5$ . Όπως αναλύθηκε στο κεφάλαιο 8.2.1, ο πιθανοτικός περιορισμός ορίζει κυρτό χώρο λύσεων. Επιπλέον, όλοι οι αιτιοκρατικοί περιορισμοί είναι γραμμικές συναρτήσεις, οπότε συνάγεται το συμπέρασμα ότι είναι κυρτές (Rockafellar, Convex Analysis, 1970).

Τα σύνολα  $x$  που προκύπτουν από κυρτή συνάρτηση ως  $\{x | f(x) \leq a\}$  είναι κυρτά. Για δύο σύνολα που είναι κυρτά, ισχύει ότι η τομή τους είναι κυρτό σύνολο (Rockafellar, Convex Analysis, 1970), οπότε προκύπτει ότι ο χώρος εφικτών λύσεων ως τομή των κυρτών συνόλων που ορίζονται από κάθε περιορισμό είναι κυρτό σύνολο.

Στην συνέχεια, αποδεικνύουμε ότι η αντικειμενική συνάρτηση είναι κοίλη. Στη γενική περίπτωση, η αντικειμενική συνάρτηση του προβλήματος είναι της μορφής  $\frac{\mu(x)}{\sigma(x)}$ , όπου  $\mu(x)$  η συνάρτηση της μέσης τιμής και  $\sigma(x)$  η συνάρτηση της τυπικής απόκλισης.

Η πρώτη παράγωγός της υπολογίζεται:

$$\frac{\partial \left( \frac{\mu(x)}{\sigma(x)} \right)}{\partial x} = \frac{\mu'(x)\sigma(x) - \mu(x)\sigma'(x)}{\sigma^2(x)} \quad (9-9)$$

Ισχύει  $\sigma(x) > 0$ ,  $\sigma^2(x) > 0$  και  $\sigma'(x) > 0$ .

Χωρίς βλάβη της γενικότητας υπάρχουν  $q_1, q_2$  με  $q_1 < q_2$  τέτοια ώστε να ισχύει:

$$\mu(q_1) = \mu(q_2) = 0 \quad (9-10)$$

και

Για  $x$  με  $q_1 < x < q_2$ , ισχύει  $\mu(x) > 0$

Για  $x$  με  $q_1 < x < q$ , ισχύει  $\mu'(x) \geq 0$  (9-11)

Για  $x$  με  $q < x < q_2$ , ισχύει  $\mu'(x) \leq 0$

Σε διαφορετική περίπτωση, δηλαδή αν δεν υπήρχε το διάστημα ( $q_1 < q < q_2$ ):  $\mu(q) > 0$ , τότε αυτή δεν είναι μακροχρόνια σταθερή κατάσταση.

Για το σημείο  $q_1$  ισχύει

$$\left. \begin{array}{l} \mu(q_1) = 0 \\ \mu'(q_1) \geq 0 \\ \sigma(q_1) > 0 \\ \sigma'(q_1) > 0 \end{array} \right\} \Rightarrow (9-9) = \frac{\mu'(q_1)\sigma(q_1)}{\sigma^2(q_1)} \geq 0 \quad (9-12)$$

Για το σημείο  $q_2$  ισχύει

$$\left. \begin{array}{l} \mu(q_2) = 0 \\ \mu'(q_2) \leq 0 \\ \sigma(q_2) > 0 \\ \sigma'(q_2) > 0 \end{array} \right\} \Rightarrow (9-9) = \frac{\mu'(q_2)\sigma(q_2)}{\sigma^2(q_2)} \leq 0 \quad (9-13)$$

Για το σημείο  $q$  ισχύει

$$\left. \begin{array}{l} \mu(q) = 0 \\ \mu'(q) \leq 0 \\ \sigma(q) > 0 \\ \sigma'(q) > 0 \end{array} \right\} \Rightarrow (9-9) = \frac{-\mu(q)\sigma'(q)}{\sigma^2(q)} \leq 0 \quad (9-14)$$

Σύμφωνα με το Θεώρημα της Μέσης Τιμής (Rockafellar, Convex Analysis, 1970) λαμβάνοντας υπόψιν ότι οι εν λόγω συναρτήσεις είναι συνεχείς προκύπτει ότι υπάρχει σημείο  $q_k$ ,  $q_1 < q_k < q$  τέτοιο ώστε η πρώτη παράγωγος της αντικειμενικής συνάρτησης να είναι ίση με μηδέν, δηλαδή το βέλτιστο σημείο  $q_k$  της αντικειμενικής συνάρτησης όταν αξιολογείται με τη μέθοδο της μεγιστοποίησης της πιθανότητας αποφυγής ζημίας είναι μεταξύ του  $q_1$  και του βέλτιστου σημείου  $q$  του αιτιοκρατικού υποδείγματος.

### 9.5 Ανάπτυξη του αιτιοκρατικού ισοδύναμου υποδείγματος

Το αιτιοκρατικό ισοδύναμο υπολογίζεται χρησιμοποιώντας τις ιδιότητες της κανονικής κατανομής, πιο συγκεκριμένα ότι ο γραμμικός συνδυασμός μεγεθών που ακολουθούν κανονικές κατανομές προκύπτει μέγεθος που ακολουθεί κανονική κατανομή με μέση τιμή και διακύμανση που μπορούν να υπολογιστούν αναλυτικά, και την (9-6).

Στην αντικειμενική συνάρτηση του αιτιοκρατικού ισοδύναμου προβλήματος επιδιώκεται η μεγιστοποίηση της πιθανότητας η τιμή των συνολικών εσόδων της επιχείρησης που λειτουργεί στην αγορά να υπερβαίνει το συνολικό κόστος (να έχει δηλαδή κέρδος) και μπορεί να γραφεί ως:

$$\max \sum_{t=1}^T e^{-\delta_t \cdot t} \cdot \left\{ \sum_i \left[ \frac{\left( \bar{\alpha}_{i,s,t} - \frac{1}{2} \beta_{i,s,t} \cdot D_{i,s,t} \right) \cdot D_{i,s,t}}{\left[ \sum_{t=1}^T e^{-\delta_t \cdot t} \left[ \sum_i \sigma_{i,t,1}^2 + \sigma_{i,t,2}^2 + 2 \cdot Cov_{i,t} + \sigma_{i,t,3}^2 \right] \right]^{\frac{1}{2}}} \right. \right.$$

$$\frac{\sum_f \overline{fp}_{i,f,t} (F_{i,f,t}) \cdot F_{i,f,t}}{\left[ \sum_{t=1}^T e^{-\delta_t \cdot t} \left[ \sum_i \sigma_{i,t,1}^2 + \sigma_{i,t,2}^2 + 2 \cdot Cov_{i,t} + \sigma_{i,t,3}^2 \right] \right]^{\frac{1}{2}}}$$

$$\frac{\sum_n \sum_{\tau \leq t} \sum_s vc_{i,n,\tau,t} (G_{i,n,\tau,s,t}) \cdot G_{i,n,\tau,s,t}}{\left[ \sum_{t=1}^T e^{-\delta_t \cdot t} \left[ \sum_i \sigma_{i,t,1}^2 + \sigma_{i,t,2}^2 + 2 \cdot Cov_{i,t} + \sigma_{i,t,3}^2 \right] \right]^{\frac{1}{2}}}$$

$$\frac{\sum_n \sum_{\tau \leq t} fc_{i,n,\tau,t} (K_{i,n,\tau,t}) \cdot K_{i,n,\tau,t}}{\left[ \sum_{t=1}^T e^{-\delta_t \cdot t} \left[ \sum_i \sigma_{i,t,1}^2 + \sigma_{i,t,2}^2 + 2 \cdot Cov_{i,t} + \sigma_{i,t,3}^2 \right] \right]^{\frac{1}{2}}}$$

$$\frac{\sum_n (\sum_{\tau \leq t} ni_{i,n,\tau,t} (\rho_{i,n,\tau}) \cdot icp_{i,n,\tau} (\sum_{\tau \leq t} I_{i,n,\tau,\tau}) \cdot I_{i,n,\tau})}{\left[ \sum_{t=1}^T e^{-\delta_t \cdot t} \left[ \sum_i \sigma_{i,t,1}^2 + \sigma_{i,t,2}^2 + 2 \cdot Cov_{i,t} + \sigma_{i,t,3}^2 \right] \right]^{\frac{1}{2}}}$$

$$\frac{\sum_n (\sum_{\tau \leq t} ne_{i,n,\tau,t} (\rho_{i,n,\tau}) \cdot ice_{i,n,\tau} (\sum_{\tau \leq t} EI_{i,n,\tau,\tau}) \cdot EI_{i,n,\tau})}{\left[ \sum_{t=1}^T e^{-\delta_t \cdot t} \left[ \sum_i \sigma_{i,t,1}^2 + \sigma_{i,t,2}^2 + 2 \cdot Cov_{i,t} + \sigma_{i,t,3}^2 \right] \right]^{\frac{1}{2}}}$$

$$\frac{ce_{i,t} (\sum_{\tau \leq t} ES_{i,\tau}) \cdot ES_{i,t}}{\left[ \sum_{t=1}^T e^{-\delta_t \cdot t} \left[ \sum_i \sigma_{i,t,1}^2 + \sigma_{i,t,2}^2 + 2 \cdot Cov_{i,t} + \sigma_{i,t,3}^2 \right] \right]^{\frac{1}{2}}}$$

$$\frac{\overline{ETSp}_t \cdot EM_{i,t}}{\left[ \sum_{t=1}^T e^{-\delta_t \cdot t} \left[ \sum_i \sigma_{i,t,1}^2 + \sigma_{i,t,2}^2 + 2 \cdot Cov_{i,t} + \sigma_{i,t,3}^2 \right] \right]^{\frac{1}{2}}}$$

$$\frac{\sum_{\tau \leq t} npx_{i,\tau,t} (\rho_{i,\tau}) \cdot PCX_{i,\tau,t}}{\left[ \sum_{t=1}^T e^{-\delta_t \cdot t} \left[ \sum_i \sigma_{i,t,1}^2 + \sigma_{i,t,2}^2 + 2 \cdot Cov_{i,t} + \sigma_{i,t,3}^2 \right] \right]^{\frac{1}{2}}}$$

$$\left. \left[ \frac{\sum_t e^{-\delta_t \cdot t} \cdot (\sum_k \sum_s hrs_s \cdot FL_{k,s,t} \cdot gcuk_t)}{\left[ \sum_{t=1}^T e^{-\delta_t \cdot t} \left[ \sum_i \sigma_{i,t,1}^2 + \sigma_{i,t,2}^2 + 2 \cdot Cov_{i,t} + \sigma_{i,t,3}^2 \right] \right]^{\frac{1}{2}}} \right] \right\} \tag{9-15}$$

Όπου:  $\Sigma_P^2 = \sum_{t=1}^T e^{-\delta_t \cdot t} \left[ \sum_i \sigma_{i,t,1}^2 + \sigma_{i,t,2}^2 + 2 \cdot Cov_{i,t} + \sigma_{i,t,3}^2 \right]$  η διακύμανση του συνολικού κέρδους τους συστήματος

$[\sigma_{i,t,1}^2 + \sigma_{i,t,2}^2 + 2 \cdot Cov_{i,t} + \sigma_{i,t,3}^2]$  η διακύμανση του ετήσιου κέρδους. Προκύπτει ως άθροισμα της διακύμανσης των πιθανοτικών τιμών των καυσίμων ( $\sigma_{i,t,1}^2$ ), της διακύμανσης των πιθανοτικών τιμών αγοράς των δικαιωμάτων εκπομπών  $CO_2$  ( $\sigma_{i,t,2}^2$ ), της συν διακύμανσης των τιμών των καυσίμων με τις

τιμές αγοράς των δικαιωμάτων εκπομπών  $CO_2$  ( $Cov_{i,t}$ ) και της διακύμανσης του του σταθερού όρου της αντίστροφης συνάρτησης ζήτησης ( $\sigma^2_{i,t,3}$ ):

$$\sigma^2_{i,t,1} = \sum_f (F_{i,f,t}) \cdot Vf_{i,t,f,f} \cdot (F_{i,f,t}) \quad \forall i, t \quad (9-16)$$

$$\sigma^2_{i,t,2} = EM_{i,t}^2 \sigma_{ETSp}^2 \quad \forall i, t \quad (9-17)$$

$$Cov_{i,t} = \sum_f F_{i,f,t} \cdot CovFE_t \cdot EM_{i,t} + \sum_f \sum_{ff \neq f} (F_{i,f,t}) \cdot Vf_{i,t,f,ff} \cdot (F_{i,ff,t}) \quad \forall i, t \quad (9-18)$$

$$\sigma^2_{i,t,3} = \sum_s D_{i,s,t}^2 \sigma_{\alpha_{i,s,t}}^2 \quad \forall i, t \quad (9-19)$$

$Vf_{i,t,f,ff}$  ο πίνακας συσχέτισης των τιμών των καυσίμων

Ο πιθανοτικός περιορισμός (9-8) γράφεται:

$$\begin{aligned} & (\bar{\alpha}_{i,s,t} - \beta_{i,s,t} \cdot D_{i,s,t}) \cdot D_{i,s,t} - (1 + mur_t) \cdot \left[ \right. \\ & \sum_f \bar{fp}_{i,f,t} (F_{i,f,t}) \cdot F_{i,f,t} \\ & + \sum_n \sum_{\tau \leq t} \sum_s vc_{i,n,\tau,t} (G_{i,n,\tau,s,t}) \cdot G_{i,n,\tau,s,t} \\ & + \sum_n \sum_{\tau \leq t} fc_{i,n,\tau,t} (K_{i,n,\tau,t}) \cdot K_{i,n,\tau,t} \\ & + \sum_n \left( \sum_{\tau \leq t} ni_{i,n,\tau,t} (\rho_{i,n,\tau}) \cdot icp_{i,n,\tau} \left( \sum_{\tau\tau \leq \tau} I_{i,n,\tau\tau,\tau} \right) \cdot I_{i,n,\tau} \right) \\ & + \sum_n \left( \sum_{\tau \leq t} ne_{i,n,\tau,t} (\rho_{i,n,\tau}) \cdot ice_{i,n,\tau} \left( \sum_{\tau\tau \leq \tau} EI_{i,n,\tau\tau} \right) \cdot EI_{i,n,\tau} \right) \\ & + ce_{i,t} \left( \sum_{\tau \leq t} ES_{i,\tau} \right) \cdot ES_{i,t} \\ & + \overline{ETSp}_t \cdot EM_{i,t} \\ & \left. + \sum_{\tau \leq t} npx_{i,\tau,t} (\rho_{i,\tau}) \cdot PCX_{i,\tau,t} \right] \\ & \leq \mathcal{F}^{-1}(\lambda) \cdot \left[ (1 + mur_t)^2 \cdot [\sigma^2_{i,t,1} + \sigma^2_{i,t,2} + 2 \cdot Cov_{i,t} + \sigma^2_{i,t,3}] \right]^{\frac{1}{2}} \end{aligned} \quad \forall i, s, t \quad (9-20)$$

Οι υπόλοιποι περιορισμοί παραμένουν όπως στο αιτιοκρατικό υπόδειγμα.

Για την επίλυση του προβλήματος αυτού, η προσομοίωση των τιμών των στοχαστικών μεγεθών του προβλήματος έγινε με δειγματοληψία των κανονικών κατανομών θεωρώντας τα μεγέθη συσχετισμένα σύμφωνα με πίνακα διακύμανσης – συν διακύμανσης, όπως αναλύθηκε στο κεφάλαιο 3.3.

Για την προσομοίωση των πιθανοτικών περιορισμών έγινε χρήση δυαδικών μεταβλητών. Το πλήθος των δυαδικών μεταβλητών που χρησιμοποιήθηκαν για την προσομοίωση των πιθανοτικών περιορισμών ισούται με το πλήθος των διαφορετικών αντιπροσωπευτικών σεναρίων εξέλιξης των πιθανοτικών παραμέτρων (συγκεκριμένα 100). Για κάθε σενάριο των πιθανοτικών παραμέτρων η αντίστοιχη δυαδική μεταβλητή παίρνει τιμή 1 όταν ο περιορισμός ικανοποιείται και 0 όταν παραβιάζεται. Η αθροιστική πιθανότητα που προκύπτει από τα σενάρια στα οποία οι περιορισμοί ικανοποιούνται πρέπει να είναι μικρότερη ή ίση από το κατώφλι που έχει οριστεί για κάθε πιθανοτικό περιορισμό. Με όμοιο τρόπο, δηλαδή με χρήση δυαδικών μεταβλητών, έγινε η μοντελοποίηση της αντικειμενικής συνάρτησης. Για κάθε δείγμα των πιθανοτικών παραμέτρων η αντίστοιχη δυαδική μεταβλητή παίρνει τιμή 1 όταν τα έσοδα είναι μεγαλύτερα από το κόστος (το σύστημα έχει κέρδος) και 0 όταν συμβαίνει το αντίθετο. Ζητούμενο είναι η μεγιστοποίηση της αθροιστικής πιθανότητας των σεναρίων για τα οποία το σύστημα έχει κέρδη.

Κατ' αυτόν τον τρόπο, το πρόβλημα επιλύθηκε με τη μέθοδο του ακέραιου προγραμματισμού.

## 9.6 Σύγκριση βέλτιστης λύσης της μεθόδου αξιολόγησης της πιθανοτικής κατανομής της αντικειμενικής συνάρτησης με χρήση της προσέγγισης του Markowitz με τη βέλτιστη λύση της μεθόδου μεγιστοποίησης της πιθανότητας αποφυγής ζημίας

Σύμφωνα με την **(8-18)**, για τη βέλτιστη λύση της μεθόδου αξιολόγησης κινδύνου με χρήση της προσέγγισης του Markowitz ισχύει:

$$\begin{aligned}\mu'(x) - A\sigma'(x) &= 0 \Rightarrow \\ \mu'(q_k) &= A\sigma'(q_k)\end{aligned}\tag{9-21}$$

Σύμφωνα με την **(9-9)**, για τη βέλτιστη λύση της μεθόδου μεγιστοποίησης αποφυγής ζημίας ισχύει:

$$\begin{aligned}\mu'(q_\kappa)\sigma(q_\kappa) - \mu(q_\kappa)\sigma'(q_\kappa) &= 0 \Rightarrow \\ \mu'(q_\kappa)\sigma(q_\kappa) &= \mu(q_\kappa)\sigma'(q_\kappa) \Rightarrow \\ \mu'(q_\kappa) &= \frac{\mu(q_\kappa)}{\sigma(q_\kappa)}\sigma'(q_\kappa)\end{aligned}\tag{9-22}$$

Όπως είναι εμφανές από τη σύγκριση των **(9-21),(9-22)** στην περίπτωση που ο συντελεστής  $A$  τείνει στο  $\frac{\mu(q_\kappa)}{\sigma(q_\kappa)}$  τότε η βέλτιστη λύση της μεθόδου με χρήση της προσέγγισης του Markowitz τείνει να γίνει ίση της βέλτιστης λύσης της μεθόδου μεγιστοποίησης πιθανότητας αποφυγής ζημίας.

Για  $A \gg 0.00$  δηλαδή μεγάλο, δεδομένου ότι  $\sigma'(x) > 0$ , για να ισχύει  $\mu'(q_\kappa) = A\sigma'(q_\kappa)$ , μπορεί να επιλεγεί σημείο  $q_\kappa$  τέτοιο ώστε  $q_\kappa < q_1$  με το  $q_1$  όπως στην **(8-21)**. Εάν όμως  $q_\kappa < q_1$ , η επιχείρηση μακροχρόνια θα έχει ζημία και θα επιλέξει να μη λειτουργεί. Για το λόγο αυτό, συνάγεται το συμπέρασμα πως  $q_\kappa \geq q_1$ .

Αντίθετα για τη βέλτιστη λύση που προκύπτει από το υπόδειγμα το οποίο χρησιμοποιεί τη μέθοδο μεγιστοποίησης της πιθανότητας αποφυγής ζημίας ισχύει:

Εάν  $q_\kappa \rightarrow q_1$ :

$$\begin{aligned}x &\rightarrow q_1 \Rightarrow \\ \mu(q_\kappa) &\rightarrow \mu(q_1) = 0 \Rightarrow \\ \frac{\mu(q_\kappa)}{\sigma(q_\kappa)} &\rightarrow 0 \Rightarrow \\ \mu'(q_\kappa) &\rightarrow 0\end{aligned}\tag{9-23}$$

Αλλά  $\mu'(q_\kappa) > 0$ , οπότε η βέλτιστη λύση  $q_\kappa$  δεν μπορεί να τείνει στην  $q_1$ .

Εάν  $q_\kappa \rightarrow q$  (βέλτιστη λύση αιτιοκρατικού υποδείγματος):

$$\begin{aligned}x &\rightarrow q \Rightarrow \\ \mu(q_\kappa) &\rightarrow \mu(q) > 0 \Rightarrow \\ \mu'(q_\kappa) &= \frac{\mu(q_\kappa)}{\sigma(q_\kappa)}\sigma'(q_\kappa) > 0\end{aligned}\tag{9-24}$$



Αλλά  $\mu'(q_k) > 0$ , οπότε η βέλτιστη λύση  $q_k$  δεν μπορεί να λάβει την τιμή  $q_1$ .

Συνεπώς η βέλτιστη λύση βρίσκεται στο διάστημα  $(q_1, q)$  σε αντίθεση με το υπόδειγμα που μορφοποιείται σύμφωνα με την προσέγγιση του Markowitz στο οποίο η λύση βρίσκεται στο διάστημα  $[q_1, q]$ .

### 9.7 Μοντελοποίηση ατελούς ανταγωνισμού στο υπόδειγμα μεγιστοποίησης αποφυγής ζημίας – ισορροπία κατά Nash-Cournot

Στα προηγούμενα υποκεφάλαια αναλύθηκε η αγορά στην οποία οι επιχειρήσεις δραστηριοποιούνται υπό καθεστώς τέλει ανταγωνισμού. Στο υποκεφάλαιο αυτό αναλύεται η αγορά στην οποία οι επιχειρήσεις δραστηριοποιούνται υπό καθεστώς ατελούς ανταγωνισμού και υποθέτουμε ότι επιτυγχάνεται ισορροπία κατά Nash-Cournot. Στην περίπτωση του ανταγωνισμού κατά Cournot οι επιχειρήσεις που λειτουργούν στην αγορά γνωρίζουν την συνάρτηση ζήτησης, θεωρούν δεδομένη την παραγωγή των άλλων επιχειρήσεων και προσπαθούν να μεγιστοποιήσουν το κέρδος τους μεταβάλλοντας την δική τους παραγωγή.

Η τιμή ηλεκτρισμού στο πρόβλημα μεγιστοποίησης για κάθε επιχείρηση δεν είναι εξωγενής παράμετρος του προβλήματος αλλά συνάρτηση των ιδίων της πωλήσεων καθώς και των πωλήσεων των υπολοίπων επιχειρήσεων που δραστηριοποιούνται στην αγορά.

Σε αυτήν την υποενότητα η αντίστροφη συνάρτηση ζήτησης είναι γραμμική, όπως παρουσιάζεται στην εξίσωση **(4-69)**, συνεπώς στο πρόβλημα μεγιστοποίησης του κέρδους κάθε επιχείρησης, το κέρδος κάθε επιχείρησης αναπαρίσταται όπως παρουσιάζεται στην εξίσωση **(4-70)**.

Η αντικειμενική συνάρτηση του προβλήματος μεγιστοποίησης της κάθε επιχείρησης όταν στην αγορά επικρατεί ανταγωνισμός κατά Cournot γίνεται

$$\begin{aligned}
 & \max \sum_{t=1}^T e^{-\delta_t \cdot t} \cdot \left\{ \sum_i \left[ \frac{\sum_s n h_s \cdot S l_{f m, i, s, t} \cdot \left( a_{i, s, t} - b_{i, s, t} \cdot \left( S l_{f m, i, s, t} + \sum_{f m 1 \neq f m} \bar{S} l_{f m 1, i, s, t} \right) \right)}{\left[ \sum_{t=1}^T e^{-\delta_t \cdot t} \left[ \sum_i \sigma^2_{i, t, 1} + \sigma^2_{i, t, 2} + 2 \cdot C o v_{i, t} + \sigma^2_{i, t, 3} \right] \right]^{\frac{1}{2}}} \right. \right. \\
 & - \frac{\sum_f \bar{f} p_{i, f, t} (F_{i, f, t}) \cdot F_{i, f, t}}{\left[ \sum_{t=1}^T e^{-\delta_t \cdot t} \left[ \sum_i \sigma^2_{i, t, 1} + \sigma^2_{i, t, 2} + 2 \cdot C o v_{i, t} + \sigma^2_{i, t, 3} \right] \right]^{\frac{1}{2}}} \\
 & - \frac{\sum_n \sum_{\tau \leq t} \sum_s v c_{i, n, \tau, t} (G_{i, n, \tau, s, t}) \cdot G_{i, n, \tau, s, t}}{\left[ \sum_{t=1}^T e^{-\delta_t \cdot t} \left[ \sum_i \sigma^2_{i, t, 1} + \sigma^2_{i, t, 2} + 2 \cdot C o v_{i, t} + \sigma^2_{i, t, 3} \right] \right]^{\frac{1}{2}}} \\
 & - \frac{\sum_n \sum_{\tau \leq t} f c_{i, n, \tau, t} (K_{i, n, \tau, t}) \cdot K_{i, n, \tau, t}}{\left[ \sum_{t=1}^T e^{-\delta_t \cdot t} \left[ \sum_i \sigma^2_{i, t, 1} + \sigma^2_{i, t, 2} + 2 \cdot C o v_{i, t} + \sigma^2_{i, t, 3} \right] \right]^{\frac{1}{2}}} \\
 & - \frac{\sum_n (\sum_{\tau \leq t} n i_{i, n, \tau, t} (\rho_{i, n, \tau}) \cdot i c p_{i, n, \tau} (\sum_{\tau \leq \tau} I_{i, n, \tau, \tau}) \cdot I_{i, n, \tau})}{\left[ \sum_{t=1}^T e^{-\delta_t \cdot t} \left[ \sum_i \sigma^2_{i, t, 1} + \sigma^2_{i, t, 2} + 2 \cdot C o v_{i, t} + \sigma^2_{i, t, 3} \right] \right]^{\frac{1}{2}}} \\
 & - \frac{\sum_n (\sum_{\tau \leq t} n e_{i, n, \tau, t} (\rho_{i, n, \tau}) \cdot i c e_{i, n, \tau} (\sum_{\tau \leq \tau} E I_{i, n, \tau, \tau}) \cdot E I_{i, n, \tau})}{\left[ \sum_{t=1}^T e^{-\delta_t \cdot t} \left[ \sum_i \sigma^2_{i, t, 1} + \sigma^2_{i, t, 2} + 2 \cdot C o v_{i, t} + \sigma^2_{i, t, 3} \right] \right]^{\frac{1}{2}}} \\
 & - \frac{c e_{i, t} (\sum_{\tau \leq t} E S_{i, \tau}) \cdot E S_{i, t}}{\left[ \sum_{t=1}^T e^{-\delta_t \cdot t} \left[ \sum_i \sigma^2_{i, t, 1} + \sigma^2_{i, t, 2} + 2 \cdot C o v_{i, t} + \sigma^2_{i, t, 3} \right] \right]^{\frac{1}{2}}} \\
 & - \frac{\overline{E T S p}_t \cdot E M_{i, t}}{\left[ \sum_{t=1}^T e^{-\delta_t \cdot t} \left[ \sum_i \sigma^2_{i, t, 1} + \sigma^2_{i, t, 2} + 2 \cdot C o v_{i, t} + \sigma^2_{i, t, 3} \right] \right]^{\frac{1}{2}}} \\
 & - \frac{\sum_{\tau \leq t} n p x_{i, \tau, t} (\rho \rho_{i, \tau}) \cdot P C X_{i, \tau, t}}{\left[ \sum_{t=1}^T e^{-\delta_t \cdot t} \left[ \sum_i \sigma^2_{i, t, 1} + \sigma^2_{i, t, 2} + 2 \cdot C o v_{i, t} + \sigma^2_{i, t, 3} \right] \right]^{\frac{1}{2}}} \\
 & \left. \right\} - \frac{\sum_t e^{-\delta_t \cdot t} \cdot (\sum_k \sum_s h r s_s \cdot F L_{k, s, t} \cdot g c u_{k, t})}{\left[ \sum_{t=1}^T e^{-\delta_t \cdot t} \left[ \sum_i \sigma^2_{i, t, 1} + \sigma^2_{i, t, 2} + 2 \cdot C o v_{i, t} + \sigma^2_{i, t, 3} \right] \right]^{\frac{1}{2}}} \quad (9-25)
 \end{aligned}$$

Όπου:  $\Sigma_P^2 = \sum_{t=1}^T e^{-\delta_t \cdot t} [\sum_i \sigma^2_{i, t, 1} + \sigma^2_{i, t, 2} + 2 \cdot C o v_{i, t} + \sigma^2_{i, t, 3}]$  η διακύμανση του συνολικού κέρδους τους συστήματος

$[\sigma^2_{i, t, 1} + \sigma^2_{i, t, 2} + 2 \cdot C o v_{i, t} + \sigma^2_{i, t, 3}]$  η διακύμανση του ετήσιου κέρδους, η οποία υπολογίζεται με χρήση των (9-16), (9-17), (9-18) και (9-19) με την σημείωση ότι τα μεγέθη αφορούν την μια από τις συμμετρικές επιχειρήσεις που λειτουργούν στην αγοράς

Οι προϋποθέσεις για την κυρτότητα του χώρου εφικτών λύσεων ισχύουν όπως έχουν αναλυθεί στο υποκεφάλαιο 4.3.12. Η αντικειμενική συνάρτηση είναι γνησίως κοίλη ως γραμμικός συνδυασμός γνησίως κοίλων συναρτήσεων. Άρα προκύπτει ότι το πρόβλημα της κάθε επιχείρησης έχει μοναδικό βέλτιστο. Συνεπώς, οι συνθήκες πρώτης τάξεως είναι αναγκαίες και ικανές για την επίλυση του προβλήματος και την εύρεση την μοναδικής βέλτιστης λύσης.

Το μοντέλο επιλύεται με χρήση των αρχών της μικτής συμπληρωματικότητας όπως έχουν εξηγηθεί στο υποκεφάλαιο 3.5. Οι περιορισμοί που αφορούν την λειτουργία των μονάδων ανάγονται στην κάθε επιχείρηση. Για τους περιορισμούς που αφορούν το σύστημα, όπως οι περιορισμοί εφεδρείας, έχει γίνει η υπόθεση ότι ο διαχειριστής του συστήματος επιβάλλει ανάλογο περιορισμό στο μέρος της ζήτησης που καλύπτει η κάθε επιχείρηση.

Σε ατελή ανταγωνισμό, η επιχείρηση που δραστηριοποιείται στην αγορά έχει τη δυνατότητα να επηρεάσει την τιμή του ηλεκτρισμού ώστε να αντισταθμίσει μέρος της αβεβαιότητας σχετικά με την ανάκτηση του κεφαλαιουχικού κόστους των επενδύσεων. Στο σημείο αυτό πρέπει να διευκρινίσουμε ότι δεν έχουμε μοντελοποιήσει τον ρυθμιστή της αγοράς ως ξεχωριστό παίκτη αλλά τον έχουμε μοντελοποιήσει έμμεσα στο πρόβλημα βελτιστοποίησης της κάθε επιχείρησης. Ο ρυθμιστής της αγοράς θα επενέβαινε στην περίπτωση που οι επιχειρήσεις έκαναν κατάχρηση της ολιγοπωλιακής τους θέσης στην αγορά και αύξαναν υπέρμετρα τις τιμές ηλεκτρισμού δρώντας σαν καρτέλ.. Στην περίπτωση αυτή, θα επενέβαινε ο ρυθμιστής ώστε οι τιμές ηλεκτρισμού να μην αποκλίνουν σημαντικά από το συνολικό κόστος της κάθε επιχείρησης πλέον του εύλογου κέρδους τους για την ανάληψη ρίσκου. Έτσι η κάθε επιχείρηση φοβούμενη ότι μπορεί να προκαλέσει την ανάμειξη του ρυθμιστή έχει ενσωματώσει στο πρόβλημά της περιορισμό σχετικά με την πιθανότητα το κέρδος της να ξεπεράσει κάποιο άνω όριο κέρδους. Ο περιορισμός σχετικά με το άνω όριο στην πιθανότητα το κέρδος της επιχείρησης να ξεπεράσει κάποιο άνω όριο είναι όπως παρακάτω

$$Prob[ Έσοδα \geq (1 + \mu) * Έξοδα ] \leq 0.05 \quad (9-26)$$

όπου στον παραπάνω περιορισμό η μαθηματική γραφή των εσόδων και των εξόδων της κάθε επιχείρησης είναι όπως στην αντικειμενική συνάρτηση(9-25),  $\mu$  είναι το άνω ποσοστό που η κάθε επιχείρηση θεωρεί ότι μπορεί να δικαιολογηθεί σαν εύλογο στον ρυθμιστή

Στην συνέχεια θα αναπτύξουμε ένα πιο απλό υπόδειγμα αναπαράστασης επιχείρησης που λειτουργεί στην ηλεκτρική αγορά υπό ατελή ανταγωνισμό κατά Nash-Cournot ώστε

να καταδείξουμε τις συνθήκες πρώτης τάξεως που οδηγούν στην βέλτιστη λύση καθώς και την επίδραση της αβεβαιότητας στην βέλτιστη λύση σε αντιδιαστολή με τις αντίστοιχες συνθήκες του αιτιοκρατικού υποδείγματος.

Θεωρούμε ότι αντίστροφη συνάρτηση ζήτησης είναι  $\tilde{a} - \beta(q + Q_{-i})$  με  $\tilde{a}$  να είναι το σταθερό σημείο γνωστό ως πιθανοτική κατανομή και  $\beta$  η κλίση.  $q$  είναι η ποσότητα ηλεκτρισμού που παράγει η μία από τις συμμετρικές επιχειρήσεις και  $Q_{-i}$  είναι η ποσότητα που παράγουν οι υπόλοιπες συμμετρικές επιχειρήσεις στην αγορά. Επιπλέον υποθέτουμε ότι το σταθερό μέρος του κόστους συμβολίζεται με  $C$  και το μεταβλητό μέρος  $\tilde{MC}$ . Με το σύμβολο  $\tilde{\cdot}$  συμβολίζονται οι εξωγενείς του προβλήματος παράμετροι που θεωρούνται πιθανοτικά μεγέθη που ακολουθούν κανονική κατανομή με ορισμένο πίνακα διακύμανσης συν-διακύμανσης και μέση τιμή. Έτσι το πρόβλημα βελτιστοποίησης της μιας από τις συμμετρικές επιχειρήσεις στην αγορά είναι

$$MAX_q \frac{(\bar{a} - \beta(q + Q_{-i}))q - \left(\frac{C}{v} + \bar{MC} q\right)}{\sqrt{q^2 \sigma_a^2 + q^2 \sigma_{MC}^2}} \quad (9-27)$$

$$s.t. \quad h(q) \geq 0 \perp \lambda$$

$$g(q) = 0 \perp k \quad (9-28)$$

Χρησιμοποιώντας τις συνθήκες πρώτης τάξεως για την εύρεση της βέλτιστης παραγόμενης ποσότητας και θεωρώντας τις  $h(q)$  και  $g(q)$  γραμμικές ως προς  $q$  με συντελεστή γραμμικότητας ένα προκύπτει ότι

Από την (9-27) χρησιμοποιώντας τις συνθήκες πρώτης τάξεως προκύπτει

$$\frac{-\beta q + \frac{C}{vq}}{q\sqrt{\sigma_a^2 + \sigma_{MC}^2}} - \lambda - k = 0 \quad (9-29)$$

και

$$q = \sqrt{\frac{C}{v\beta \left(1 + \frac{(\lambda + k)\sqrt{\sigma_a^2 + \sigma_{MC}^2}}{\beta}\right)}} \quad (9-30)$$

Από τις παραπάνω σχέσεις προκύπτει ότι στο υπόδειγμα μεγιστοποίησης αποφυγής ζημίας η βέλτιστη ποσότητα ηλεκτρισμού προκύπτει ότι εξαρτάται από το σταθερό

κόστος που η επιχείρηση πρέπει να ανακτήσει από την αγορά καθώς και από το μέγεθος της αβεβαιότητας.

### 9.7.1 Επίδραση της αβεβαιότητας στην βέλτιστη λύση του ατελούς ανταγωνισμού ισορροπία κατά Nash-Cournot στο πρόβλημα μεγιστοποίησης πιθανότητας αποφυγής ζημίας

Στο υποκεφάλαιο 8.3.1 αναπτύχθηκε και εξηγήθηκε η βέλτιστη πωλούμενη ποσότητα ηλεκτρισμού στην αγορά σε καθεστώς μακροχρόνιας ανταγωνιστικής ισορροπίας

$$Q = \frac{a - MC - \Phi^{-1}(m) \sqrt{\sigma_a^2 + \sigma_{MC}^2} + \sqrt{\left(a - MC - \Phi^{-1}(m) \sqrt{\sigma_a^2 + \sigma_{MC}^2}\right)^2 - 4\beta C}}{2\beta} \quad (9-31)$$

Συνδυάζοντας την (9-31) με την (9-30) προκύπτει ότι ο βέλτιστος αριθμός επιχειρήσεων στην αγορά είναι

$$v = \frac{\left(1 + \frac{(\lambda + k) \sqrt{\sigma_a^2 + \sigma_{MC}^2}}{\beta}\right)}{4C\beta} \left[ a - MC - \Phi^{-1}(m) \sqrt{\sigma_a^2 + \sigma_{MC}^2} + \sqrt{\left(a - MC - \Phi^{-1}(m) \sqrt{\sigma_a^2 + \sigma_{MC}^2}\right)^2 - 4\beta C} \right]^2 \quad (9-32)$$

Από την παραπάνω σχέση προκύπτει ότι με την αύξηση της αβεβαιότητας (αύξηση της διακύμανσης-τυπικής απόκλισης) μειώνεται ο βέλτιστος αριθμός των επιχειρήσεων στην αγορά σε λογικό εύρος τιμών των εξωγενών παραμέτρων

Επιπλέον προκύπτει ότι καθώς αυξάνει το σταθερό κόστος που αναλαμβάνει η επιχείρηση κατά την λειτουργία της στην αγορά .μειώνεται ο βέλτιστος αριθμός των επιχειρήσεων αφού η κάθε επιχείρηση πρέπει να έχει μεγαλύτερες πωλήσεις ώστε να μεγιστοποιήσει την πιθανότητα να ανακτήσει το κεφαλαιουχικό της κόστος.

Συγκρίνοντας την (8-31) στην περίπτωση όπου  $\Phi^{-1}(m) = A$  δηλαδή στην περίπτωση η πιθανότητα-στόχος της επιχείρησης για μακροχρόνιο κέρδος είναι ίδια με την πιθανότητα που η επιχείρησης θέτει κατά την λειτουργία της το κέρδος της να είναι θετικό προκύπτει το εξής συμπέρασμα. Ο βέλτιστος αριθμός επιχειρήσεων στην αγορά και η βέλτιστη ποσότητα παραγωγής της κάθε επιχείρησης ταυτίζονται με τον βέλτιστο αριθμό επιχειρήσεων και παραγόμενης ποσότητας του υποδείγματος μεγιστοποίησης αποφυγής ζημίας συνδυασμένο με τον περιορισμό μακροχρόνιας ανταγωνιστικής λειτουργίας.



## Κεφάλαιο 10

### 10 Αξιολόγηση της πιθανοτικής κατανομής της αντικειμενικής συνάρτησης με χρήση της μεθόδου Αξίας σε Κίνδυνο (Value at Risk – VaR) με κατώφλι πιθανότητας $\alpha$

---

Η επιχείρηση που λειτουργεί σε αγορά ηλεκτρικής ενέργειας λαμβάνει αποφάσεις σε περιβάλλον με αβεβαιότητα, οι οποίες περιλαμβάνουν αποφάσεις για επενδύσεις που θα πραγματοποιήσει είτε αυτές αναφέρονται σε κατασκευή νέων μονάδων είτε σε ανακαίνιση ήδη υπαρχόντων, καθώς και αποφάσεις που αφορούν τη λειτουργία των διαθέσιμων μονάδων της. Οι αποφάσεις αυτές εξαρτώνται από την συμπεριφορά της απέναντι στον κίνδυνο. Για μια επιχείρηση ηλεκτροπαραγωγής που λειτουργεί σε αγορά υπό καθεστώς ανταγωνισμού συχνά αποτελεί στόχος η αποφυγή ακραίων σεναρίων, πιο συγκεκριμένα η αποφυγή ζημίας μεγαλύτερης μιας δεδομένης τιμής.

Συνεπώς, στόχος της επιχείρησης είναι η λήψη αποφάσεων οι οποίες θα της εξασφαλίσουν με δεδομένο κατώφλι πιθανότητας ότι η ζημία της δεν θα ξεπεράσει μια συγκεκριμένη τιμή. Με άλλα λόγια στόχος της επιχείρησης αποτελεί η λήψη εκείνων των αποφάσεων οι οποίες θα της εξασφαλίσουν ότι το κέρδος της θα είναι μεγαλύτερο μιας δεδομένης τιμής με δεδομένο κατώφλι πιθανότητας. Για την προσομοίωση της συμπεριφοράς αυτής αναπτύσσεται υπόδειγμα το οποίο αποτελεί επέκταση του υποδείγματος όπως παρουσιάστηκε στο κεφάλαιο 4 ώστε να περιλαμβάνει πιθανοτικά μεγέθη, και συνεπώς πιθανοτική αντικειμενική συνάρτηση, η αξιολόγηση της οποίας γίνεται με χρήση της Αξίας σε Κίνδυνο (Value at Risk – VaR). Στην παρούσα ενότητα θεωρείται ότι η επιχείρηση δραστηριοποιείται στην αγορά υπό καθεστώς τέλει ανταγωνισμού.

## 10.1 Εισαγωγή

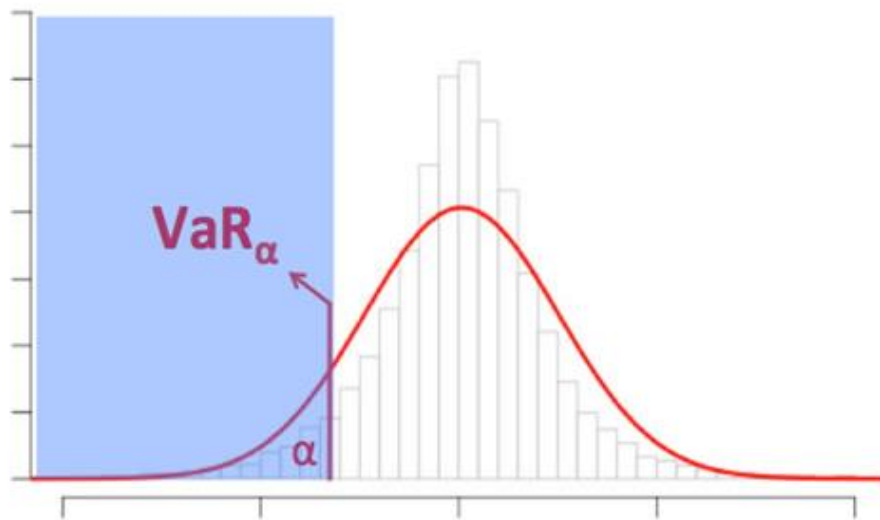
Η Αξία σε Κίνδυνο υπολογίζει το ελάχιστο δυνατό κέρδος που μπορεί να έχει ένα χαρτοφυλάκιο για μία δεδομένη χρονική περίοδο και για ένα δεδομένο κατώφλι πιθανότητας (Best P. , 1998). Η Αξία σε Κίνδυνο επομένως αποτελεί μία συνοπτική απεικόνιση του κινδύνου της αγοράς και παράλληλα περιλαμβάνει δύο σημαντικά χαρακτηριστικά (Best P. , 1998; Corkalo, 2011; Terpezan-Tabara, 2008): (a) το κατώφλι πιθανότητας, το οποίο εκφράζει την πιθανότητα η πιθανοτική κατανομή του προς αξιολόγηση μεγέθους να είναι μικρότερη ή ίση από δεδομένο κατώφλι και (b) μετράει τον κίνδυνο σε νομισματικές μονάδες, αποφέρει δηλαδή το ποσό του κέρδους με δεδομένες προϋποθέσεις.

Μαθηματικά, η μετρική Αξία σε Κίνδυνο ορίζεται με τον ακόλουθο τρόπο.

Θεωρούμε ένα πιθανοτικό μέγεθος  $\tilde{Z}$  που ακολουθεί κάποια κατανομή πιθανότητας και ως

$F_Z(\cdot)$  συμβολίζουμε την αθροιστική συνάρτηση της κατανομής. Η Αξία σε Κίνδυνο που συμβολίζεται με  $VaR_\alpha(\tilde{Z})$ , ορίζεται ως:

$$\underline{VaR}_\alpha(\tilde{Z}) = \sup\{y \in \mathbb{R}: F_Z(y) \leq \alpha\} \quad (10-1)$$



Γράφημα 4: Γραφική απεικόνιση της Αξίας σε Κίνδυνο ( $VaR_\alpha$ ) με κατώφλι πιθανότητας  $\alpha$  ενός πιθανοτικού μεγέθους που ακολουθεί κανονική κατανομή



Ο υπολογισμός της Αξίας σε Κίνδυνο για όλα τα κατώφλια πιθανότητας παρέχει πλήρως την πιθανοτική κατανομή της αντικειμενικής συνάρτησης.

## 10.2 Ανάπτυξη του πιθανοτικού υποδείγματος

Στο παρόν κεφάλαιο επεκτείνεται το υπόδειγμα όπως αυτό παρουσιάστηκε στο κεφάλαιο 4, ώστε να περιλαμβάνει πιθανοτικά μεγέθη. Τα πιθανοτικά μεγέθη του υποδείγματος είναι οι τιμές των καυσίμων ( $\tilde{p}_{i,f,t}$ ), οι τιμές των δικαιωμάτων εκπομπών CO2 ( $\tilde{ETS}_t$ ) και η παράμετρος  $\tilde{a}_{i,s,t}$  της αντίστροφης συνάρτησης ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας, τα οποία ακολουθούν κανονικές κατανομές με δεδομένες μέσες τιμές και διακυμάνσεις. Σύμφωνα με τις ιδιότητες της κανονικής κατανομής, η πιθανοτική κατανομή της αντικειμενικής συνάρτησης ακολουθεί κανονική κατανομή δεδομένου ότι αποτελεί γραμμικό συνδυασμό των πιθανοτικών μεγεθών.

Το υπόδειγμα που αναπτύσσεται στο παρόν κεφάλαιο αποτελεί ανάλυση πολλών σταδίων με χρήση της μεθόδου της Αξίας σε Κίνδυνο (Value at Risk) με κατώφλι πιθανότητας  $\alpha$ , η οποία υπολογίζεται ως

$$\begin{aligned} \underline{VaR}_\alpha \left( \tilde{P}(x; \mathbf{d}; \tilde{r}) \right) &= \sup\{y \in \mathbb{R}: F_{P(x; \mathbf{d}; \tilde{r})}(y) \leq \alpha\} = \\ & \sup\{y \in \mathbb{R}: \text{prob}[\tilde{P}(x; \mathbf{d}; \tilde{r}) \leq y] \leq \alpha\} \end{aligned} \quad (10-2)$$

Όπου:  $F_{P(x; \mathbf{d}; \tilde{r})}$  η αθροιστική συνάρτηση κατανομής του κέρδους της επιχείρησης η οποία λειτουργεί στην αγορά

$\tilde{P}(x; \mathbf{d}; \tilde{r})$  η πιθανοτική κατανομή του κέρδους της επιχείρησης η οποία δίνεται από τον τύπο (7-5)

Οι περιορισμοί μένουν όπως στο κεφάλαιο 4. Ο αιτιοκρατικός περιορισμός (4-26) μετατρέπεται σε πιθανοτικό ο οποίος, δεδομένου ότι τα πιθανοτικά μεγέθη ακολουθούν κανονικές κατανομές, μπορεί να γραφεί στην αιτιοκρατική ισοδύναμη μορφή του (9-20).

## 10.3 Ανάπτυξη του αιτιοκρατικού ισοδύναμου υποδείγματος

Οι στοχαστικές παράμετροι του υποδείγματος θεωρείται ότι ακολουθούν κανονικές κατανομές με δεδομένες μέσες τιμές, διακυμάνσεις και συσχετίσεις μεταξύ τους, όπως αναλύθηκε στο κεφάλαιο 3.3, οπότε υπολογίζονται τα 100 αντιπροσωπευτικά δείγματα κάθε πιθανοτικού μεγέθους με την αντίστοιχη πιθανότητά τους. Για την επίλυση του

μαθηματικού υποδείγματος με πιθανοτικά μεγέθη και πιθανοτικούς περιορισμούς, υπολογίζεται το αιτιοκρατικό ισοδύναμό του.

Το κατώφλι πιθανότητας  $\alpha$  που χρησιμοποιούμε στο υπόδειγμα είναι 0,1 , καθώς επιδιώκεται ο αποκλεισμός του 10% των λιγότερο επιθυμητών καταστάσεων που μπορεί να προκύψουν. Από τα 100 σενάρια εξέλιξης των τιμών των πιθανοτικών μεγεθών στο μέλλον, προκύπτουν 100 διαφορετικά σενάρια για το συνολικό κέρδος της επιχείρησης που λειτουργεί στην αγορά λόγω επενδύσεων και λειτουργίας των σταθμών, προκύπτει κατ' ουσίαν η πιθανοτική κατανομή του συνολικού κέρδους της επιχείρησης. Κατά την αξιολόγηση της πιθανοτικής κατανομής του συνολικού κέρδους της επιχείρησης με τη μέθοδο της Αξίας σε Κίνδυνο με κατώφλι πιθανότητας 10%, προκύπτει η μέγιστη τιμή του κέρδους  $\underline{VaR}_{0,1}$ , για την οποία ισχύει ότι η πιθανότητα το συνολικό κέρδος να μην ξεπεράσει την τιμή αυτή είναι μικρότερη ή ίση του 10%. Αναδιατυπώνοντας, τουλάχιστον στο 90% των περιπτώσεων η τιμή του συνολικού κέρδους της επιχείρησης λαμβάνει τιμή μεγαλύτερη ή ίση της  $\underline{VaR}_{0,1}$ .

Η αντικειμενική συνάρτηση μπορεί να γραφεί:

$$\underline{VaR}_{0,1}(\tilde{P}(x; \mathbf{d}; \tilde{\mathbf{r}})) = \sup\{y \in \mathbb{R}: \text{prob}[\tilde{P}(x; \mathbf{d}; \tilde{\mathbf{r}}) \leq y] \leq 0,1\} \quad (10-3)$$

Όπου:

$$\begin{aligned} y = \sum_{t=1}^T e^{-\delta_t \cdot t} \cdot \left[ \sum_i \left[ \right. \right. & (a_{q,i,s,t} - \beta_{i,s,t} \cdot D_{i,s,t}) \cdot D_{i,s,t} \\ & - \sum_f f p_{q,i,f,t}(F_{i,f,t}) \cdot F_{i,f,t} \\ & - \sum_n \sum_{\tau \leq t} \sum_s v c_{i,n,\tau,t}(G_{i,n,\tau,s,t}) \cdot G_{i,n,\tau,s,t} \\ & - \sum_n \sum_{\tau \leq t} f c_{i,n,\tau,t}(K_{i,n,\tau,t}) \cdot K_{i,n,\tau,t} \\ & - \sum_n (\sum_{\tau \leq t} n i_{i,n,\tau,t}(\rho_{i,n,\tau}) \cdot i c p_{i,n,\tau}(\sum_{\tau \tau \leq \tau} I_{i,n,\tau \tau,\tau}) \cdot I_{i,n,\tau}) \\ & - \sum_n (\sum_{\tau \leq t} n e_{i,n,\tau,t}(\rho_{i,n,\tau}) \cdot i c e_{i,n,\tau}(\sum_{\tau \tau \leq \tau} E I_{i,n,\tau \tau}) \cdot E I_{i,n,\tau}) \\ & - c e_{i,t}(\sum_{\tau \leq t} E S_{i,\tau}) \cdot E S_{i,t} \\ & - E T S p_{q,t} \cdot E M_{i,t} \\ & - \sum_{\tau \leq t} n p x_{i,\tau,t}(\rho \rho_{i,\tau}) \cdot P C X_{i,\tau,t} \\ & \left. \left. \right] - \sum_k \sum_s h r s_s \cdot F L_{k,s,t} \cdot g c u_{k,t} \right] \end{aligned} \quad (10-4)$$

Η  $\tilde{P}(x; \mathbf{d}; \tilde{\mathbf{r}})$  υπολογίζεται όπως στον τύπο (7-5).

Η αντικειμενική συνάρτηση του υποδείγματος είναι γραμμικώς εξαρτώμενη από τα πιθανοτικά μεγέθη, με αποτέλεσμα να ακολουθεί κανονική κατανομή της οποίας η μέση τιμή και η διακύμανση έχουν αναλυτική έκφραση  $\tilde{P}(\mathbf{x}; \mathbf{d}; \tilde{\mathbf{r}}) \sim \mathcal{N}(P(\mathbf{x}; \mathbf{d}; \tilde{\mathbf{r}}), \Sigma_p^2(\mathbf{x}; \mathbf{d}; \tilde{\mathbf{r}}))$ . Για οποιοδήποτε μέγεθος  $X$  που ακολουθεί κανονική κατανομή με δεδομένη μέση τιμή  $\mu$  και διακύμανση  $\sigma^2$  μπορεί να βρεθεί η τιμή του σημείου της κατανομής το οποίο έχει δεδομένη αθροιστική πιθανότητα  $\alpha$  με τον ακόλουθο τύπο:

$$X = \mu + Z\sigma \quad (10-5)$$

Όπου  $Z = \mathcal{F}_{N(0,1)}^{-1}(\alpha)$ , και  $\mathcal{F}_{N(0,1)}^{-1}(\cdot)$  η αντίστροφη της αθροιστικής συνάρτησης της τυπικής κανονικής κατανομής  $\mathcal{N}(0,1)$ .

Στο υπόδειγμα θεωρείται  $\alpha = 0,1$  και σύμφωνα με τους πίνακες της τυπικής κανονικής κατανομής  $Z = \mathcal{F}_{N(0,1)}^{-1}(0,1) = -1,28$ , επομένως το ζητούμενο σημείο της κατανομής είναι το:

$$X = \mu - 1,28 \cdot \sigma \quad (10-6)$$

Συνεπώς η Αξία σε Κίνδυνο είναι η μέγιστη τιμή της πιθανοτικής κατανομής του κέρδους της επιχείρησης η οποία έχει τιμή μικρότερη ή ίση της δεδομένης τιμής **(10-6)**, όπου  $\mu = P(\mathbf{x}; \mathbf{d}; \tilde{\mathbf{r}})$  η μέση τιμή της κατανομής του κέρδους η οποία υπολογίζεται από τον τύπο **(10-7)**

$$\begin{aligned} \mu = P(\mathbf{x}; \mathbf{d}; \tilde{\mathbf{r}}) = \sum_{t=1}^T e^{-\delta_t \cdot t} \cdot \left[ \sum_i \left[ \begin{aligned} & (\bar{\alpha}_{i,s,t} - \beta_{i,s,t} \cdot D_{i,s,t}) \cdot D_{i,s,t} \\ & - \sum_f \bar{f} p_{i,f,t}(F_{i,f,t}) \cdot F_{i,f,t} \\ & - \sum_n \sum_{\tau \leq t} \sum_s v c_{i,n,\tau,t}(G_{i,n,\tau,s,t}) \cdot G_{i,n,\tau,s,t} \\ & - \sum_n \sum_{\tau \leq t} f c_{i,n,\tau,t}(K_{i,n,\tau,t}) \cdot K_{i,n,\tau,t} \\ & - \sum_n (\sum_{\tau \leq t} n i_{i,n,\tau,t}(\rho_{i,n,\tau}) \cdot i c p_{i,n,\tau}(\sum_{\tau \leq t} I_{i,n,\tau,\tau}) \cdot I_{i,n,\tau}) \\ & - \sum_n (\sum_{\tau \leq t} n e_{i,n,\tau,t}(\rho_{i,n,\tau}) \cdot i c e_{i,n,\tau}(\sum_{\tau \leq t} E I_{i,n,\tau,\tau}) \cdot E I_{i,n,\tau}) \\ & - c e_{i,t}(\sum_{\tau \leq t} E S_{i,\tau}) \cdot E S_{i,t} \\ & - \overline{ETS} p_t \cdot E M_{i,t} \\ & - \sum_{\tau \leq t} n p x_{i,\tau,t}(\rho \rho_{i,\tau}) \cdot P C X_{i,\tau,t} \\ & \left. \left[ - \sum_k \sum_s h r s_s \cdot F L_{k,s,t} \cdot g c u_{k,t} \right] \right] \end{aligned} \right. \quad (10-7) \end{aligned}$$

και  $\sigma = \Sigma_p(\mathbf{x}; \mathbf{d}; \tilde{\mathbf{r}})$  η τυπική απόκλιση της κατανομής του κέρδους η οποία βρίσκεται ως

$$\begin{aligned}\sigma &= \Sigma_p(\mathbf{x}; \mathbf{d}; \tilde{\mathbf{r}}) = \sqrt{\Sigma_p^2(\mathbf{x}; \mathbf{d}; \tilde{\mathbf{r}})} = \\ &= \sum_{t=1}^T e^{-\delta t \cdot t} \cdot \sum_i [\sigma_{i,t,1}^2 + \sigma_{i,t,2}^2 + 2 \cdot Cov_{i,t} + \sigma_{i,t,3}^2] \text{ όπως αναλύθηκε στο} \\ &\text{κεφάλαιο 8}\end{aligned}$$

Για την προσομοίωση των πιθανοτικών περιορισμών έγινε χρήση δυαδικών μεταβλητών, κάθε μία από τις οποίες αντιστοιχεί σε ένα σενάριο των πιθανοτικών μεγεθών. Η αθροιστική πιθανότητα που προκύπτει από τα σενάρια στα οποία οι περιορισμοί ικανοποιούνται πρέπει να είναι μικρότερη ή ίση από το κατώφλι  $\lambda$  που έχει οριστεί.

Κατ' αυτόν τον τρόπο, το πρόβλημα επιλύθηκε με τη μέθοδο του ακέραιου προγραμματισμού.

#### 10.4 Σύγκριση των μεθόδων αξιολόγησης κινδύνου με χρήση της Αξίας σε Κίνδυνο και με χρήση της προσέγγισης του Markowitz

Τα πιθανοτικά μεγέθη ακολουθούν κανονικές κατανομές και το κέρδος της επιχείρησης υπολογίζεται ως γραμμικός συνδυασμός των πιθανοτικών μεγεθών, επομένως ακολουθεί κανονική κατανομή με μέση τιμή και τυπική απόκλιση που μπορούν να υπολογιστούν αναλυτικά.

Στην περίπτωση αυτή η μέθοδος υπολογισμού της Αξίας σε Κίνδυνο όπως αποδείχθηκε στο κεφάλαιο 10.3 ανάγεται στη μέθοδο της αξιολόγησης της πιθανοτικής κατανομής του κέρδους με χρήση της προσέγγισης του Markowitz όπως αναλύθηκε στο κεφάλαιο 8 και συγκεκριμένα στον τύπο **(8-6)** όπου ο συντελεστής  $A$  υπολογίζεται ως  $\mathcal{F}_{N(0,1)}^{-1}(\alpha)$ , ( $A = \mathcal{F}_{N(0,1)}^{-1}(\alpha)$ ). Στο υπόδειγμα που μελετάται στο κεφάλαιο αυτό,  $\alpha = 0,1$  και  $\mathcal{F}_{N(0,1)}^{-1}(0,1) = -1,28$ , συνεπώς  $A = 1.28$ .

#### 10.5 Ύπαρξη και μοναδικότητα λύσης

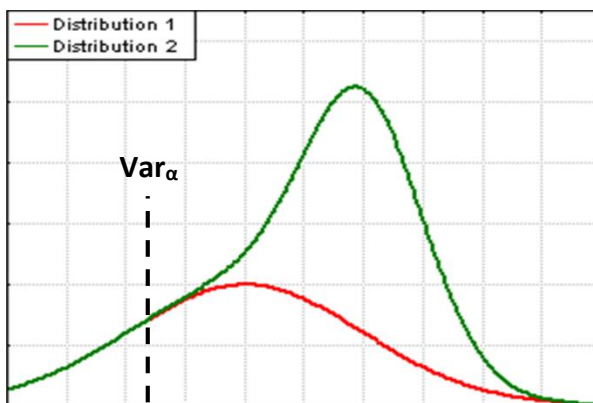
Η μεθοδολογία υπολογισμού της Αξίας σε Κίνδυνο ανάγεται, όπως αποδείχτηκε στο υποκεφάλαιο 10.4, στη μεθοδολογία αξιολόγησης της πιθανοτικής κατανομής της αντικειμενικής συνάρτησης με χρήση της προσέγγισης του Markowitz όπως αυτή αναλύθηκε στο κεφάλαιο 8. Επομένως, με όμοιο τρόπο όπως αναλύθηκε στο κεφάλαιο 8.2.1 αποδεικνύεται πως το παρόν υπόδειγμα έχει μοναδική βέλτιστη λύση.

## 10.6 Πλεονεκτήματα – μειονεκτήματα της μεθοδολογίας υπολογισμού της Αξίας σε Κίνδυνο

### 10.6.1 Πλεονεκτήματα

Όπως αναλύθηκε προηγουμένως η μέθοδος αξιολόγησης του κινδύνου με χρήση της Αξίας σε Κίνδυνο χρησιμοποιείται ευρέως. Παρέχει τη μέγιστη τιμή της πιθανοτικής κατανομής του κέρδους για την οποία ισχύει πως η πιθανότητα η κατανομή να λάβει τιμές μικρότερες ή ίσες αυτής είναι μικρότερη ή ίση του κατώφλιου πιθανότητας  $\alpha$ . Η Αξία σε Κίνδυνο είναι ένας αριθμός, συνεπώς δίνεται η δυνατότητα σύγκρισης δύο πιθανοτικών κατανομών συγκρίνοντας την Αξία σε Κίνδυνο με ίδιο κατώφλι πιθανότητας κάθε μιας. Σε αντιδιαστολή με τη μέθοδο αξιολόγησης του κινδύνου στην οποία γίνεται χρήση της τυπικής απόκλισης, η Αξία σε Κίνδυνο επικεντρώνεται σε ένα κομμάτι της πιθανοτικής κατανομής και όχι σε ολόκληρη την κατανομή. Μία σημαντική ιδιότητα της Αξίας σε Κίνδυνο είναι η σταθερότητα των διαδικασιών υπολογισμού (stability of estimation procedures) (Sarykalin, Serraino, & Uryasev, 2008). Η μεθοδολογία υπολογισμού της Αξίας σε Κίνδυνο παραβλέπει την «ουρά» της κατανομής και δεν επηρεάζεται από πολύ ακραίες τιμές αυτής, οι οποίες συχνά είναι δύσκολο να υπολογιστούν αριθμητικά.

### 10.6.2 Μειονεκτήματα



Γράφημα 5: Δύο κατανομές με ίδια Αξία σε Κίνδυνο με κατώφλι πιθανότητας  $\alpha$  ( $VaR_\alpha$ )

Η αξιολόγηση κινδύνου με χρήση της μεθοδολογίας υπολογισμού της Αξίας σε Κίνδυνο ενέχει κάποια μειονεκτήματα. Ένα από τα μειονεκτήματα (Artzner, Delbaen, Eber, & Heath, Thinking coherently, 1997; Artzner, Delbaen, Eber, & Heath, Coherent Measures of Risk, 1999) έγκειται στο γεγονός ότι δεν παρέχει πληροφορίες για την κατανομή των αποδόσεων χαρτοφυλακίου πάνω από το κατώφλι πιθανότητας που ορίζεται.

Ένας επενδυτής όμως δεν είναι αδιάφορος μεταξύ δύο χαρτοφυλακίων που έχουν την ίδια αναμενόμενη απόδοση και την ίδια Αξία σε Κίνδυνο όταν η κατανομή των

αποδόσεων του ενός χαρτοφυλακίου έχει σχετικά μικρές πιθανότητες μεγαλύτερων κερδών από την Value at Risk και το άλλο σχετικά μεγάλες πιθανότητες μεγάλων κερδών.

Αντίστοιχα, η χρήση της μεθόδου Αξίας σε Κίνδυνο δεν παρέχει πληροφορίες για την κατανομή της συνάρτησης κάτω από το κατώφλι πιθανότητας  $\alpha$ . Υπάρχει  $\alpha\%$  πιθανότητα να προκύψει τιμή του συνολικού κέρδους της επιχείρησης μη επιθυμητή, δηλαδή τα κέρδη της επιχείρησης να είναι μικρότερα της  $VaR_\alpha(\tilde{P}(x; \mathbf{d}; \tilde{r}))$ . Στην περίπτωση αυτή δεν δίνονται πληροφορίες για το μέγεθος της μη επιθυμητής κατάστασης. Επιπλέον, ανάλογα τη μορφή της κατανομής, η τιμή της Αξίας σε Κίνδυνο μπορεί να μεταβληθεί αρκετά με μικρή μεταβολή του επιπέδου εμπιστοσύνης  $\alpha$ . Για την πλήρη αξιολόγηση της ουράς της κατανομής είναι απαραίτητος ο υπολογισμός της Αξίας σε Κίνδυνο για διάφορα κατώφλι πιθανότητας.

### 10.7 Αξιολόγηση της πιθανοτικής κατανομής της αντικειμενικής συνάρτησης με χρήση της μεθόδου της Αναμενόμενης Αξίας σε Κίνδυνο (Conditional Value at Risk – CVaR) με κατώφλι πιθανότητας $\alpha$

Επέκταση της μεθοδολογίας υπολογισμού της Αξίας σε Κίνδυνο αποτελεί η μεθοδολογία υπολογισμού της Αναμενόμενης Αξίας σε Κίνδυνο. Στο παρόν κεφάλαιο της διατριβής γίνεται αξιολόγηση της πιθανοτικής κατανομής της αντικειμενικής συνάρτησης με τη μέθοδο της Αναμενόμενης Αξίας σε Κίνδυνο.

Η Αναμενόμενη Αξία σε Κίνδυνο (Conditional Value at Risk – CVaR), η οποία καλείται επίσης Mean Excess Loss, Mean Shortfall και Tail VaR, αναπτύχθηκε από τους Artzner, Delbaen, Eber και Heath (Artzner, Delbaen, Eber, & Heath, Coherent Measures of Risk, 1999). Η μεθοδολογία υπολογισμού της Αναμενόμενης Αξίας σε Κίνδυνο είναι ομολογη της μεθοδολογίας υπολογισμού της Αξίας σε Κίνδυνο και πιο συγκεκριμένα η Αξία σε Κίνδυνο είναι το άνω όριο της Αναμενόμενης Αξίας σε Κίνδυνο (Sarykalin, Serraino, & Uryasev, 2008). Στη βιβλιογραφία έχουν γίνει αρκετές προσπάθειες σύγκρισης των δύο αυτών μεθόδων (Rockafellar & Uryasev, Optimization of Conditional Value-at-Risk, 2000; Rockafellar & Uryasev, Conditional value-at-risk for general loss distributions, 2002). Τα επιχειρήματα επιλογής της μιας μεθόδου έναντι της άλλης στηρίζονται κυρίως στις μαθηματικές ιδιότητές τους, στη σταθερότητα των στατιστικών εκτιμήσεων, στην απλότητα κατά τη βελτιστοποίηση και στην αποδοχή από τους εκάστοτε ρυθμιστές (Sarykalin, Serraino, & Uryasev, 2008). Ωστόσο, τα συμπεράσματα που προκύπτουν από αυτές τις συγκρίσεις είναι πολλές φορές αλληλοσυγκρουόμενα.

Η Αναμενόμενη Αξία σε Κίνδυνο ορίζεται ως:

Ορισμός 10-1. Η μετρική  $\underline{CVaR}_\alpha$  είναι η αναμενόμενη μέση τιμή της κατανομής ενός μεγέθους δεδομένου ότι βρισκόμαστε στο  $(\alpha * 100)\%$  αριστερό μέρος της κατανομής. Έστω  $\xi$  τυχαία μεταβλητή με συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας  $p(\xi)$ ,  $G(\xi)$  συνάρτηση της τυχαίας μεταβλητής  $\xi$  και  $\alpha \in (0,1)$  κατώφλι πιθανότητας. Η μετρική  $\underline{CVaR}_\alpha$  ορίζεται ως

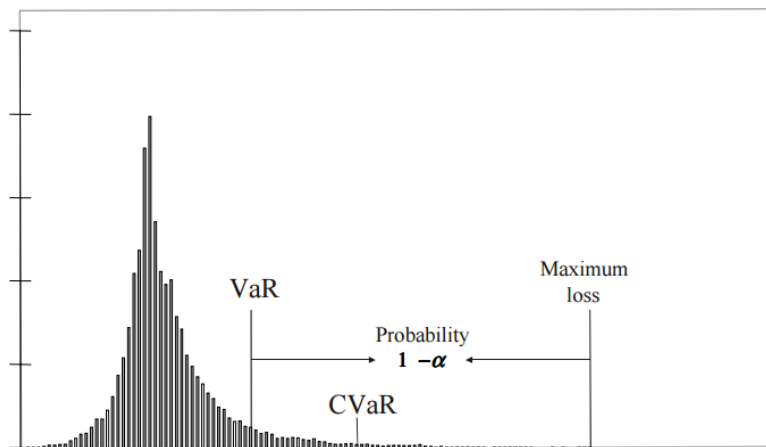
$$\underline{CVaR}_\alpha = \frac{1}{\alpha} \cdot \int_{-\infty}^{VaR_\alpha} G(\xi) \cdot p(\xi) d\xi \tag{10-8}$$

όπου  $VaR_\alpha(\xi) = \inf\{t: F_\xi(t) \geq \alpha\}$  και  $F_Z(t)$  είναι η αθροιστική συνάρτηση κατανομής.

Η (10-8) γράφεται εναλλακτικά:

$$\underline{CVaR}_\alpha(\xi) = \frac{1}{\alpha} \int_{-\infty}^a VaR_x(\xi) dx \tag{10-9}$$

Όπου:  $p(x)$ : συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας



Γράφημα 6: Χαρτοφυλάκιο κόστους, η Αξία σε Κίνδυνο και η CVaR (Sarykalin, Serraino, & Uryasev, 2008)

Η σχέση μεταξύ της Αξίας σε Κίνδυνο και της Αναμενόμενης Αξίας σε Κίνδυνο όταν η βελτιστοποίηση συνίσταται στην ελαχιστοποίηση ενός μεγέθους (πχ. ελαχιστοποίηση κόστους) και η αξιολόγηση έγκειται στον υπολογισμό των λιγότερο επιθυμητών σεναρίων, παρουσιάζεται στο Γράφημα 6.

### 10.7.1 Ανάπτυξη του πιθανοτικού υποδείγματος

Η αντικειμενική συνάρτηση του παρόντος υποδείγματος συνίσταται στην εύρεση της μέγιστης Αναμενόμενης Αξίας σε Κίνδυνο:

$$\begin{aligned} \max \underline{CVaR}_\alpha \left( \tilde{P}(x; \mathbf{d}; \tilde{r}) \right) &= \frac{1}{\alpha} \int_{-\infty}^a \underline{VaR}_\gamma \left( \tilde{P}(x; \mathbf{d}; \tilde{r}) \right) d\gamma \\ &= \frac{1}{\alpha} \int_0^a \underline{VaR}_\gamma \left( \tilde{P}(x; \mathbf{d}; \tilde{r}) \right) d\gamma \end{aligned} \quad (10-10)$$

Όπου:  $\tilde{P}(x; \mathbf{d}; \tilde{r})$  η πιθανοτική κατανομή της αντικειμενικής συνάρτησης η οποία δίνεται από τον τύπο (7-5)

$\underline{VaR}_\gamma \left( \tilde{P}(x; \mathbf{d}; \tilde{r}) \right)$  η Αξία σε Κίνδυνο όπως αναλύθηκε προηγουμένως και υπολογίζεται από τον τύπο (10-1)

Η (10-10) μπορεί να γραφεί:

$$\begin{aligned} \max \underline{CVaR}_\alpha \left( \tilde{P}(x; \mathbf{d}; \tilde{r}) \right) \\ = \max E \left( P(x; \mathbf{d}; \tilde{r}) : P(x; \mathbf{d}; \tilde{r}) \leq \underline{VaR}_\alpha \left( \tilde{P}(x; \mathbf{d}; \tilde{r}) \right) \right) \end{aligned} \quad (10-11)$$

Οι περιορισμοί μένουν όπως στο κεφάλαιο 4. Ο αιτιοκρατικός περιορισμός (4-26) μετατρέπεται σε πιθανοτικό, ο οποίος, δεδομένου ότι τα πιθανοτικά μεγέθη ακολουθούν κανονικές κατανομές, μπορεί να γραφεί στην αιτιοκρατική ισοδύναμη μορφή του (9-20).

### 10.7.2 Ανάπτυξη του αιτιοκρατικού ισοδύναμου υποδείγματος

Κατ' αντιστοιχία με τη μεθοδολογία υπολογισμού της Αξίας σε Κίνδυνο η αντικειμενική συνάρτηση υπολογίζει:

$$\begin{aligned} \max \underline{CVaR}_{0,1} \left( \tilde{P}(x; \mathbf{d}; \tilde{r}) \right) \\ = \max E \left( P(x; \mathbf{d}; \tilde{r}) : P(x; \mathbf{d}; \tilde{r}) \leq \underline{VaR}_{0,1} \left( \tilde{P}(x; \mathbf{d}; \tilde{r}) \right) \right) \end{aligned} \quad (10-12)$$



### 10.7.3 Σύγκριση των μεθόδων αξιολόγησης κινδύνου με χρήση της Αναμενόμενης Αξίας σε Κίνδυνο και με χρήση της προσέγγισης του Markowitz

Η μέθοδος αξιολόγησης κινδύνου με χρήση της Αναμενόμενης Αξίας σε Κίνδυνο ανήκει στην κατηγορία υποδειγμάτων που προκύπτουν από την μεθοδολογία αξιολόγησης κινδύνου με χρήση της προσέγγισης του Markowitz.

Η μετρική  $\underline{CVaR}_\alpha$  ορίζεται σύμφωνα με τον Ορισμός 10-1.

Αν η συνάρτηση  $G(\xi)$  ακολουθεί κανονική κατανομή, δηλαδή  $G(\xi) \sim N(\mu_G, \sigma_G^2)$ , τότε

$$\begin{aligned} \underline{CVaR}_\alpha &= \frac{1}{\alpha} \cdot \int_{-\infty}^{VaR_\alpha} G(\xi) \cdot p(\xi) d\xi = \frac{1}{\alpha} \cdot \int_{-\infty}^{VaR_\alpha} x \cdot \frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} dx = \\ &= \frac{\sigma \cdot \mu \sqrt{\frac{\pi}{2}} - \sigma^2 \cdot e^{-\frac{(VaR_\alpha - \mu)^2}{2 \cdot \sigma^2}} + \sqrt{\frac{\pi}{2}} \cdot \mu \cdot \sigma \cdot \operatorname{erf}\left(\frac{VaR_\alpha - \mu}{\sqrt{2} \cdot \sigma}\right)}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma} \quad (1) = \\ &= \frac{1}{2} \cdot \left[ 1 + \operatorname{erf}\left(\frac{q - \mu}{\sqrt{2} \cdot \sigma}\right) \right] \cdot \mu - \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{(q-\mu)^2}{2\sigma^2}} \end{aligned}$$

**(10-13)**

$$\begin{aligned} & \quad q - \mu = \alpha \cdot \sigma \\ &= \frac{1}{2} \cdot \left[ 1 + \operatorname{erf}\left(\frac{q - \mu}{\sqrt{2} \cdot \sigma}\right) \right] \cdot \mu - \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{(q-\mu)^2}{2\sigma^2}} \left. \vphantom{\frac{1}{2}} \right\} \\ & \quad q - \mu = \alpha \cdot \sigma \\ &= \frac{1}{2} \cdot \left[ 1 + \operatorname{erf}\left(\frac{\alpha}{\sqrt{2}}\right) \right] \cdot \mu + \left( -\frac{e^{-\frac{\alpha^2}{2}}}{\sqrt{2\pi}} \right) \cdot \sigma \\ &= A \cdot [\mu - B \cdot \sigma] \end{aligned}$$

Όταν το εξεταζόμενο μέγεθος ακολουθεί κανονική κατανομή, η μεθοδολογία υπολογισμού της Αναμενόμενης Αξίας σε Κίνδυνο είναι ανάλογη της μεθοδολογίας αξιολόγησης του κινδύνου με χρήση της προσέγγισης του Markowitz.

Συγκεκριμένα, στην περίπτωση που  $\alpha = 0,1$  τότε η **(10-13)** μετασχηματίζεται στην

$$\begin{aligned} \underline{CVaR}_{0,1} &= \frac{1}{2} \cdot \left[ 1 + \operatorname{erf}\left(\frac{0,1}{\sqrt{2}}\right) \right] \cdot \mu + \left( -\frac{e^{-\frac{0,1^2}{2}}}{\sqrt{2\pi}} \right) \cdot \sigma = \\ & \quad 0,540 \cdot \mu - 0,397 \cdot \sigma \end{aligned}$$

## 10.8 Σύγκριση μεθοδολογίας αξιολόγησης κινδύνου με χρήση της Αναμενόμενης Αξίας σε Κίνδυνο και με χρήση της Αξίας σε Κίνδυνο

Η μέθοδος της αξιολόγησης της πιθανοτικής κατανομής του προς αξιολόγηση μεγέθους, όταν αυτό ακολουθεί κανονική κατανομή, με χρήση της Αναμενόμενης Αξίας σε Κίνδυνο είναι συνεπής με τη μέθοδο της αξιολόγησης της πιθανοτικής κατανομής του προς αξιολόγηση μεγέθους με χρήση της μεθοδολογίας υπολογισμού της Αξίας σε Κίνδυνο (Rockafellar & Uryasev, Optimization of Conditional Value-at-Risk, 2000).

Επομένως, όταν το προς αξιολόγηση μέγεθος ακολουθεί κανονική κατανομή, η αξιολόγηση του κινδύνου με χρήση της Αξίας σε Κίνδυνο, της Αναμενόμενης Αξίας σε Κίνδυνο ή η χρήση της προσέγγισης του Markowitz είναι ισοδύναμη (Sarykalin, Serraino, & Uryasev, 2008).

## Κεφάλαιο 11

### 11 Αξιολόγηση επενδύσεων με χρήση της μεθοδολογίας των δικαιωμάτων προαίρεσης (real option theory)

---

#### 11.1 Εισαγωγή

Στο παρόν κεφάλαιο αναπτύσσουμε υπόδειγμα αναπαράστασης ηλεκτρικού τομέα και μελετάται ο βέλτιστος μακροχρόνιος ενεργειακός σχεδιασμός του όταν χρησιμοποιείται μαθηματικό πρότυπο απόφασης σε συνθήκες αβεβαιότητας που έχει αναπτυχθεί στη χρηματοοικονομική ανάλυση μεμονωμένων επενδύσεων. Πιο συγκεκριμένα, η αξιολόγηση των επενδύσεων γίνεται με τη μέθοδο των δικαιωμάτων προαίρεσης. Η μέθοδος αυτή αναπτύχθηκε τις τελευταίες δύο δεκαετίες με σκοπό να βελτιώσει τον τρόπο με τον οποίο λαμβάνεται υπόψιν η αβεβαιότητα κατά την αξιολόγηση επενδύσεων.

Η παραδοσιακή μέθοδος που χρησιμοποιείται για τη αξιολόγηση επενδύσεων είναι η μέθοδος της Καθαρής Παρούσας Αξίας (Net Present Value – NPV).

Πρώτος εισήγαγε την έννοια ο Irving Fisher το 1907 (Fisher, 1907). Η μέθοδος αυτή στηρίζεται στον υπολογισμό των καθαρών ταμειακών ροών (ΚΤΡ) / (Net Cash Flows) που αναμένονται στο μέλλον και η μετέπειτα αναγωγή τους στον παρόντα χρόνο ώστε από το άθροισμά τους να υπολογιστεί η παρούσα αξία του πλεονάσματος που θα προκύψει από την επένδυση (Discounted Cash Flow – DCF). Η αναγωγή ενός μεγέθους στο παρόν έτος γίνεται μέσω του τύπου:  $PV = \frac{FV}{(1+\delta)^t}$  όπου  $PV$  η παρούσα αξία του μεγέθους (present value),  $FV$  η αξία του μεγέθους την χρονική στιγμή  $t$  (future value),  $\delta$  το επιτόκιο προεξόφλησης (ή επιτόκιο αναγωγής) και  $t$  χρονική στιγμή στο μέλλον (συνήθως αφορά έτος).

Στην περίπτωση που ορισμένα μεγέθη, όπως οι τιμές των καυσίμων, είναι πιθανοτικά τότε για κάθε έτος υπολογίζεται η αναμενόμενη τιμή των καθαρών κερδών της επιχείρησης. Στην συνέχεια, αυτή η αναμενόμενη τιμή ανάγεται στο παρόν έτος.

Με τον τρόπο αυτό δύναται να συγκριθεί η παρούσα αξία των καθαρών ταμειακών ροών με το αρχικό κόστος υλοποίησης της επένδυσης. Συγκεκριμένα, ως Καθαρή Παρούσα Αξία (ΚΠΑ) μιας επένδυσης ορίζεται η διαφορά της παρούσας αξίας του συνόλου των ετησίων καθαρών ταμειακών ροών μείον το αρχικό κόστος της επένδυσης. Η ΚΠΑ υπολογίζεται από τον τύπο:  $KPA = -K_0 + \sum_{t=1}^n \frac{E_{P_t}[KTP_t]}{(1+\delta)^t}$  όπου  $K_0$  το κόστος της επένδυσης,  $E_{P_t}[KTP_t]$  η μέση τιμή των καθαρών ταμειακών ροών του έτους  $t$  εκφρασμένες σε τιμές συγκεκριμένης περιόδου, δηλαδή χωρίς πληθωρισμό,  $\delta$  επιτόκιο αναγωγής και  $n$  η διάρκεια ζωής του επενδυτικού σχεδίου. Η επένδυση θεωρείται συμφέρουσα όταν η ΚΠΑ είναι θετικός αριθμός (ΚΠΑ > 0), μη επικερδής όταν είναι αρνητικός αριθμός (ΚΠΑ < 0), ενώ υπολογίζεται ότι η πραγματοποίηση της επένδυσης δεν θα επιφέρει κέρδος ούτε ζημία όταν η ΚΠΑ είναι ίση με το μηδέν (ΚΠΑ = 0).

## 11.2 Αξιολόγηση των επενδύσεων με τη χρήση δικαιωμάτων προαίρεσης (Real Options Approach)

Η αξιολόγηση επενδύσεων με βάση την Καθαρή Παρούσα Αξία έχει αρκετά μειονεκτήματα αφού στηρίζεται σε ορισμένες απλοποιητικές υποθέσεις. Η παραπάνω θεώρηση υποθέτει ότι είτε η επένδυση είναι αντιστρεπτή δηλαδή ο αποφασίζων στο μέλλον αν διαπιστώσει ότι οι συνθήκες στην αγορά δεν είναι ευνοϊκές μπορεί με την πώλησή της να ανακτήσει όλο το κόστος είτε αν η επένδυση είναι μη αναστρέψιμη τότε η απόφαση για το αν θα κατασκευαστεί η επένδυση δεν μπορεί να αναβληθεί δηλαδή, όπως λέγεται, η επένδυση έχει χαρακτήρα «τώρα ή ποτέ».

Οι επενδύσεις στον ηλεκτρικό τομέα έχουν συγκεκριμένα χαρακτηριστικά που καθιστούν την αντιμετώπιση τους με τον κανόνα της Καθαρής Παρούσας Αξίας ελλιπή (Dixit & Pindyck, 1994; Brennan & Trigeorgis, 2000). Καταρχάς οι επενδύσεις σε σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής είναι μη αναστρέψιμες εκτός των πολύ μικρών αεριοστρόβιλων οι οποίοι μπορούν να μεταφερθούν και μεταπωληθούν. Τα μελλοντικά κέρδη του κάθε σταθμού ακολουθούν πιθανοτική κατανομή δεδομένου ότι εξαρτώνται από πιθανοτικά μεγέθη, συνεπώς η λειτουργία του μπορεί να γίνει σε μη ευνοϊκό περιβάλλον. Επιπλέον, η απόφαση για μια επένδυση δεν έχει τον χαρακτήρα «τώρα ή ποτέ» αλλά στις πλείστες περιπτώσεις η απόφαση μπορεί να αναβληθεί ώστε να χρησιμοποιηθεί νεότερη πληροφορία και να μειωθεί η αβεβαιότητα. Η κλασική θεωρία για την πραγματοποίηση μιας επένδυσης με βάση την καθαρή παρούσα αξία δεν λαμβάνει υπόψη της τα

παραπάνω χαρακτηριστικά με αποτέλεσμα να αδυνατεί να ερμηνεύσει την συμπεριφορά των επιχειρήσεων οι οποίες δεν επενδύουν άμεσα παρά το ευνοϊκό περιβάλλον.

Η επιχείρηση έχοντας την δυνατότητα να καθυστερήσει μια μη αναστρέψιμη επένδυση διαθέτει ένα δικαίωμα αλλά όχι την υποχρέωση να επενδύσει (δικαίωμα προαίρεσης – Real Option). Όταν η επιχείρηση επενδύσει τότε ασκεί αυτό το δικαίωμα και χάνει την δυνατότητα να περιμένει ώστε να μειωθεί η αβεβαιότητα. Αυτή η απολεσθείσα δυνατότητα έχει αξία αφού πλέον η επιχείρηση δεν μπορεί να ανακτήσει τα επενδυμένα κεφάλαια σε περίπτωση που οι συνθήκες δεν είναι όπως οι προϋπολογισθείσες. Χρειάζεται να αναφερθεί ότι η θεωρία της Καθαρής Παρούσας Αξίας οδηγεί στο ίδιο αποτέλεσμα με την θεωρία των δικαιωμάτων προαίρεσης όταν στο κεφαλαιουχικό κόστος του σταθμού προστεθεί και η αξία του δικαιώματος επένδυσης το οποίο χάνεται όταν το δικαίωμα ασκηθεί (Dixit & Pindyck, 1994).

Ο δυναμικός προγραμματισμός αποτελεί μια τεχνική βελτιστοποίησης η οποία είναι κατάλληλη για την αξιολόγηση επενδύσεων με χρήση της μεθόδου των δικαιωμάτων προαίρεσης. Ένα υπόδειγμα που επιλύεται με χρήση της τεχνικής αυτής συνήθως επιλύεται βηματικά σε διακριτό χρόνο, με εκκίνηση είτε από το πρώτο έτος της μελέτης είτε από το τελευταίο. Η μεθοδολογία μπορεί να επεκταθεί και σε συνεχή χρόνο.

Κατά τον υπολογισμό της αξίας της επένδυσης, οι καθαρές ταμειακές ροές (net cash flows) μπορούν να αναπαρασταθούν ως εξωγενείς στοχαστικές παράμετροι του υποδείγματος. Σε πιο λεπτομερή υποδείγματα, η αξία αυτή αναπαρίσταται ως συνάρτηση εξωγενών στοχαστικών παραμέτρων, όπως είναι οι τιμές των καυσίμων ή η ζήτηση της ηλεκτρικής ενέργειας. Ένα αιτιοκρατικό υπόδειγμα που επιλύεται με τις αρχές του δυναμικού προγραμματισμού περιλαμβάνει το τμήμα της αξίας του δικαιώματος το οποίο αφορά στην αύξηση των ταμειακών ροών λόγω των μεταβολών των μεταβλητών του υποδείγματος. Ωστόσο, η χρήση ενός στοχαστικού δυναμικού υποδείγματος είναι απαραίτητη για την ενσωμάτωση της αξίας της επένδυσης η οποία προκύπτει ως αποτέλεσμα της αβεβαιότητας.

Το πρόβλημα περιλαμβάνει πιθανοτικά μεγέθη δηλαδή περιλαμβάνει πλήθος πιθανοτικών καταστάσεων της φύσης, κάθε μία εκ των οποίων έχει ως αποτέλεσμα ένα σύνολο επακόλουθων, το οποίο θεωρείται ως τυχαίο μέγεθος με πιθανοτική κατανομή. Τα επακόλουθα αυτά αποτιμώνται σε χρηματικούς όρους αφού είναι το κέρδος της επιχείρησης και οι πιθανότητες τους είναι αντικειμενικά γνωστές.

Το υπόδειγμα το οποίο αξιολογεί τις επενδύσεις με χρήση της μεθόδου των δικαιωμάτων προαίρεσης, επιλέγει το μίγμα επενδύσεων με τέτοιο τρόπο ώστε να μεγιστοποιείται η συνολική αξία του συστήματος. Αξιολογεί δηλαδή κάθε μία επένδυση με βάση την αξία

της και κατά πόσο αυτή αυξάνει τη συνολική αξία του συστήματος. Συνεπώς κατά την εφαρμογή της μεθόδου αυτής ο αποφασίζων είναι ουδέτερος στον κίνδυνο (risk neutral), δεδομένου ότι οι επιλογές του δεν επηρεάζονται από την πιθανή αβεβαιότητα που υπάρχει ως προς την εξέλιξη κάποιων μεγεθών αλλά ενσωματώνει την αβεβαιότητα αυτή στους υπολογισμούς.

Στην συνέχεια αναλύεται η αριθμητική μέθοδος εύρεσης της αξίας της επένδυσης η οποία χρησιμοποιείται στο πλαίσιο της παρούσας διατριβής. Η ανάπτυξη της μεθόδου θα γίνει με την βοήθεια ενός παραδείγματος (Dixit & Pindyck, 1994). Θεωρούμε ότι ένας επενδυτής εξετάζει την επένδυση σε ένα εργοστάσιο που παράγει κάποιο προϊόν.

Η επένδυση θεωρείται μη αναστρέψιμη, το οποίο σημαίνει ότι σε περίπτωση που οι συνθήκες για την προσφορά του προϊόντος του συγκεκριμένου εργοστασίου δεν είναι ευνοϊκές, ο επενδυτής του συγκεκριμένου εργοστασίου δεν μπορεί να το πουλήσει αφού δεν έχει αξία μεταπώλησης με αποτέλεσμα να μην μπορεί να ανακτήσει το αρχικό επενδυθέν κεφάλαιο. Στην συνέχεια θεωρείται ότι το εργοστάσιο έχει κεφαλαιουχικό κόστος 1600 Ευρώ και παράγει ένα προϊόν ανά χρονιά με μηδενικό λειτουργικό κόστος. Η τιμή του προϊόντος του εργοστασίου στην αγορά σήμερα είναι 200 Ευρώ, ενώ την επόμενη χρονιά η τιμή του θα αλλάξει. Με πιθανότητα 0.5 θα ανέβει στα 300 Ευρώ ενώ με πιθανότητα 0.5 θα πέσει στα 100 Ευρώ. Ακόμα υποθέτουμε ότι η τιμή του προϊόντος, μετά την παρατήρηση της αβέβαιης τιμής το επόμενο έτος, μένει σταθερή στο μέλλον.

Αν ο επενδυτής κατασκευάσει σήμερα το εργοστάσιο τότε η καθαρή παρούσα αξία του είναι

$$\begin{aligned} KPA_1 &= -1600 + \sum_{t=0}^{\infty} \frac{0.5 * 300 + 0.5 * 100}{(1 + \delta)^t} = -1600 + \sum_{t=0}^{\infty} \frac{200}{(1 + \delta)^t} & (11-1) \\ &= -1600 + 10 \cdot (1 + \delta) \cdot 200 = -1600 + 2200 = \text{€}600 \end{aligned}$$

όπου  $r$  είναι το επιτόκιο αναγωγής το οποίο για την ανάλυση θεωρούμε ίσο με 10%.

Από τον τύπο (11-1) προκύπτει ότι η ΚΠΑ είναι θετική όταν  $\delta > 0$ . Σύμφωνα με τον κανόνα της Καθαρής Παρούσας Αξίας προκύπτει ότι ο επενδυτής έχει όφελος από την κατασκευή του εργοστασίου, δεδομένου ότι θα του αποφέρει κέρδη.

Οι παραπάνω υπολογισμοί όμως αγνοούν την αξία της αναμονής της επένδυσης για την επόμενη χρονιά όταν πλέον η αβεβαιότητα θα έχει εξαλειφθεί. Για να μελετήσουμε αυτή την αξία θα υπολογίσουμε την ΚΠΑ θεωρώντας ότι ο επενδυτής δεν κατασκεύασε αμέσως το εργοστάσιο αλλά περίμενε την επόμενη χρονιά. Την επόμενη χρονιά όμως η τιμή του προϊόντος που παράγει το εργοστάσιο μπορεί να είναι είτε €300 είτε €100,

συνεπώς θα υπολογίσουμε την ΚΠΑ και με τις δύο τιμές. Στην περίπτωση που η τιμή του προϊόντος είναι €100:

$$KPA_{t1,1} = -\frac{1600}{1.1} + \sum_{t=1}^{\infty} \frac{100}{(1+0.1)^t} = -\frac{1600}{1.1} + \frac{11 * 100}{1.1} = -\epsilon \frac{500}{1.1} \quad (11-2)$$

Σε αυτή την περίπτωση, ο επενδυτής δεν κατασκευάζει το εργοστάσιο αφού έχει αρνητική ΚΠΑ. Όταν η τιμή του προϊόντος είναι €300:

$$KPA_{t1,2} = -\frac{1600}{1.1} + \sum_{t=1}^{\infty} \frac{300}{(1+0.1)^t} = -\frac{1600}{1.1} + \frac{11 * 300}{1.1} = \epsilon \frac{1700}{1.1} \quad (11-3)$$

Σε αυτή την περίπτωση ο επενδυτής θα κατασκευάσει το εργοστάσιο αφού προκύπτει θετική ΚΠΑ. Με δεδομένο ότι έχει 50% πιθανότητα η τιμή να είναι €100 και 50% πιθανότητα η τιμή να είναι €300, η μέση ΚΠΑ της επόμενης χρονιάς σήμερα είναι

$$KPA_2 = 0.5 * 0 + 0.5 * \frac{1700}{1.1} = \epsilon 773 \quad (11-4)$$

Ο πρώτος όρος είναι μηδέν (0) αφού στην περίπτωση της αρνητικής ΚΠΑ ο επενδυτής δεν κατασκευάζει το εργοστάσιο και μόνο όταν η  $KPA > 0$  το κατασκευάζει. Επομένως, προκύπτει ότι αν ο επενδυτής περιμένει ένα χρόνο τότε η  $KPA_2$  του εργοστασίου σήμερα είναι €773 που είναι μεγαλύτερη από την  $KPA_1$  αν κατασκευάσει το εργοστάσιο σήμερα χωρίς να περιμένει.

Χρειάζεται να σημειώσουμε ότι στην περίπτωση που η επιλογή που είχε ο αποφασίζων είναι «να κατασκευάσω την επένδυση σήμερα ή αλλιώς χάνω το δικαίωμα να επενδύσω», τότε ισχύει ο συμβατικός κανόνας της ΚΠΑ και θα επένδυε σήμερα αφού η  $KPA_1$  είναι θετική ( $KPA_1 > 0$ ). Εύκολα πλέον προκύπτει ότι η αξία της επένδυσης δεν είναι €600 που προκύπτει από την  $KPA_1$  αλλά είναι η μέγιστη τιμή των διαφόρων ΚΠΑ που προκύπτουν από τα διαφορετικά έτη που μπορεί να πραγματοποιηθεί η επένδυση ανηγγμένων στο παρόν έτος. Στην παρούσα διατριβή χρησιμοποιούμε αυτή την μέθοδο ώστε να υπολογίσουμε την αξία της επένδυσης.

Το παράδειγμα όπως παρουσιάστηκε προηγουμένως αποτελεί ένα πρόβλημα δύο σταδίων. Θα παρουσιάσουμε στη συνέχεια τη γενική μορφή ενός προβλήματος δύο σταδίων. Θεωρούμε  $I$  το κεφαλαιουχικό κόστος της επένδυσης στο εργοστάσιο το οποίο παράγει ένα προϊόν ανά χρονιά με μηδενικό λειτουργικό κόστος και  $\delta$  το επιτόκιο προεξόφλησης. Έστω πως η τιμή του προϊόντος στην παρούσα χρονική περίοδο  $t=0$  είναι  $P_0$ . Από την περίοδο 1 και ύστερα θα είναι  $(1+u) \cdot P_0$  με πιθανότητα  $q$  και  $(1-d) \cdot P_0$

με πιθανότητα  $1 - q$ . Αρχικά θεωρούμε πως η επένδυση δύναται να πραγματοποιηθεί μόνο κατά το παρόν έτος, δηλαδή εάν ο αποφασίζων αποφασίσει να μην πραγματοποιήσει την επένδυση, τότε δεν μπορεί να μεταβάλλει την απόφασή του στην περίοδο 1. Ονομάζουμε  $V_0$  την αναμενόμενη παρούσα αξία των κερδών του εργοστασίου εάν γίνει η επένδυση, οπότε υπολογίζουμε:

$$\begin{aligned} V_0 &= P_0 + [q(1 + u)P_0 + (1 - q)(1 - d)P_0] \cdot \left[ \frac{1}{1 + \delta} + \frac{1}{(1 + \delta)^2} + \dots \right] \\ &= P_0 + [q(1 + u)P_0 + (1 - q)(1 - d)P_0] \cdot \frac{1/(1 + \delta)}{1 - (1/(1 + \delta))} \\ &= P_0 \cdot [1 + r + q(u + d) - d]/\delta \end{aligned} \quad (11-5)$$

Στην περίπτωση που  $V_0 > I$  ο αποφασίζων έχει όφελος  $V_0 - I$  από την επένδυση, ενώ για  $V_0 < I$  δεν πραγματοποιεί την επένδυση και συνεπώς το όφελός του είναι μηδέν. Όταν  $V_0 = I$  ο αποφασίζων είναι αδιάφορος μεταξύ της επένδυσης ή της αναμονής. Θεωρούμε  $\Omega_0$  το όφελος της επένδυσης το οποίο υπολογίζεται όπως

$$\Omega_0 = \max(V_0 - I, 0) \quad (11-6)$$

Στη συνέχεια αναλύουμε την πραγματική κατάσταση όπου ο αποφασίζων έχει τη δυνατότητα πραγματοποίησης της επένδυσης και σε περίοδο μετέπειτα της παρούσας. Στην παρούσα περίοδο 0 έχει την επιλογή να επενδύσει ή να αναμένει και να επιλέξει τη βέλτιστη απόφαση όταν έρθει η περίοδος 1. Από την περίοδο 1 και στη συνέχεια οι συνθήκες δεν μεταβάλλονται συνεπώς δεν έχει αξία η αναμονή περαιτέρω της περιόδου 1.

Η παρούσα αξία των ταμειακών ροών θα είναι

$$V_1 = P_1 + P_1/(1 + \delta) + P_1/(1 + \delta)^2 + \dots \quad (11-7)$$

Σε κάθε ένα από τα δύο ενδεχόμενα, δηλαδή εάν η τιμή στην περίοδο 1 αυξηθεί ή μειωθεί σε σχέση με την παρούσα περίοδο, ο αποφασίζων θα πραγματοποιήσει την επένδυση εάν  $V_1 > I$ , με καθαρή ροή

$$F_1 = \max(V_1 - I, 0) \quad (11-8)$$

Το αποτέλεσμα των μελλοντικών καταστάσεων αναφέρεται συχνά ως αξία αναμονής της επένδυσης (continuation value). Από την οπτική της παρούσας περιόδου, οι τιμές των  $P_1$ ,  $V_1$ ,  $F_1$  είναι άγνωστες μεταβλητές. Θεωρούμε  $E_0$  την αναμενόμενη τιμή (σταθμισμένο



μέσο όρο) η οποία υπολογίζεται με τα δεδομένα που είναι γνωστά την παρούσα περίοδο:

$$\begin{aligned} E_0[F_1] = & q \max[(1 + u) P_0 (1 + \delta)/r - I, 0] \\ & + (1 - q) \max[(1 - d) P_0 (1 + \delta)/\delta - I, 0] \end{aligned} \quad (11-9)$$

Η εξίσωση (11-9) προσδιορίζει την αξία αναμονής της επένδυσης.

Στην παρούσα περίοδο λοιπόν ο αποφασίζων επιλέγει εάν θα επενδύσει με όφελος  $V_0 - I$  ή θα επενδύσει στην περίοδο 1 με όφελος την παρούσα τιμή της  $E_0[F_1]$ . Ο αποφασίζων επιλέγει την ενέργεια με τη μεγαλύτερη τιμή εκ των δύο. Συνεπώς η παρούσα αξία της επένδυσης, η οποία συμβολίζεται με  $F_0$ , είναι:

$$F_0 = \max\left(V_0 - I, \frac{1}{1 + \delta} E_0[F_1]\right) \quad (11-10)$$

Η μεθοδολογία αυτή μπορεί να επεκταθεί σε προβλήματα πολλών σταδίων και πιο συγκεκριμένα σε προβλήματα διακριτού χρόνου τα οποία επιλύονται σύμφωνα με τις αρχές του δυναμικού προγραμματισμού.

Θεωρούμε ως  $x_t$  τις μεταβλητές κατάστασης (state variables) και  $u_t$  τις μεταβλητές απόφασης του προβλήματος (control variables). Οι τιμές των μεταβλητών κατάστασης και απόφασης σε δεδομένη χρονική περίοδο  $t$  επηρεάζουν το κέρδος της επιχείρησης  $P(x_t; u_t; d_t; r_t)$ , όπου  $d_t$  οι παράμετροι του προβλήματος των οποίων οι τιμές είναι γνωστές και  $r_t$  τα στοχαστικά μεγέθη του προβλήματος. Θεωρούμε  $\Phi(x_{t+1}|x_t, u_t)$  είναι η αθροιστική συνάρτηση κατανομής πιθανότητας της κατάστασης της επόμενης περιόδου υπό γνωστές τιμές των μεταβλητών κατάστασης και απόφασης. Δεδομένων των συμβολισμών που προσδιορίσαμε, αναλύουμε στη συνέχεια τη μέθοδο του δυναμικού προγραμματισμού. Για δεδομένες τιμές των μεταβλητών απόφασης  $u_t$ , από την επένδυση προκύπτει άμεσο κέρδος  $P(x_t; u_t; d_t; r_t)$ . Στην επόμενη περίοδο ( $t + 1$ ), η κατάσταση θα είναι η  $x_{t+1}$  και η αξία  $F_{t+1}(x_{t+1})$ . Η τιμή της αξίας δεν είναι δεδομένη συνεπώς λαμβάνουμε την αναμενόμενη τιμή ως προς το χρόνο  $t$ . Ανάγοντας την αναμενόμενη τιμή αυτή στην προηγούμενη περίοδο  $t$  και προσθέτοντάς της το κέρδος της περιόδου εκείνης προκύπτει η αξία αναμονής της επένδυσης:

$$P(x_t; u_t; d_t; r_t) + \frac{1}{1 + \delta} E_t[F_{t+1}(x_{t+1})] \quad (11-11)$$

Ο αποφασίζων θα επιλέξει τέτοιες τιμές των μεταβλητών  $u_t$  ώστε να μεγιστοποιήσει την τιμή αυτή και συνεπώς προκύπτει η αξία της επένδυσης:

$$F_t(x_t) = \max_{u_t} \left( P(x_t; u_t; d_t; r_t) + \frac{1}{1 + \delta} \mathcal{E}_t[F_{t+1}(x_{t+1})] \right) \quad (11-12)$$

Η εξίσωση αυτή **(11-12)** ονομάζεται εξίσωση του Bellman ή θεμελιώδης εξίσωση βελτιστοποίησης.

Εάν το πρόβλημα είναι απείρου ορίζοντα (infinite horizon) τότε χρειάζεται να γίνει η απλοποιητική υπόθεση πως τα μεγέθη στην **(11-12)** είναι ανεξάρτητα από τις χρονικές περιόδους  $t$ , με την έννοια πως τα μεγέθη εξαρτώνται μεν από την παρούσα κατάσταση  $x_t$  αλλά όχι από την ημερολογιακή ημερομηνία της περιόδου  $t$ . Πιο συγκεκριμένα γίνεται η υπόθεση πως η συνάρτηση κέρδους  $P(x_t; u_t; d_t; r_t)$ , η συνάρτηση κατανομής πιθανότητα  $\Phi$  και το επιτόκιο προεξόφλησης  $\delta$  είναι ανεξάρτητα από την ημερολογιακή ημερομηνία  $t$ . Η αξία της επένδυσης συνεπώς μπορεί να γραφεί χωρίς χρονική εξάρτηση ως  $F(x_t)$ . Η εξίσωση Bellman **(11-12)** για κάθε περίοδο  $t$  γράφεται:

$$F(x_t) = \max_{u_t} \left( P(x_t; u_t; d_t; r_t) + \frac{1}{1 + \delta} \mathcal{E}_t[F(x_{t+1})] \right) \quad (11-13)$$

Στο πρόβλημα πολλών σταδίων όπως αναλύθηκε προηγουμένως θεωρούμε πως κάθε χρονική περίοδος έχει διάρκεια  $\Delta t$ . Ενδιαφερόμαστε για το όριο όταν σε συνεχή χρόνο η χρονική διάρκεια τείνει στο μηδέν. Ορίζουμε  $P(x; u; d; r; t)$  το ρυθμό των καθαρών ροών έτσι ώστε το πραγματικό κέρδος σε μια χρονική περίοδο με διάρκεια  $\Delta t$  είναι  $P(x; u; d; r; t) \cdot \Delta t$ . Ομοίως θεωρούμε το επιτόκιο αναγωγής ανά μονάδα χρόνου ώστε ο συντελεστής αναγωγής να διαμορφώνεται ως  $1/(1 + \delta \cdot \Delta t)$ .

Επομένως η εξίσωση Bellman μπορεί να γραφεί ως:

$$F(x, t) = \max_u \left( P(x; u; d; r; t) \cdot \Delta t + \frac{1}{1 + \delta \cdot \Delta t} \mathcal{E}[F(x', t + \Delta t | x, u)] \right) \quad (11-14)$$

Πολλαπλασιάζοντας με  $1 + \delta \cdot \Delta t$  και αναδιατάσσοντας:

$$\begin{aligned} \delta \Delta t F(x, t) &= \max_u (P(x; u; d; r; t) \Delta t (1 + \delta \Delta t) \\ &\quad + \mathcal{E}[F(x', t + \Delta t) - F(x', t)]) \\ &= \max_u (P(x; u; d; r; t) \Delta t (1 + \delta \Delta t) + \mathcal{E}[\Delta F]) \end{aligned} \quad (11-15)$$

Διαιρώντας με  $\Delta t$  και για τιμές που τείνουν στο μηδέν:

$$\delta F(x, t) = \max_u \left( P(x; u; d; r; t) + \frac{1}{dt} \mathcal{E}[dF] \right) \quad (11-16)$$

Όπου  $(1/dt) \mathcal{E}[dF]$  είναι το όριο του όρου  $(1/\Delta t) \mathcal{E}[\Delta F]$

Στο αριστερό μέλος της εξίσωσης δίνεται η απόδοση ανά μονάδα χρόνου που θα ζητούσε ο αποφασίζων, ο οποίος χρησιμοποιεί επιτόκιο προεξόφλησης  $\delta$ , για να διακρατήσει το δικαίωμα επένδυσης που έχει. Στο δεξί μέλος, ο πρώτος όρος υπολογίζει το άμεσος κέρδος που προκύπτει και ο δεύτερος την αναμενόμενη τιμή του ρυθμού αύξησης του κεφαλαίου εάν είναι θετικός ή απώλειας εάν είναι αρνητικός, δείχνει δηλαδή την αναμενόμενη μεταβολή της αξίας του δικαιώματος. Όταν τα δύο αυτά μέλη είναι ίσα, η **(11-16)** προσδιορίζει μια συνθήκη χωρίς arbitrage η οποία εκφράζει την επιθυμία του αποφασίζοντα να διακρατήσει το δικαίωμα επένδυσης που έχει.

Όταν τα στοχαστικά μεγέθη του προβλήματος θεωρείται πως ακολουθούν στοχαστικές ανελίξεις, η αναλυτική έκφραση της αξίας της επένδυσης υπολογίζεται από την **(11-16)** με χρήση των αναλυτικών εκφράσεων των στοχαστικών ανελίξεων και με χρήση της διαφορίσης κατά Ito.

### 11.3 Ανάπτυξη του υποδείγματος αξιολόγησης των επενδύσεων με τη μέθοδο των δικαιωμάτων προαίρεσης

Στο παρόν κεφάλαιο, η αξιολόγηση των επενδύσεων γίνεται με τη μέθοδο των δικαιωμάτων προαίρεσης. Στο υπόδειγμα θεωρούμε ως πιθανοτικά μεγέθη τις τιμές των καυσίμων, την τιμή αγοράς των δικαιωμάτων εκπομπών  $CO_2$  και την οριακή τιμή του συστήματος. Συγκεκριμένα το υπόδειγμα που αναπτύσσουμε είναι διακριτού χρόνου και διακριτών καταστάσεων και για την επίλυσή του χρησιμοποιούμε τη μεθοδολογία που αναπτύχθηκε προηγουμένως (κεφάλαιο 11.2) για ένα πρόβλημα διακριτού χρόνου πολλών περιόδων.

Στο υπόδειγμα που αναπτύσσουμε βρίσκουμε την ΚΠΑ ενδογενώς κατά την επίλυση του προβλήματος. Για να υπολογίσουμε την ΚΠΑ, χρειάζεται να υπολογίσουμε τα έσοδα και το κόστος των διαφόρων σταθμών για κάθε έτος λειτουργίας. Το κόστος αυτό υπολογίζεται με βάση το λειτουργικό κόστος αλλά και την αποπληρωμή του κεφαλαίου όπου η στοχαστικότητα αφορά την τιμή των καυσίμων και την τιμή των δικαιωμάτων εκπομπών  $CO_2$ . Τα έσοδα προκύπτουν από την Οριακή Τιμή Συστήματος (ΟΤΣ) πολλαπλασιαζόμενα με την παραγωγή του κάθε σταθμού. Η στοχαστικότητα των εσόδων αφορά την ΟΤΣ η οποία ακολουθεί στοχαστική ανέλιξη διαφορετική για κάθε τυπική ώρα και έτος θεώρησης επένδυσης. Η υπόθεση για την στοχαστική ανέλιξη που ακολουθεί η ΟΤΣ πριν την επίλυση του μοντέλου είναι ισχυρή αφού υποθέτει ότι ο αποφασίζων γνωρίζει εκ των προτέρων την κίνηση της ΟΤΣ. Αυτή η υπόθεση όμως για ένα υπόδειγμα μεγάλης κλίμακας μακροχρόνιου ενεργειακού σχεδιασμού μπορεί να γίνει με μεγάλη ακρίβεια. Γι' αυτό το σκοπό και πριν την επίλυση του συγκεκριμένου υποδείγματος, επιλύουμε το αιτιοκρατικό υπόδειγμα όπως αναφέρθηκε στο κεφάλαιο

4. Προκύπτει με αυτή την μέθοδο μια εκτίμηση για την μελλοντική εξέλιξη του ηλεκτρικού συστήματος καθώς και για το είδος του σταθμού που διαμορφώνει την ΟΤΣ για κάθε τυπική ώρα και έτος. Έτσι ο αποφασίζων λαμβάνοντας υπόψιν την επίλυση του αιτιοκρατικού υποδείγματος, αποφασίζει σχετικά με την στοχαστική ανέλιξη που προσομοιώνει την μελλοντική εξέλιξη της ΟΤΣ.

Επιπλέον, όπως έχει ήδη αναφερθεί στο υποκεφάλαιο 3.4, στην παρούσα διατριβή τα πιθανοτικά μεγέθη του υποδείγματος θεωρείται ότι ακολουθούν στοχαστικές ανελίξεις. Όπως έχει ήδη αναφερθεί το υπόδειγμα είναι διακριτού χρόνου και διακριτών καταστάσεων. Για την εύρεση των καταστάσεων ακολουθείται η παρακάτω μεθοδολογία. Αρχικά γίνεται δειγματοληψία των στοχαστικών ανελίξεων με σκοπό την εύρεση πολλών δειγμάτων ώστε να αντιπροσωπεύεται επαρκώς ο δειγματικός χώρος της εκάστοτε στοχαστικής ανελίξης. Στην συνέχεια χρησιμοποιήσαμε μαθηματικές μεθόδους όπως έχουν αναλυθεί στο υποκεφάλαιο 3.4 ώστε να ευρεθούν αντιπροσωπευτικά δείγματα του δειγματικού χώρου με διαφορετική πιθανότητα για το καθένα και ικανά σε αριθμό για την επίλυση μεγάλου αριθμητικού υποδείγματος αναπαράστασης του συστήματος ηλεκτροπαραγωγής διαφόρων χωρών.

Με γνωστά όλα τα παραπάνω, ο αποφασίζων μπορεί να υπολογίσει την αξία επένδυσης για κάθε σταθμό και κάθε διαφορετικό έτος επένδυσης ως συνάρτηση των ωρών λειτουργίας του σταθμού. Η αξία της επένδυσης σε συγκεκριμένο σταθμό μπορεί να βρεθεί αναλυτικά ή αριθμητικά. Η αναλυτική εύρεση της αξίας προϋποθέτει την χρήση απλών και συγκεκριμένων στοχαστικών ανελίξεων. Η αριθμητική εύρεση αντιθέτως δίνει την ευελιξία χρήσης μεγαλύτερου εύρους στοχαστικών ανελίξεων.

Στην παρούσα διατριβή ενδιαφερόμαστε να ενσωματώσουμε την μεθοδολογία αξιολόγησης των επενδύσεων σε ενεργειακό υπόδειγμα μεγάλης κλίμακας με ευελιξία ως προς τη χρήση διαφόρων μορφών στοχαστικών ανελίξεων για τις στοχαστικές παραμέτρους. Γ' αυτό το σκοπό θα υπολογίσουμε την αξία της επένδυσης με χρήση της ΚΠΑ, όπως έχει ήδη αναφερθεί, αριθμητικά.

Για να βρούμε την μέση τιμή της ΚΠΑ χρησιμοποιήσαμε τον παρακάτω τύπο

$$\begin{aligned}
 & KPA_{i,n,\tau} \\
 & = -I_{i,n,\tau} \\
 & + \sum_q p_{q,\tau} \cdot \left( \sum_{t=\tau}^{t=\tau+lifetime_{i,n,\tau}} \left[ \frac{Rev(OpHrs_t; q)_{i,n,t} - Cost(OpHrs_t; q)_{i,n,t}}{(1+r)^t} \right] \right) \quad (11-17)
 \end{aligned}$$

Όπου  $I_{i,n,\tau}$  είναι το κεφαλαιουχικό κόστος του σταθμού  $n$  που κατασκευάζεται το έτος  $\tau$  στην χώρα  $i$ .

$p_{q,\tau}$  είναι η πιθανότητα του αντιπροσωπευτικού δείγματος  $q$  το έτος θεώρησης  $\tau$ ,

$Rev(OpHrs_t; q)_{i,n,t}$  είναι τα έσοδα του σταθμού  $n$  που βρίσκεται στην χώρα  $i$  το έτος  $t$  και υποθέτοντας εξέλιξη των στοχαστικών παραμέτρων όπως στο σενάριο  $q$ . Τα έσοδα είναι συνάρτηση των ωρών λειτουργίας του σταθμού  $OpHrs_t$  το έτος  $t$ ,

$Cost(OpHrs_t; q)_{i,n,t}$  είναι το κόστος του σταθμού  $n$  που βρίσκεται στην χώρα  $i$  το έτος  $t$  και υποθέτοντας εξέλιξη των στοχαστικών παραμέτρων όπως στο σενάριο  $q$ . Το κόστος είναι συνάρτηση των ωρών λειτουργίας του σταθμού  $OpHrs_t$  το έτος  $t$ ,

$r$  είναι το επιτόκιο αναγωγής που χρησιμοποιήθηκε,

$lifetime_{i,n,\tau}$  είναι ο χρόνος ζωής του σταθμού  $n$  που κατασκευάζεται το έτος  $\tau$  στην χώρα  $i$ .

Επομένως, το αιτιοκρατικό υπόδειγμα που αναπτύχθηκε στο κεφάλαιο 4 επεκτείνεται με τον τύπο **(11-17)** ώστε να υπολογίζεται ενδογενώς η ΚΠΑ κάθε σταθμού για κάθε έτος θεώρησης επένδυσης. Η αξία ενός σταθμού  $n$  είναι η μέγιστη ανηγμένη στο παρόν έτος ΚΠΑ μεταξύ των ετών που μπορεί να κατασκευαστεί ένας σταθμός  $n$ . Η αντικειμενική συνάρτηση του υποδείγματος στο οποίο εφαρμόζεται η μεθοδολογία των δικαιωμάτων προαίρεσης προσαρμόζεται ανάλογα ώστε οι επενδύσεις σε νέους σταθμούς ή η ανακαίνιση παλαιών να αποφασίζονται με βάση την μεγιστοποίηση της αξίας τους. Αυτό θα οδηγήσει τον αλγόριθμο επίλυσης να επιλέξει εκείνη την επένδυση και εκείνη την χρονιά ώστε να μεγιστοποιήσει την συνολική αξία των επενδύσεων.

Η αξία των επενδύσεων όπως αναλύθηκε προηγουμένως υπολογίζεται για τις νέες επενδύσεις που εξετάζονται στο χρονικό διάστημα της μελέτης. Για τους σταθμούς που προϋπήρχαν την εξεταζόμενη περίοδο υπολογίζεται η αξία της λειτουργίας τους.

Στο υπόδειγμα του συγκεκριμένου κεφαλαίου όπου βρίσκουμε την αξία κάθε επένδυσης, υπάρχει η δυνατότητα της αποτυχίας της επιχείρησης που λειτουργεί στην αγορά να ικανοποιήσει την ζήτηση σε συγκεκριμένες τυπικές ώρες σε μελλοντικά έτη. Ο επενδυτής αποφασίζει την κατασκευή ενός νέου σταθμού ή την ανακαίνιση κάποιου παλαιού μόνο στην περίπτωση που η αξία της συγκεκριμένης επένδυσης είναι θετική. Στην περίπτωση που η αξία της όπως την έχει υπολογίσει με βάση τις στοχαστικές ανελίξεις που έχει θεωρήσει για τις πιθανοτικές παραμέτρους είναι αρνητική τότε δεν πραγματοποιεί την επένδυση. Αυτό μπορεί να οδηγήσει το σύστημα σε κάποιο μελλοντικό έτος να μην μπορεί να καλύψει την ζήτηση σε κάποια τυπική ώρα αφού όλη η εγκατεστημένη ισχύς του συστήματος όπως έχει προκύψει από τις αποξηλώσεις και τις

επενδύσεις δεν θα επαρκεί να ικανοποιήσει την ζήτηση. Σε αυτή την περίπτωση, ο ρυθμιστής της αγοράς επεμβαίνει με πρόστιμο, το οποίο καταλογίζει στην επιχείρηση, ανάλογο της μη ικανοποιηθείσας ενέργειας. Έτσι η επιχείρηση στην απόφασή της σχετικά με επένδυση ή όχι λαμβάνει υπόψιν επίσης και το ενδεχόμενο πρόστιμο το οποίο μπορεί να της επιβληθεί. Η αντικειμενική συνάρτηση για το υπόδειγμα αυτού του κεφαλαίου είναι όπως

$$\max[Value_{i,nn,\tau} + Value_{i,no,t} - Fine\_unserved\_energy_{i,t}] \quad (11-18)$$

Όπου  $no$  οι σταθμοί που προϋπήρχαν το έτος έναρξης της μελέτης

$nn$  οι νέοι σταθμοί που κατασκευάζονται μετά το έτος έναρξης της μελέτης

$Value_{i,nn,\tau}$  η αξία της επένδυσης στο σταθμό  $nn$  που κατασκευάζεται το έτος  $\tau$  στη χώρα  $i$

$Value_{i,no,\tau}$  η αξία λειτουργίας του σταθμού  $no$

$Fine\_unserved\_energy_{i,t}$  είναι το πρόστιμο που πληρώνει η επιχείρηση για την ηλεκτρική ενέργεια που δεν κάλυψε

### 11.3.1 Ετησιοποίηση κεφαλαιουχικού κόστους

Στα έτη μελέτης του υποδείγματος δεν περιλαμβάνεται όλο ο χρόνος ζωής των νέων επενδύσεων καθώς για μερικές η διάρκεια ζωής τους είναι μεγαλύτερη από το έτος που ολοκληρώνεται η μελέτη. Για να ληφθεί υπόψιν η διάρκεια ζωής των σταθμών στον υπολογισμό της μέσης τιμής της ΚΠΑ χρησιμοποιήσαμε τον παρακάτω τύπο:

$$KPA_{i,n,\tau} = \sum_q p_{q,\tau} * \left( \sum_{t=\tau}^{t=\tau+lifetime_{i,n,\tau}} \left[ \frac{Rev(OpHrs_t; q)_{i,n,t} - Cost(OpHrs_t; q)_{i,n,t}}{(1+r)^t} - \frac{I_{i,n,\tau} \cdot ann_{i,n,\tau}}{(1+r)^t} \right] \right) \quad (11-19)$$

Όπου:  $ann_{i,n,\tau}$  ο συντελεστής ανάκτησης κεφαλαίου (capital recovery factor), ο οποίος υπολογίζεται από τον τύπο **(11-20)**

$$ann_{i,n,\tau} = \frac{i}{(1 - (1+i)^{-n})} \quad (11-20)$$

Με την χρήση αυτής της μεθόδου για την αξία της επένδυσης το κεφαλαιουχικό κόστος έχει αναχθεί στα έτη λειτουργίας. Έτσι εξαλείφεται κατά το δυνατόν η κλίση επενδύσεων ιδίως στα τελευταία έτη επίλυσης προς μονάδες με μικρό κεφαλαιουχικό κόστος εξαιτίας του γεγονότος ότι δεν αθροίζονται τα κέρδη όλων των ετών λειτουργίας του σταθμού αλλά μόνο των ετών μέχρι τα οποία επιλύει το πρόβλημα. Ένα μειονέκτημα, όμως, της μεθοδολογίας αυτής έγκειται στο γεγονός ότι αγνοούνται τα κέρδη, θετικά ή αρνητικά, που θα έχουν οι σταθμοί μετά το έτος που τελειώνει η μελέτη.

#### 11.4 Ανάπτυξη υποδείγματος ενεργειακού σχεδιασμού με αξιολόγηση των επενδύσεων με τη χρήση δικαιωμάτων προαίρεσης (Real Options Approach)

Στο υπόδειγμα του συγκεκριμένου κεφαλαίου, οι τιμές των καυσίμων, η τιμή των δικαιωμάτων εκπομπών  $CO_2$  και η Οριακή Τιμή Συστήματος είναι πιθανοτικά μεγέθη και ακολουθούν τη στοχαστική ανέλιξη Γεωμετρική Κίνηση Brown όπως έχουμε ήδη αναφέρει. Αρχικά, εφαρμόσαμε την διαδικασία όπως έχει αναλυθεί στο κεφάλαιο 3.4 για την παραγωγή αντιπροσωπευτικών δειγμάτων με αντίστοιχες πιθανότητες για τις στοχαστικές ανελίξεις που έχουμε θεωρήσει για κάθε στοχαστική παράμετρο.

$$fp_{q,i,f,\tau,t}, ETS p_{q,\tau,t}, SMP p_{c,q,i,s,\tau,t}$$

όπου  $q$  είναι το σύνολο των θεωρούμενων αντιπροσωπευτικών σεναρίων και  $\tau$  είναι ο χρόνος θεώρησης της επένδυσης.

Όπως αναλύθηκε στο κεφάλαιο 11.1, ο αποφασίζων μπορεί να υπολογίσει την αξία επένδυσης για κάθε σταθμό και κάθε διαφορετικό έτος επένδυσης ως συνάρτηση των ωρών λειτουργίας του σταθμού. Η αξία της επένδυσης σε συγκεκριμένο σταθμό θα βρεθεί αριθμητικά. Το υπόδειγμα υπολογίζει την αξία των επενδύσεων σε κάθε έτος επένδυσης  $\tau$  ενδογενώς. Εξωγενώς υπολογίζονται μόνο τα δείγματα των πιθανοτικών ανελίξεων.

Ενδογενώς, η αξία της επένδυσης σε κάθε σταθμό υπολογίζεται με χρήση της ΚΠΑ όπως έχει ήδη αναφερθεί στο κεφάλαιο 11.2. Για κάθε σενάριο  $q$  των στοχαστικών παραμέτρων και για κάθε έτος επένδυσης  $\tau$  που μπορεί να πραγματοποιηθεί μια επένδυση υπολογίζονται οι χρονοσειρές από την προσφορά της παραγόμενης ενέργειας, του ετήσιου τοκοχρεολυσίου, του μεταβλητού κόστους, του κόστους αγοράς καυσίμων και του κόστους αγοράς δικαιωμάτων εκπομπών  $CO_2$ . Στη συνέχεια για κάθε σενάριο  $q$  εξέλιξης των πιθανοτικών μεγεθών υπολογίζεται η χρονοσειρά των κερδών του κάθε σταθμού ( $Vt_{q,i,nn,\tau,t}$ ).

$$Vt_{q,i,nn,\tau,t} = Int_{q,i,nn,\tau,t} - OCt_{q,i,nn,\tau,t} \quad (11-21)$$

όπου:  $Vt_{q,i,nn,\tau,t}$  το κέρδος της επένδυσης του σταθμού  $nn$  που κατασκευάστηκε την χρονιά  $t$  στην χώρα  $i$  και λειτουργεί την χρονιά  $t$  για το σενάριο  $q$  [€/KW]

$Int_{q,i,nn,\tau,t}$  τα έσοδα από την προσφορά της παραγόμενης ενέργειας της επένδυσης του σταθμού  $nn$  που κατασκευάστηκε την χρονιά  $\tau$  στην χώρα  $i$  και λειτουργεί την χρονιά  $t$  για το σενάριο  $q$  [€/KW]

$OCt_{q,i,nn,\tau,t}$  το κόστος της επένδυσης του σταθμού  $nn$  που κατασκευάστηκε την χρονιά  $\tau$  στην χώρα  $i$  και λειτουργεί την χρονιά  $t$  για το σενάριο  $q$  [€/KW]

Στη συνέχεια υπολογίζεται η μέση τιμή των τιμών του κέρδους της επένδυσης του σταθμού  $nn$  που κατασκευάστηκε την χρονιά  $\tau$  στην χώρα  $i$  και λειτουργεί την χρονιά  $t$  και υπολογίζεται η ΚΠΑ ( $Vk_{i,nn,\tau}$ ) του νέου σταθμού  $nn$  που κατασκευάστηκε την χρονιά  $\tau$  στην χώρα  $i$  ως οι τιμές του κέρδους από τη λειτουργία του έτους  $t$  ανηγμένες στο έτος κατασκευής της επένδυσης  $\tau$ :

$$Vk_{i,nn,\tau} = \sum_{t, t \geq \tau} \frac{E_q(Vt_{q,i,nn,\tau,t})}{(1+r)^{t-\tau}} \quad (11-22)$$

Όπως αναλύθηκε προηγουμένως, η αξία επένδυσης ( $V_{i,nn,\tau}$ ) το έτος  $\tau$  ενός σταθμού  $nn$  είναι η μέγιστη ανηγμένη στο έτος αυτό ΚΠΑ μεταξύ των μετέπειτα ετών που μπορεί να κατασκευαστεί.

$$V_{i,nn,\tau} = \max_{\tau' \geq \tau} \left[ \frac{Vk_{i,nn,\tau'}}{(1+r)^{\tau'-\tau}} \right] \quad (11-23)$$

Η αξία της επένδυσης υπολογίστηκε για επενδύσεις κατασκευής νέων μονάδων  $nn$  ( $VI_{i,nn,\tau}$ ) και επενδύσεις ανακαίνισης όλων των μονάδων  $n$  ( $VEI_{i,n,\tau}$ ).

Με παρόμοιο τρόπο υπολογίζεται η αξία συνέχισης της λειτουργίας ενός σταθμού που προϋπήρχε το διάστημα μελέτης για κάθε εξεταζόμενο έτος λειτουργίας  $t$  ( $VG_{i,no,t}$ ). Αρχικά, για κάθε σενάριο  $q$  εξέλιξης των πιθανοτικών μεγεθών και για κάθε εξεταζόμενο έτος λειτουργίας  $t$  υπολογίζονται τα έσοδα του σταθμού από την προσφορά της παραγόμενης ενέργειας καθώς και το κόστος λόγω της λειτουργίας (κόστος αγοράς καυσίμων, κόστος αγοράς δικαιωμάτων εκπομπών, μεταβλητό κόστος λειτουργίας). Στη συνέχεια, για κάθε έτος λειτουργίας υπολογίζεται η μέση τιμή του κέρδους από τη λειτουργία των σεναρίων  $q$  εξέλιξης των πιθανοτικών μεγεθών. Η αξία συνέχισης λειτουργίας ενός σταθμού  $no$  (σύνολο σταθμών ήδη κατασκευασμένων το έτος έναρξης



της επίλυσης) για κάθε εξεταζόμενο έτος  $t$  υπολογίζεται ως η μέγιστη τιμή μεταξύ τιμών του κέρδους του σταθμού από τη λειτουργία για τα εξεταζόμενα έτη λειτουργίας. Στην περίπτωση που η αξία ενός ήδη εγκατεστημένου σταθμού για ένα έτος λειτουργίας  $t$  είναι αρνητική, συνεπάγεται ότι ο σταθμός θα έχει ζημία από τη λειτουργία του εκείνο το έτος με αποτέλεσμα η επιχείρηση σήμερα να υποθέσει ότι δεν θα λειτουργήσει εκείνο το έτος.

Στην συνέχεια θα αναπτύξουμε λεπτομερώς την μεθοδολογία που έχει χρησιμοποιηθεί στο υπόδειγμα. Αρχικά όπως έχουμε ήδη αναφέρει υπολογίζουμε την αξία που προκύπτει για την επιχείρηση από επένδυση σε σταθμό ηλεκτροπαραγωγής. Η αξία προκύπτει χρησιμοποιώντας την **(11-23)**.

$$V_{i,n,\tau} = \varepsilon \left[ \sum_{t \geq \tau} \frac{\tilde{SMP}_{\tau,t} G_{i,n,\tau,t} - I_{i,n,\tau} sv_{i,n,\tau,t} cc_{i,n,\tau} - \tilde{v}c_{i,n,\tau,t} G_{i,n,\tau,t}}{(1+r)^{t-\tau}} \right] \quad (11-24)$$

όπου με

$\tilde{SMP}_{\tau,t}$  αναπαριστάνονται αντιπροσωπευτικά δείγματα της θεωρούμενης στοχαστικής ανέλιξης της οριακής τιμής συστήματος. Είναι εξωγενής υπόθεση του υποδείγματος. Τα δείγματα όπως συμβολίζονται έχουν δύο δείκτες χρόνου. Ο πρώτος δείκτης αφορά το έτος θεώρησης κατασκευής επένδυσης και ο δεύτερος δείκτης δείχνει το χρόνο λειτουργίας. Πρακτικά το  $\tilde{SMP}_{\tau,t}$  αναπαριστά τα δείγματα που ξεκινούν το έτος  $\tau$  και αφορούν το έτος  $t$ .

$G_{i,n,\tau,t}$  είναι η παραγωγή σταθμού  $n$  που λειτουργεί στην χώρα  $i$ , κατασκευάστηκε το έτος  $\tau$  και λειτουργεί την χρονιά  $t$ . Η  $G_{i,n,\tau,t}$  είναι μεταβλητή του προβλήματος και προκύπτει ενδογενώς κατά επίλυση.

$I_{i,n,\tau}$  είναι η επένδυση του σταθμού  $n$  το έτος  $\tau$  στην χώρα  $i$ . Είναι μεταβλητή του προβλήματος και προκύπτει από την επίλυση

$sv_{i,n,\tau,t}, cc_{i,n,\tau}$  είναι εξωγενείς παράμετροι του υποδείγματος που δηλώνουν τον χρόνο ζωής της επένδυσης και την ετήσια αποπληρωμή μοναδιαίας επένδυσης

$\tilde{v}c_{i,n,\tau,t}$  είναι η παράμετρος που δηλώνει το μεταβλητό κόστος ανά μονάδα παραγόμενης ενέργειας

$r$  είναι το επιτόκιο αναγωγής μελλοντικών κερδών στο έτος κατασκευής επένδυσης.

Στο παρόν υποκεφάλαιο θεωρούμε ότι η αγορά λειτουργεί υπό καθεστώς τέλειου ανταγωνισμού το οποίο συνεπάγεται ότι η επιχείρηση ούτε γνωρίζει την συνάρτηση

ζήτησης ούτε μπορεί να την επηρεάσει. Στην μοντελοποίηση έχουμε θεωρήσει ότι τα αντιπροσωπευτικά δείγματα που προκύπτουν για την οριακή τιμή συστήματος δεν αλλάζουν κατά την επίλυση του μοντέλου.

Από την (11-24) προκύπτουν τα εξής βασικά συμπεράσματα. Η μεταβολή της αξίας της επένδυσης ως προς την μεταβολή της παραγωγή του σταθμού  $\left(\frac{\partial V_{i,n,\tau}}{\partial G_{i,n,\tau,t}}\right) > 0$  είναι εξ' υποθέσεως θετική. Υποθέτουμε ότι η στοχαστική ανέλιξη που έχει θεωρηθεί είναι ικανή ώστε να καλυφθεί το μεταβλητό κόστος  $\tilde{v}c_{i,n,\tau,t}$ . Ακόμα όπως εύκολα εξάγεται από την (11-24), η μεταβολή της αξίας της επένδυσης ως προς την μεταβολή του μεγέθους της επένδυσης είναι αρνητική  $\left(\frac{\partial V_{i,n,\tau}}{\partial I_{i,n,\tau}}\right) < 0$ . Στο παρών υποκεφάλαιο επιλύουμε το υπόδειγμα με την υπόθεση ότι η αγορά λειτουργεί υπό καθεστώς τέλειου ανταγωνισμού. Σε αυτή την περίπτωση, ισχύει ότι  $\frac{\partial V_{i,n,\tau}}{\partial G_{i,n,\tau,t}} = \frac{\partial V_{i,n,\tau}}{\partial I_{i,n,\tau}} = 0$  επειδή γίνεται η υπόθεση ότι η κάθε επιχείρηση είναι μικρή σε σχέση με την αγορά και η αγορά απορροφά όλη την παραγόμενη ενέργεια της επιχείρησης.

Στην συνέχεια θα παρουσιάσουμε ένα απλοποιημένο υπόδειγμα ηλεκτρικού τομέα ώστε να δείξουμε βασικές παρατηρήσεις που προκύπτουν από την αξιολόγηση της αβεβαιότητας με χρήση της μεθόδου των δικαιωμάτων προαίρεσης.

Το απλοποιημένο υπόδειγμα έχει ως εξής (i είναι το σύνολο των χωρών που επιλύουμε)

$$\begin{aligned} & \underset{q_{i,t}, I_{i,n,\tau}, G_{i,n,\tau,t}}{\text{MAX}} \sum_t P_{i,t} q_{i,t} \\ & - \sum_t \left[ \sum_n \sum_{\tau \leq t} I_{i,n,\tau} s v_{i,n,\tau,t} c c_{i,n,\tau} + \sum_n \sum_{\tau \leq t} v c_{i,n,\tau,t} G_{i,n,\tau,t} \right] \\ & + \sum_n \sum_{\tau \leq t} I_{i,n,\tau} s v_{i,n,\tau,t} V_{i,n,\tau} \end{aligned} \quad (11-25)$$

$$- FLOL_{i,t} \left( \sum_n \sum_{\tau \leq t} \left( exogcap_{i,n,\tau,t} + I_{i,n,\tau} s v_{i,n,\tau,t} - \frac{Qr_{i,t}}{\nu} \right) \right)$$

$$s. t. \quad \sum_n \sum_{\tau \leq t} G_{i,n,\tau,t} \geq q_{i,t} \quad \perp \lambda_{i,t} \quad (11-26)$$

$$I_{i,n,\tau} s v_{i,n,\tau,t} \geq G_{i,n,\tau,t} \quad \perp \xi_{i,n,\tau,t} \quad (11-27)$$

όπου

$exogcap_{i,n,\tau,t}$  είναι η εγκατεστημένη ισχύς των ήδη υπαρχόντων σταθμών το έτος έναρξης της μελέτης. Αυτή η παράμετρος δείχνει την εγκατεστημένη ισχύ του σταθμού η που κατασκευάστηκε το έτος  $\tau$  το έτος λειτουργίας  $t$ .

$Q_{i,t}$  είναι η εξέλιξη της ζήτησης την οποία θεωρεί ο ρυθμιστής της αγοράς και η οποία πρέπει να καλύπτεται από την αγορά

$\nu$  είναι ο αριθμός των συμμετρικών επιχειρήσεων που λειτουργούν στην αγορά.

Οι περιορισμοί μένουν όπως στο κεφάλαιο 4.

Στην αντικειμενική συνάρτηση **(11-25)** έχουμε συμβολίσει την τιμή που εισπράττει η επιχείρηση από την πώληση ηλεκτρισμού  $P_{i,t}$ . Αυτή η τιμή προέρχεται από περιορισμό ισορροπίας

$$P_{i,t} = a_t - \beta_t \nu q_{i,t} \quad (11-28)$$

Στην **(11-25)** έχουμε εισάγει την συνάρτηση  $FLOL_{i,t} \left( \sum_n \sum_{\tau \leq t} \left( exogcap_{i,n,\tau,t} + I_{i,n,\tau} s\nu_{i,n,\tau,t} - \frac{Q_{i,t}}{\nu} \right) \right)$ . Αυτή η συνάρτηση αντιπροσωπεύει το «πρόστιμο» που επωμίζεται η κάθε συμμετρική επιχείρηση ανάλογα με την τιμή της παραμέτρου  $\sum_n \sum_{\tau \leq t} \left( exogcap_{i,n,\tau,t} + I_{i,n,\tau} s\nu_{i,n,\tau,t} - \frac{Q_{i,t}}{\nu} \right)$ . Όσο η συνολική εγκατεστημένη ισχύς της κάθε επιχείρησης τείνει προς το ελάχιστο όριο που έχει θέσει ο ρυθμιστής  $\frac{Q_{i,t}}{\nu}$ , τόσο αυξάνεται η πιθανότητα περικοπής φορτίου περισσότερες ώρες από τον ανεκτό όριο. Αυτό συνεπάγεται αυξημένο πρόστιμο για την επιχείρηση. Έτσι ισχύει ότι

$$\frac{\partial FLOL_{i,t} \left( \sum_n \sum_{\tau \leq t} \left( exogcap_{i,n,\tau,t} + I_{i,n,\tau} s\nu_{i,n,\tau,t} - \frac{Q_{i,t}}{\nu} \right) \right)}{\partial I_{i,n,\tau}} \leq 0 \quad (11-29)$$

Χρησιμοποιώντας την Λαγκρανζιανή για την εύρεση των συνθηκών βέλτιστου πρώτης τάξης προκύπτει

$$\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial G_{i,n,\tau,t}} = +\nu c_{i,n,\tau,t} - \lambda_{i,t} + \xi_{i,n,\tau,t} \geq 0 \quad \perp G_{i,n,\tau,t} \geq 0 \quad (11-30)$$

$$\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial q_{i,t}} = -P_{i,t} + \lambda_{i,t} \geq 0 \quad \perp q_{i,t} \geq 0 \quad (11-31)$$

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial I_{i,n,\tau}} = & \sum_{t \geq \tau} sv_{i,n,\tau,t} cc_{i,n,\tau} - \overbrace{\sum_{t \geq \tau} sv_{i,n,\tau,t} V_{i,n,\tau}}^{\text{αξία οριακής επένδυση}} \\
 & + \frac{\partial FLOL_{i,t} \left( \sum_n \sum_{\tau \leq t} \left( exogcap_{i,n,\tau,t} + I_{i,n,\tau} sv_{i,n,\tau,t} - \frac{Qr_{i,t}}{\nu} \right) \right)}{\partial I_{i,n,\tau}} \quad (11-32) \\
 & - \sum_{t \geq \tau} \xi_{i,n,\tau,t} \geq 0 \quad \perp I_{i,n,\tau} \geq 0
 \end{aligned}$$

Από τις παραπάνω σχέσεις προκύπτει ότι με δεδομένο ότι  $q_{i,t} > 0 \Rightarrow \lambda_{i,t} = P_{i,t}$ . Στην περίπτωση που  $G_{i,n,\tau,t} > 0 \Rightarrow +vc_{i,n,\tau,t} + \xi_{i,n,\tau,t} = \lambda_{i,t} = P_{i,t}$ , από την οποία συνάγεται ότι

$$\xi_{i,n,\tau,t} = P_{i,t} - vc_{i,n,\tau,t} \quad (11-33)$$

Το  $\xi_{i,n,\tau,t}$  αναπαριστά το χρηματικό όφελος σταθμού  $n$  που κατασκευάστηκε το έτος  $\tau$  και λειτουργεί το έτος  $t$  στην χώρα  $i$ . Από την (11-32) προκύπτει ότι το συνολικό χρηματικό όφελος από την επένδυση συγκρίνεται με το κόστος  $cc_{i,n,\tau}$  και την αξία της επένδυσης όπως προκύπτει από την (11-24).

Στην αγορά που λειτουργεί υπό καθεστώς τέλειου ανταγωνισμού, η αξία της επένδυσης δεν μπορεί να είναι πολύ μεγαλύτερη από το μηδέν καθώς στην περίπτωση που υπήρχε κάποια επένδυση με αξία αρκετά μεγαλύτερη του μηδενός τότε όλες οι επιχειρήσεις στην αγορά θα επένδυαν σε αυτή την επένδυση και οι τιμές ηλεκτρισμού θα μειωνόταν με τελικό αποτέλεσμα η αξία της επένδυσης να μειωθεί.

Στην συνέχεια θα αναλύσουμε την επίδραση της αβεβαιότητας στον βέλτιστο αριθμό επιχειρήσεων που λειτουργούν στην αγορά μακροχρόνια στο υπόδειγμα όπου η ανάλυση της αβεβαιότητας γίνεται χρησιμοποιώντας την μεθοδολογία των δικαιωμάτων προαίρεσης. Με την αύξηση της αβεβαιότητας προκύπτει ότι η αξία των επενδύσεων θα τείνει στο μηδέν αφού σε αυτή την περίπτωση η επιχείρηση δεν θα κατασκευάζει σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής (αρνητική αξία επένδυσης). Από την (11-25) προκύπτει ότι όσο  $V_{i,n,\tau} \rightarrow 0$ , τόσο η απόφαση θα τείνει προς το αιτιοκρατικό υπόδειγμα., αφού η στοχαστική θεώρηση δεν έχει «πληροφορία» να προσθέσει (αρνητική ή μηδενική αξία επένδυσης).

Επίσης πρέπει να διευκρινιστεί ότι όσο η κάθε επιχείρηση είναι μικρή σε σχέση με την αγορά τόσο το  $\frac{\partial FLOL_{i,t} \left( \sum_n \sum_{\tau \leq t} \left( exogcap_{i,n,\tau,t} + I_{i,n,\tau} sv_{i,n,\tau,t} - \frac{Qr_{i,t}}{\nu} \right) \right)}{\partial I_{i,n,\tau}} \rightarrow 0$  με αποτέλεσμα να μειώνεται η σημαντικότητά του στο πρόβλημα της επιχείρησης. Οι επιχειρήσεις μη

«φοβούμενες» το πρόστιμο μη ικανοποίησης της ζήτησης που έχει θέσει ως στόχο ο ρυθμιστής της αγοράς δεν επενδύουν σε μονάδες οι οποίες δεν μπορούν να ανακτήσουν το κεφαλαιουχικό τους κόστος από την αγορά.

### 11.5 Μοντελοποίηση ατελούς ανταγωνισμού – ισορροπία κατά Nash-Cournot

Οι επιχειρήσεις στην αγορά όπως αναλύθηκε στις προηγούμενες υποενότητες λειτουργούν υπό καθεστώς τέλει ανταγωνισμού. Στην υποενότητα αυτή αναλύεται η αγορά στην οποία οι επιχειρήσεις λειτουργούν υπό καθεστώς ατελούς ανταγωνισμού – ισορροπία κατά Nash-Cournot. Στην περίπτωση αυτή οι επιχειρήσεις ηλεκτροπαραγωγής συμπεριφέρονται «ολιγοπωλιακά» στην αγορά ηλεκτρισμού. Όπως έχει αναλυθεί στην ενότητα 4.4 στην περίπτωση του ατελή ανταγωνισμού κατά Nash-Cournot, οι επιχειρήσεις θεωρούν δεδομένη την παραγωγή των άλλων επιχειρήσεων και προσπαθούν να μεγιστοποιήσουν το κέρδος τους μεταβάλλοντας την δική τους παραγωγή.

Έχει υποτεθεί ότι όλοι οι περιορισμοί αφορούν το μέρος του ολικού πωλούμενου ηλεκτρισμού στην αγορά που καλύπτει και ικανοποιεί η εκάστοτε επιχείρηση. Οι περιορισμοί που αφορούν τη λειτουργία των μονάδων ανάγονται σε κάθε επιχείρηση. Για τους περιορισμούς του συστήματος όπως για τους περιορισμούς εφεδρείας, γίνεται η υπόθεση πως ο διαχειριστής – ρυθμιστής της αγοράς επιβάλλει ανάλογο περιορισμό σε κάθε επιχείρηση για το μέρος της ζήτησης την οποία αυτή καλύπτει.

Οι επιχειρήσεις που λειτουργούν στην αγορά υπό καθεστώς ατελούς ανταγωνισμού Cournot επιδιώκουν να αντισταθμίσουν την αβεβαιότητα όσον αφορά το μέγεθος του κόστους αυξάνοντας την τιμή προσφοράς της ενέργειας και κατ' επέκταση το όφελος – κέρδος τους. Ωστόσο, περιορίζονται από τον ρυθμιστή της αγοράς ο οποίος παρεμβαίνει όταν το κέρδος της επιχείρησης υπερβαίνει ένα ανώτατο όριο. Το όριο αυτό ορίζεται ως άνω περιθώριο κέρδους της επιχείρησης ως ποσοστό του συνολικού κόστους. Συνεπώς, οι επιχειρήσεις δεν δύναται να ασκήσουν όλη την ολιγοπωλιακή ισχύ τους διότι περιορίζονται από τον ρυθμιστή της αγοράς. Ο ρυθμιστής της αγοράς θα μπορούσε να έχει αναπαρασταθεί ως ένας ξεχωριστός παίκτης στην αγορά, όμως για λόγους απλοποίησης και χωρίς βλάβη της γενικότητας έχουμε προσομοιώσει τον ρυθμιστή με περιορισμό που έχει ενσωματωθεί στο πρόβλημα της επιχείρησης.

Για την επίλυση του ανωτέρω μοντέλου γίνεται η υπόθεση ότι οι τιμές των καυσίμων, η τιμή των δικαιωμάτων εκπομπών  $CO_2$  και η Οριακή Τιμή Συστήματος είναι πιθανοτικά μεγέθη. Οι τιμές των καυσίμων και η τιμή αγοράς των δικαιωμάτων εκπομπών ακολουθούν τη στοχαστική ανέλιξη Γεωμετρική Κίνηση Brown όπως έχουμε ήδη

αναφέρει στην περίπτωση του τέλει ανταγωνισμού. Εφαρμόζοντας την διαδικασία όπως έχει αναλυθεί στο κεφάλαιο 3.4 παράγουμε αντιπροσωπευτικά δείγματα με αντίστοιχες πιθανότητες για τις στοχαστικές ανελίξεις που έχουμε θεωρήσει για τις τιμές αγοράς των καυσίμων και των τιμών αγοράς δικαιωμάτων εκπομπών  $CO_2$

$$f p_{q,i,f,\tau,t}, ETS p_{q,\tau,t}$$

όπου  $q$  είναι το σύνολο των θεωρούμενων αντιπροσωπευτικών σεναρίων και  $\tau$  είναι ο χρόνος θεώρησης της επένδυσης.

Η διαμόρφωση της οριακής τιμής συστήματος ( $SMP p_{q,i,s,\tau,t}$ ) διαφοροποιείται στην υποενότητα αυτή. Λόγω του ατελούς ανταγωνισμού στην αγορά, οι επιχειρήσεις που λειτουργούν σε αυτήν μπορούν να την επηρεάσουν και συγκεκριμένα να αυξήσουν. Για τον λόγο αυτό, για τη δειγματοληψία λαμβάνουμε υπόψιν τη διαφορά της τιμής της οριακής τιμής συστήματος όπως προέκυψε στο αιτιοκρατικό υπόδειγμα προσομοίωσης αγοράς υπό καθεστώς τέλει ανταγωνισμού και της τιμής της οριακής τιμής συστήματος όπως προέκυψε στο αιτιοκρατικό υπόδειγμα προσομοίωσης αγοράς υπό καθεστώς ατελούς ανταγωνισμού. Επιπλέον, η μεταβλητότητα της τιμής της οριακής τιμής συστήματος μειώνεται στο υπόδειγμα αυτό δεδομένου ότι όπως έχει αναλυθεί προηγουμένως μια επιχείρηση που λειτουργεί σε αγορά υπό καθεστώς ατελούς ανταγωνισμού έχει τη δυνατότητα να επηρεάσει τη τιμή. Πρέπει να αναφερθεί ότι η μεταβολή της στοχαστικής διαδικασίας της οριακής τιμής του συστήματος μεταξύ του τέλει ανταγωνισμού και του ατελούς ανταγωνισμού (ισορροπία κατά Nash-Cournot) είναι εξωγενής και βασίζεται στα αποτελέσματα της μεταβολής της οριακής τιμής του συστήματος μεταξύ τέλει και ατελούς ανταγωνισμού του αιτιοκρατικού υποδείγματος.

Για τον λόγο αυτό, τα έσοδα που αναμένονται από την πώληση της παραγόμενης ενέργειας είναι μεγαλύτερα. Ως συνέπεια η αξία κάθε επένδυσης, η οποία υπολογίζεται ενδογενώς στο μοντέλο με τη μέθοδο που αναλύθηκε στην υποενότητα 11.4, σε αγορά υπό καθεστώς ατελούς ανταγωνισμού Cournot είναι μεγαλύτερη της αξίας της σε αγορά υπό καθεστώς τέλει ανταγωνισμού.

Στην συνέχεια θα αναλύσουμε την μέθοδο που έχουμε μοντελοποιήσει την αγορά ατελούς ανταγωνισμού στην περίπτωση της ανάλυσης της αβεβαιότητας σύμφωνα με την μέθοδο των δικαιωμάτων προαίρεσης. Όλες οι επιχειρήσεις που συμμετέχουν στην αγορά θεωρούνται συμμετρικές. Το υπόδειγμα είναι όπως στην περίπτωση του αιτιοκρατικού υποδείγματος ατελούς ανταγωνισμού με την διαφορά ότι στην κάθε επένδυση προστίθεται ένας επιπλέον όρος που σχετίζεται με την αξία της επένδυσης όπως βρίσκεται με την μεθοδολογία των δικαιωμάτων προαίρεσης. Η επιχείρηση αντιμετωπίζει μια γραμμική αντίστροφη συνάρτηση ζήτησης και θεωρεί δεδομένη την

ποσότητα παραγωγής των λοιπών επιχειρήσεων που λειτουργούν στην αγορά. Επίσης, τα δείγματα που αφορούν την μελλοντική εξέλιξη της οριακής τιμής συστήματος όπως έχει ήδη αναφερθεί έχουν προκύψει εξωγενώς με κατάλληλη τροποποίηση σε σχέση με τα δείγματα του τέλει ανταγωνισμού. Επιπλέον, τα δείγματα αυτά αλλάζουν μερικώς ενδογενώς κατά την επίλυση του υποδείγματος αφού έχουμε προσθέσει γραμμική εξάρτηση μεταξύ της τιμής του ηλεκτρισμού που προκύπτει από την επίλυση του προβλήματος της εκάστοτε συμμετρικής επιχείρησης και των εξωγενώς θεωρούμενων δειγμάτων. Δηλαδή, όσο η τιμή του ηλεκτρισμού της αγοράς όπως προκύπτει από την επίλυση του υποδείγματος ατελούς ανταγωνισμού αυξάνει τόσο τα εξωγενώς θεωρούμενα δείγματα μεταβάλλονται με αυξητική τάση, ενώ στην περίπτωση που η τιμή του ατελούς ανταγωνισμού τείνει να μειώνεται, η μεταβολή των δειγμάτων είναι αρνητική.

Για την επίλυση του παραπάνω υποδείγματος έγιναν επαναλήψεις μέχρι η παραγωγή της συμμετρικής επιχείρησης να συγκλίνει.

Στην συνέχεια θα αναπτύξουμε το υπόδειγμα λειτουργίας αγοράς υπό καθεστώς ατελούς ανταγωνισμού με αξιολόγηση της αβεβαιότητας χρησιμοποιώντας την μεθοδολογία των δικαιωμάτων προαίρεσης (real options). Όπως έχει ήδη αναφερθεί στην περίπτωση του μοντέλου ατελούς ανταγωνισμού τα δείγματα σχετικά με την μελλοντική εξέλιξη της οριακής τιμής συστήματος αλλάζουν ενδογενώς λαμβάνοντας υπόψιν την «ολιγοπωλιακή» της εκάστοτε συμμετρικής επιχείρησης. Η κάθε επιχείρηση στην περίπτωση του ατελούς ανταγωνισμού ξέρει την αντίστροφη συνάρτηση ζήτησης καθώς και ότι θεωρεί δεδομένη την παραγωγή των υπόλοιπων επιχειρήσεων. Άρα η τιμή που θα εισπράξει η επιχείρηση από την πώληση  $q_{i,t}$  ποσότητας ηλεκτρισμού στην αγορά θα εισπράξει

$$P_{i,t} = a_t - \beta_t (q_{i,t} + Q_{-i,t}) \quad (11-34)$$

όπου  $Q_{-i,t}$  είναι η ποσότητα παραγωγής των υπόλοιπων επιχειρήσεων.

Τα δείγματα σχετικά με την οριακή τιμή συστήματος που έχουν προκύψει εξωγενώς με τις αλλαγές που έχουμε ήδη αναφέρει σε σχέση με τα δείγματα που έχουν προκύψει για το υπόδειγμα του τέλει ανταγωνισμού συμβολίζονται  $SMP_{i,\tau,t,c}$ . Επίσης θεωρούμε την μέση οριακή τιμή  $SMPC_{i,\tau,t}$  όπως προκύπτει για κάθε έτος κατασκευής  $\tau$  και έτος λειτουργίας  $t$ . Για να λάβουμε υπόψιν την ολιγοπωλιακή ισχύ της κάθε επιχείρησης στην αγορά αλλάζουμε τα δείγματα ενδογενώς με τον παρακάτω τύπο στον οποίο λαμβάνουμε υπόψιν την αντίστροφη συνάρτηση ζήτησης

$$SMP_{i,\tau,t} = \tilde{SMP}_{i,\tau,t,c} \left( \frac{(a_t - \beta_t(q_{i,t} + Q_{-i,t}))}{SMPC_{i,\tau,t}} \right)^\epsilon \quad (11-35)$$

Από την (11-35) και την (11-24) προκύπτει

$$V_{i,n,\tau} = \mathcal{E} \left[ \sum_{t \geq \tau} \frac{\tilde{SMP}_{i,\tau,t,c} \left( \frac{(a_t - \beta_t(q_{i,t} + Q_{-i,t}))}{SMPC_{i,\tau,t}} \right)^\epsilon G_{i,n,\tau,t} - I_{i,n,\tau} s v_{i,n,\tau,t} c c_{i,n,\tau} - \tilde{v} c_{i,n,\tau,t} G_{i,n,\tau,t}}{(1+r)^{t-\tau}} \right] \quad (11-36)$$

Από την παραπάνω σχέση προκύπτει ότι η αξία της επένδυσης που προκύπτει είναι συνάρτηση της ποσότητας ηλεκτρισμού που πουλά η επιχείρηση στην αγορά  $q_{i,t}$ , του μεγέθους της επένδυσης  $I_{i,n,\tau}$  και του παραγόμενου από τον συγκεκριμένο σταθμό ηλεκτρισμό.

Σε αυτή την υπο-ενότητα στην οποία μελετάμε την αγορά υπό καθεστώς ατελούς ανταγωνισμού, η μεταβολή της αξίας της επένδυσης ως προς την μεταβολή της παραγωγή του σταθμού  $\left( \frac{\partial V_{i,n,\tau}}{\partial G_{i,n,\tau,t}} \right) > 0$  είναι εξ' υποθέσεως θετική. Υποθέτουμε ότι η στοχαστική ανέλιξη που έχει θεωρηθεί για την οριακή τιμή συστήματος είναι ικανή ώστε να καλυφθεί το μεταβλητό κόστος  $\tilde{v} c_{i,n,\tau,t}$ . Επίσης, η μεταβολή της αξίας της επένδυσης ως προς την μεταβολή του μεγέθους της επένδυσης είναι αρνητική  $\left( \frac{\partial V_{i,n,\tau}}{\partial I_{i,n,\tau}} \right) < 0$ . Ακόμα, προκύπτει ότι η μεταβολή της αξίας της επένδυσης ως προς την μεταβολή της συνολικής ποσότητας  $q_{i,t}$  που πουλά η επιχείρηση στην αγορά είναι αρνητική  $\left( \frac{\partial V_{i,n,\tau}}{\partial q_{i,t}} \right) < 0$  επειδή με την αύξηση της ποσότητας πώλησης στην αγορά μειώνεται η τιμή πώλησης και μειώνεται η αξία της επιπλέον οριακής επένδυσης.

Το απλοποιημένο υπόδειγμα έχει ως εξής (i είναι το σύνολο των χωρών που επιλύουμε)



$$\begin{aligned}
 & \underset{q_{i,t}, I_{i,n,\tau}, G_{i,n,\tau,t}}{MAX} \sum_t (a_t - \beta_t (q_{i,t} + Q_{-i,t})) q_{i,t} \\
 & - \sum_t \left[ \sum_n \sum_{\tau \leq t} I_{i,n,\tau} s v_{i,n,\tau,t} c c_{i,n,\tau} + \sum_n \sum_{\tau \leq t} v c_{i,n,\tau,t} G_{i,n,\tau,t} \right] \\
 & + \sum_n \sum_{\tau \leq t} I_{i,n,\tau} V_{i,n,\tau} \\
 & - FLO L_{i,t} \left( \sum_n \sum_{\tau \leq t} \left( exogcap_{i,n,\tau,t} + I_{i,n,\tau} s v_{i,n,\tau,t} - \frac{Q r_{i,t}}{v} \right) \right)
 \end{aligned} \tag{11-37}$$

$$s. t. \quad \sum_n \sum_{\tau \leq t} G_{i,n,\tau,t} \geq q_{i,t} \quad \perp \lambda_{i,t} \tag{11-38}$$

$$I_{i,n,\tau} s v_{i,n,\tau,t} \geq G_{i,n,\tau,t} \quad \perp \xi_{i,n,\tau,t} \tag{11-39}$$

Η (11-29) συνεχίζει να ισχύει με την διαφορά σε σχέση με την προηγούμενη περίπτωση του τέλει ανταγωνισμού ότι ο όρος  $FLO L_{i,t} \left( \sum_n \sum_{\tau \leq t} \left( exogcap_{i,n,\tau,t} + I_{i,n,\tau} s v_{i,n,\tau,t} - \frac{Q r_{i,t}}{v} \right) \right)$  στην περίπτωση του ατελούς ανταγωνισμού είναι σημαντικός. Πλέον ο αριθμός των επιχειρήσεων είναι δεδομένος και μικρός το οποίο σημαίνει ότι η κάθε επιχείρηση καλύπτει σημαντικό μέρος της ολικής τελικής ζήτησης. Έτσι στην περίπτωση που ο παράγοντας  $\sum_n \sum_{\tau \leq t} \left( exogcap_{i,n,\tau,t} + I_{i,n,\tau} s v_{i,n,\tau,t} - \frac{Q r_{i,t}}{v} \right)$  είναι μικρό νούμερο ή αρνητικός, τότε η επιχείρηση θα πληρώσει πρόστιμο στον ρυθμιστή ανάλογο της ενέργειας και της ισχύος που δεν κάλυψε.

Χρησιμοποιώντας την Λαγκρανζιανή για την εύρεση των συνθηκών βέλτιστου πρώτης τάξης προκύπτει

$$\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial G_{i,n,\tau,t}} = -I_{i,n,\tau} s v_{i,n,\tau,t} \frac{\partial V_{i,n,\tau}}{\partial G_{i,n,\tau,t}} + v c_{i,n,\tau,t} - \lambda_{i,t} + \xi_{i,n,\tau,t} \geq 0 \quad \perp G_{i,n,\tau,t} \geq 0 \tag{11-40}$$

$$\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial q_{i,t}} = - \sum_n \sum_{\tau \leq t} I_{i,n,\tau} s v_{i,n,\tau,t} \frac{\partial V_{i,n,\tau}}{\partial q_{i,t}} - (a_t - \beta_t (q_{i,t} + Q_{-i,t})) - \beta_t q_{i,t} + \lambda_{i,t} \geq 0 \quad \perp q_{i,t} \geq 0 \tag{11-41}$$

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial I_{i,n,\tau}} = & \sum_{t \geq \tau} sv_{i,n,\tau,t} cc_{i,n,\tau} - \overbrace{\sum_{t \geq \tau} sv_{i,n,\tau,t} V_{i,n,\tau}}^{\text{αξία οριακής επένδυσης}} - \overbrace{\sum_{t \geq \tau} I_{i,n,\tau} sv_{i,n,\tau,t} \frac{\partial V_{i,n,\tau}}{\partial I_{i,n,\tau}}}_{\text{μεταβολή αξίας ενδο-οριακών επενδύσεων}} \\
 & + \frac{\partial FLOL_{i,t} \left( \sum_n \sum_{\tau \leq t} \left( exogcap_{i,n,\tau,t} + I_{i,n,\tau} sv_{i,n,\tau,t} - \frac{Q_{i,t}}{v} \right) \right)}{\partial I_{i,n,\tau}} \\
 & - \sum_{t \geq \tau} \xi_{i,n,\tau,t} \geq 0 \quad \perp \quad I_{i,n,\tau} \geq 0
 \end{aligned} \tag{11-42}$$

Από τις παραπάνω σχέσεις προκύπτει ότι με δεδομένο ότι  $q_{i,t} > 0 \Rightarrow \lambda_{i,t} = \left( a_t - \beta_t(q_{i,t} + Q_{-i,t}) \right) + \beta_t q_{i,t} + \sum_n \sum_{\tau \leq t} I_{i,n,\tau} sv_{i,n,\tau,t} \frac{\partial V_{i,n,\tau}}{\partial q_{i,t}}$ . Στην περίπτωση που  $G_{i,n,\tau,t} > 0 \Rightarrow +vc_{i,n,\tau,t} + \xi_{i,n,\tau,t} = \lambda_{i,t} + I_{i,n,\tau} sv_{i,n,\tau,t} \frac{\partial V_{i,n,\tau}}{\partial G_{i,n,\tau,t}} = \left( a_t - \beta_t(q_{i,t} + Q_{-i,t}) \right) + \beta_t q_{i,t} + \sum_n \sum_{\tau \leq t} I_{i,n,\tau} sv_{i,n,\tau,t} \frac{\partial V_{i,n,\tau}}{\partial q_{i,t}} + I_{i,n,\tau} sv_{i,n,\tau,t} \frac{\partial V_{i,n,\tau}}{\partial G_{i,n,\tau,t}}$ , από την οποία συνάγεται ότι

$$\begin{aligned}
 \xi_{i,n,\tau,t} = & \left( a_t - \beta_t(q_{i,t} + Q_{-i,t}) \right) + \beta_t q_{i,t} + \sum_n \sum_{\tau \leq t} I_{i,n,\tau} sv_{i,n,\tau,t} \frac{\partial V_{i,n,\tau}}{\partial q_{i,t}} \\
 & + I_{i,n,\tau} sv_{i,n,\tau,t} \frac{\partial V_{i,n,\tau}}{\partial G_{i,n,\tau,t}} - vc_{i,n,\tau,t}
 \end{aligned} \tag{11-43}$$

Το  $\xi_{i,n,\tau,t}$  αναπαριστά το χρηματικό όφελος σταθμού  $n$  που κατασκευάστηκε το έτος  $\tau$  και λειτουργεί το έτος  $t$  στην χώρα  $i$ .

Από την (11-42) προκύπτει ότι όσο το πρόστιμο που μπορεί ο ρυθμιστής να επιβάλλει στην επιχείρηση από την μη πραγματοποίηση επενδύσεων αυξάνεται (δηλαδή η παράγωγος  $\frac{\partial FLOL_{i,t} \left( \sum_n \sum_{\tau \leq t} \left( exogcap_{i,n,\tau,t} + I_{i,n,\tau} sv_{i,n,\tau,t} - \frac{Q_{i,t}}{v} \right) \right)}{\partial I_{i,n,\tau}}$  γίνεται πιο αρνητική) τόσο μικρότερο θα πρέπει να είναι το  $\sum_{t \geq \tau} \xi_{i,n,\tau,t}$  ώστε να πραγματοποιηθεί επένδυση.

Στην συνέχεια θα αναλύσουμε την επίδραση της αβεβαιότητας στον βέλτιστο αριθμό επιχειρήσεων που λειτουργούν στην αγορά μακροχρόνια στο υπόδειγμα όπου η ανάλυση της αβεβαιότητας γίνεται χρησιμοποιώντας την μεθοδολογία των δικαιωμάτων προαίρεσης. Με την αύξηση της αβεβαιότητας προκύπτει ότι η αξία των επενδύσεων θα τείνει στο μηδέν αφού σε αυτή την περίπτωση η επιχείρηση δεν θα κατασκευάζει σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής (αρνητική αξία επένδυσης). Από την (11-42) προκύπτει ότι όσο  $V_{i,n,\tau} \rightarrow 0$ , τόσο η απόφαση θα τείνει προς το αιτιοκρατικό υπόδειγμα., αφού η στοχαστική θεώρηση δεν έχει «πληροφορία» να προσθέσει (αρνητική ή μηδενική αξία επένδυσης (σε πολύ αβέβαιο περιβάλλον δεν έχει επιπλέον αξία η επένδυση)).

Επίσης πρέπει να διευκρινιστεί ότι όσο η κάθε επιχείρηση έχει σημαντικό μερίδιο της αγοράς τόσο το  $\frac{\partial FLOL_{i,t} \left( \sum_n \sum_{\tau \leq t} \left( exogcap_{i,n,\tau,t} + I_{i,n,\tau} s v_{i,n,\tau,t} - \frac{Qr_{i,t}}{v} \right) \right)}{\partial I_{i,n,\tau}} < 0$  θα είναι αρκετά αρνητικό με αποτέλεσμα να παίζει σημαντικό ρόλο στο πρόβλημα της επιχείρησης. Κατ' ουσία είναι ο παράγοντας που αναγκάζει την επιχείρηση «φοβούμενη» το πρόστιμο να επενδύσει παρότι η ίδια από μόνη της δεν θα ήθελε.

Από την αγορά που λειτουργεί σε καθεστώς ατελούς ανταγωνισμού προκύπτει το ακόλουθο συμπέρασμα. Όσο ο όρος  $\frac{\partial FLOL_{i,t} \left( \sum_n \sum_{\tau \leq t} \left( exogcap_{i,n,\tau,t} + I_{i,n,\tau} s v_{i,n,\tau,t} - \frac{Qr_{i,t}}{v} \right) \right)}{\partial I_{i,n,\tau}}$  θα μειώνεται, όσο η ολιγοπωλιακή ισχύς της επιχείρησης θα αυξάνει τόσο η αξία της κάθε μονάδας θα αυξάνει (περισσότερα έσοδα) και τόσο η επιχείρηση μπορεί να αναλάβει επενδύσεις μεγαλύτερου μοναδιαίου κεφαλαιουχικού κόστους ώστε να μειώσει το μεταβλητό κόστος κατά την λειτουργία της. Έτσι προκύπτει ότι η συνάρτηση «προστίμου» σχετικά με την μη ικανοποίηση της ζήτησης και η αξία της κάθε επένδυσης ρυθμίζουν καθοριστικά την συμπεριφορά της επιχείρησης σε περιβάλλον αγοράς ατελούς ανταγωνισμού.

Τέλος πρέπει να αναφέρουμε συμπέρασμα το οποίο έχει προκύψει σε όλα τα παραπάνω υποδείγματα μελέτης της αβεβαιότητας. Ο βέλτιστος αριθμός επιχειρήσεων σε μακροχρόνια ισορροπία στην αγορά βαίνει μειούμενος με την αύξηση της αβεβαιότητας. Με την αύξηση της διακύμανσης-τυπικής απόκλισης του κέρδους της επιχείρησης όπως έχουμε αναφέρει η αξία των επενδύσεων μειώνεται με αποτέλεσμα να είναι όλο και πιο δύσκολη η πραγματοποίηση επενδύσεων. Αυτή η αδράνεια αυξάνει την σημαντικότητα του όρου  $FLOL_{i,t} \left( \sum_n \sum_{\tau \leq t} \left( exogcap_{i,n,\tau,t} + I_{i,n,\tau} s v_{i,n,\tau,t} - \frac{Qr_{i,t}}{v} \right) \right)$  και συνεπακόλουθα σε συγκέντρωση της αγοράς σε δεδομένο και μικρό αριθμό επιχειρήσεων.



## Κεφάλαιο 12

### 12 Ανάπτυξη υποδείγματος πολλών σταδίων αβεβαιότητας για την αναπαράσταση του ηλεκτρικού τομέα

---

Σε υπόδειγμα μεγάλης κλίμακας μακροχρόνιου ενεργειακού σχεδιασμού χρειάζεται να ληφθούν αποφάσεις που αφορούν σε μεταβλητές επενδύσεων, οι οποίες πιο συγκεκριμένα αποτελούν αποφάσεις για επενδύσεις κατασκευής νέων μονάδων ή ανακαίνισης ήδη εγκατεστημένων μονάδων καθώς και αποφάσεις για τη λειτουργία των διαθέσιμων μονάδων για όλη την περίοδο μελέτης του συστήματος. Η λήψη αποφάσεων επένδυσης σε ηλεκτροπαραγωγικές μονάδες καθίσταται δύσκολη για τρεις λόγους. Πιο συγκεκριμένα, η επιχείρηση ταυτόχρονα έχει αβεβαιότητα σε ετήσια βάση για την ανάκτηση του κόστους κεφαλαίου μέσω των αγορών, έχει τεχνική, ρυθμιστική και οικονομική αβεβαιότητα που πολλαπλασιάζεται με την πάροδο του μακρού χρόνου μέχρι την ανάκτηση του κόστους κεφαλαίου, και συνεχώς ελλοχεύει ο κίνδυνος απώλειας του μη ανακτηθέντος κεφαλαίου από τυχόν διακοπή λειτουργίας της μονάδας επειδή η επενδυτική δαπάνη είναι μη αναστρέψιμη.

Επιπρόσθετα, παράγοντες που σχετίζονται με τις αγορές ηλεκτρικής ενέργειας, όπως η ανάπτυξη του ανταγωνισμού στις αγορές ηλεκτρικής ενέργειας, η δημιουργία ενιαίας αγοράς στην ΕΕ (μεγάλου μεγέθους κατά συνέπεια με μικρές σε μέγεθος επιχειρήσεις εν σχέσει με το μέγεθος της αγοράς) καθώς και οι αποκρατικοποιήσεις (ή η παύση χορήγησης εγγυήσεων του δημοσίου και μακροχρόνιων συμβολαίων εγγυημένων αμοιβών) ενισχύουν την αβεβαιότητα που υπάρχει και συνεπώς ενισχύουν την τάση για επενδυτικές συμπεριφορές που αποφεύγουν τον κίνδυνο.

Ταυτόχρονα με τους παράγοντες αυτούς, πολλαπλασιάζονται και οι αβεβαιότητες που σχετίζονται με το περιβάλλον (κλιματική αλλαγή, η αντιμετώπιση της οποίας απαιτεί παύση ή μεγάλη μείωση της χρήσης ορυκτών καυσίμων), με τη φορολογία (π.χ. τιμές διοξειδίου του άνθρακα στο πλαίσιο του μηχανισμού αγοράς δικαιωμάτων εκπομπής –

ETS), με τη ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας (ασταθής οικονομική ανάπτυξη ή αβέβαιη ανάπτυξη επί μακρόν, αλλά και μείωση της ζήτησης από την απευθείας χρήση ανανεώσιμων πηγών σε κατανομημένη βάση) και τις διεθνείς τιμές των καυσίμων (μεγάλη διακύμανση των τιμών και προς τα επάνω αλλά και προς τα κάτω).

Οι πολιτικές αυτές αναμένεται να αποφασιστούν τα επόμενα 10 - 20 χρόνια, δηλαδή μέχρι το 2030, έτσι όλες οι επενδύσεις που θα αποφασιστούν σε αυτό το χρονικό διάστημα (μεσοπρόθεσμα) αντιμετωπίζουν τον κίνδυνο να βρεθούν να λειτουργήσουν σε δυσμενές περιβάλλον. Αντίθετα, μακροπρόθεσμα (μετά το 2030), θεωρείται ότι θα έχουν πλέον ξεκαθαριστεί οι πολιτικές για το περιβάλλον που θα ακολουθηθούν (πολιτικές μείωσης εκπομπών, ένταξης ΑΠΕ κτλ.) καθώς και η έντασή τους και οι επενδύσεις που θα αποφασιστούν τότε θα έχουν μικρότερη αβεβαιότητα σχετικά με την μελλοντική εξέλιξη κρίσιμων παραμέτρων με αποτέλεσμα να μειώνεται η πιθανότητα να λειτουργήσουν σε δυσμενές περιβάλλον.

Στην οικονομική θεωρία υφίσταται θέληση για πληρωμή προκειμένου να αντληθεί πληροφορία σε καταστάσεις κατά τις οποίες η έλλειψη πληροφορίας επιφέρει ζημία στον αποφασίζοντα. Η άγνοια μελλοντικών ενδεχομένων είναι μία μορφή έλλειψης πληροφορίας. Στο πλαίσιο στρατηγικής απόφασης σε πολλά χρονικά στάδια, η θέληση για πληρωμή για απόκτηση πληροφορίας εκφράζεται στο πλαίσιο επενδυτικών αποφάσεων με τη λήψη (ή ακόμα και με την άρνηση λήψης) ελαχίστων δυνατών επενδυτικών αποφάσεων στο πρώτο στάδιο, με τρόπο ώστε να μετανιώσει όσο το δυνατόν λιγότερο (minimum regret) ο αποφασίζοντας προκειμένου να περιμένει έως ότου μερικώς αρθεί η άγνοια (γίνουν γνωστές οι εκβάσεις κάποιων ενδεχομένων) ώστε στο δεύτερο στάδιο να λάβει πιο στοχευμένες επενδυτικές αποφάσεις. Η πληρωμή για την απόκτηση της πληροφορίας στο τέλος του πρώτου σταδίου έγκειται στο πιθανοτικά διαφυγόν όφελος κατά το στάδιο αυτό που θα πρόκυπτε αν αποφάσιζε με βάση το σύνολο των κατανομών πιθανοτήτων. Αν το έκανε όμως αυτό οι επενδύσεις κατά το πρώτο στάδιο θα περιόριζαν τους βαθμούς ελευθερίας απόφασης κατά το δεύτερο στάδιο και θα έχανε την ευκαιρία να λάβει καλύτερες αποφάσεις επένδυσης στο δεύτερο στάδιο όταν μέρος της άγνοιας (ή αβεβαιότητας) θα έχει αρθεί.

Συνεπώς, η λήψη επενδυτικών αποφάσεων μεσοπρόθεσμα χαρακτηρίζεται από έντονη αβεβαιότητα. Στην περίοδο αυτή η επιχείρηση επιλέγει να κάνει επενδύσεις χαμηλού κεφαλαιουχικού κόστους ή ανακαινίσεις ήδη εγκατεστημένων μονάδων μέχρι να γίνουν γνωστές πληροφορίες και να αρθεί μέρος της αβεβαιότητας. Μακροπρόθεσμα, ωστόσο, μέρος της αβεβαιότητας αυτής θεωρείται ότι θα έχει αρθεί, οπότε η άγνοια ως προς την περαιτέρω εξέλιξη των τιμών των πιθανοτικών μεγεθών είναι μικρότερη. Στην περίοδο αυτή η επιχείρηση επιλέγει επενδύσεις μεγαλύτερης έντασης κεφαλαίου δεδομένου ότι είναι περισσότερο βέβαιη για την ανάκτηση του κόστους κεφαλαίου της.

Οι αποφάσεις του προβλήματος συνεπώς χωρίζονται σε αποφάσεις που λαμβάνονται σε έντονα αβέβαιο περιβάλλον κατά το πρώτο στάδιο και σε αποφάσεις που λαμβάνονται αφού έχει ξεκαθαριστεί μέρος της αβεβαιότητας.

Οι αποφάσεις οι οποίες λαμβάνονται σε έντονα αβέβαιο περιβάλλον ονομάζονται αποφάσεις πρώτου σταδίου/περιόδου και η περίοδος στην οποία αυτές θα ληφθούν ονομάζεται πρώτο στάδιο. Επίσης, οι αποφάσεις οι οποίες λαμβάνονται αφού έχει ξεκαθαριστεί εν μέρει η αβεβαιότητα ονομάζονται αποφάσεις δεύτερου σταδίου και η αντίστοιχη περίοδος δεύτερο στάδιο. Χρειάζεται εδώ να σημειωθεί πως η ορολογία του πρώτου και δεύτερου σταδίου σχετίζεται μόνο με τη λήψη της απόφασης πριν ή μετά την εξάλειψη μέρους της αβεβαιότητας καθώς δύναται να περιλαμβάνουν αλληλουχία αποφάσεων και γεγονότων.

Στο παρόν κεφάλαιο αναπτύσσουμε μαθηματικό υπόδειγμα λήψης απόφασης σε αβέβαιο περιβάλλον το οποίο προσομοιώνει τις αρχές των προβλημάτων πολλών σταδίων. Στο υπόδειγμα αυτό ο αποφασίζων είναι ουδέτερος στον κίνδυνο και αξιολογεί τα ενδεχόμενα χρησιμοποιώντας το μέτρο της αναμενόμενης τιμής αυτών, δηλαδή  $u(c) = c$ .

Στη συνέχεια, παρουσιάζουμε τις αρχές των προβλημάτων πολλών σταδίων.

### 12.1 Προβλήματα $n$ – σταδίων

Ένα στοχαστικό γραμμικό πρόβλημα δύο σταδίων με recourse (two-stage stochastic linear program with fixed recourse) στη γενική του μορφή (Dantzig G., 1955; Beale, 1955) μπορεί να γραφεί ως

$$\begin{aligned} \min z &= c_T x + E_{\xi}[\min q(\omega)_T y(\omega)] \\ \text{v. π. } Ax &= b \\ T(\omega)x + Wy(\omega) &= h(\omega) \\ x \geq 0, \quad y(\omega) &\geq 0 \end{aligned} \tag{12-1}$$

Ωστόσο τα περισσότερα προβλήματα απαιτούν μια σειρά από αποφάσεις οι οποίες επηρεάζουν μια αλληλουχία αποτελεσμάτων στο μέλλον, αποτελούν δηλαδή προβλήματα πολλών σταδίων. Στη γενική περίπτωση τα προβλήματα πολλών σταδίων είναι μη γραμμικά, ωστόσο δεδομένου ότι το υπόδειγμα που αναπτύσσουμε εμείς αναπαριστά τον ηλεκτρικό τομέα μιας χώρας και αποτελεί γραμμικό πρόβλημα, θα αναλύσουμε στη συνέχεια τα στοχαστικά γραμμικά προβλήματα πολλών σταδίων με

fixed recourse. Ένα τέτοιο πρόβλημα στη γενική του μορφή μπορεί να γραφεί ως (Birge & Louveaux, 1997):

$$\begin{aligned}
 \min z = & c_1 x_1 + \varepsilon_{\xi_2} \left[ \min c_2(\omega) x_2(\omega_2) + \dots \right. \\
 & \left. + \varepsilon_{\xi_H} [\min c_H(\omega) x_H(\omega_H) + \dots] \right] \\
 \text{υ.π. } & W_1 x_1 = h_1, \\
 & T_1(\omega) x_1(\omega_1) + W_2 x_2(\omega_2) = h_2(\omega), \\
 & \vdots \\
 & T_{H-1}(\omega) x_{H-1}(\omega_{H-1}) + W_H x_H(\omega_H) = h_H(\omega), \\
 & x_1 \geq 0, \quad x_t(\omega_t) \geq 0, t = 2, 3, \dots, H
 \end{aligned} \tag{12-2}$$

Όπου  $c^1$  είναι δεδομένο διάνυσμα στο  $\mathfrak{R}^{n_1}$ ,  $h^1$  είναι δεδομένο διάνυσμα στο  $\mathfrak{R}^{m_1}$ ,  $\xi_t(\omega) = (c_t(\omega)_T, h_t(\omega)_T, T_{(1 \cdot)_{t-1}}(\omega), \dots, T_{(m_t \cdot)_{t-1}}(\omega))$  είναι τυχαίο  $N_t$ -διάστημα του  $(\Omega, \Sigma_t, P)$ , όπου  $\Sigma_t \subset \Sigma_{t-1}$ , για κάθε στάδιο  $t = 2, 3, \dots, H$  και  $T_{i,t}(\omega)$  είναι η  $i$ -οστή σειρά του πίνακα τεχνολογίας  $T_t(\omega)$  (technology matrix) του σταδίου  $t$ , οι αποφάσεις κάθε σταδίου αναπαρίστανται από ένα  $n_1 \times 1$  διάνυσμα  $x_t$  (διάνυσμα στο  $\mathfrak{R}^{n_1}$ ) και  $W_t$  είναι δεδομένος  $m_t \times n_t$  πίνακας, ο οποίος ονομάζεται recourse matrix. Οι αποφάσεις για τις μεταβλητές  $x$  στηρίζονται στις πληροφορίες που δίνονται έως τη χρονική στιγμή  $t$ , τις οποίες υποδηλώνουμε με το συμβολισμό  $\omega_t$ . Ως  $\varepsilon_\xi$  συμβολίζουμε την αναμενόμενη τιμή του μεγέθους  $\xi$ . Θεωρούμε ακόμη  $\mathcal{E}_t \subseteq \mathfrak{R}^N$  τα μικρότερα υποσύνολα του  $\mathfrak{R}^N$  τέτοια ώστε για κάθε  $t$  να ισχύει  $P\{\xi_t \in \mathcal{E}_t\} = 1$ .

Η αντικειμενική συνάρτηση της (12-2) περιλαμβάνει έναν αιτιοκρατικό όρο  $c_1 x_1$  και την αναμενόμενη τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης του δεύτερου σταδίου  $\varepsilon_{\xi_2} \left[ \min c_2(\omega) x_2(\omega_2) + \dots + \varepsilon_{\xi_H} [\min c_H(\omega) x_H(\omega_H) + \dots] \right]$ . Η αντικειμενική συνάρτηση του δεύτερου σταδίου αποτελεί πρόβλημα βελτιστοποίησης του όρου  $c_2(\omega) x_2(\omega_2)$  και την αναμενόμενη τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης του τρίτου σταδίου  $\varepsilon_{\xi_3} \left[ \min c_3(\omega) x_3(\omega_3) + \dots + \varepsilon_{\xi_H} [\min c_H(\omega) x_H(\omega_H) + \dots] \right]$ . Η διαδικασία αυτή ακολουθείται έως το τελευταίο στάδιο  $H$ .

Το πρόβλημα (12-2) μπορεί να εφαρμοστεί είτε με διακριτές είτε με συνεχείς μεταβλητές.

Η διατύπωση του προβλήματος με αυτόν τον τρόπο δηλώνει με ξεκάθαρο τρόπο την αλληλουχία των γεγονότων στο πρόβλημα. Στο πρώτο στάδιο λαμβάνονται οι αποφάσεις



$x_1$  λαμβάνοντας υπόψιν την αβεβαιότητα για τις μελλοντικές τιμές των στοχαστικών μεγεθών που περιλαμβάνει το διάνυσμα  $\xi_1$ . Στο δεύτερο στάδιο οι τιμές του διανύσματος  $\xi_1$  γίνονται γνωστές και μπορούν να ληφθούν διορθωτικές αποφάσεις  $x^2$ . Οι αποφάσεις του πρώτου σταδίου λαμβάνονται, ωστόσο, λαμβάνοντας υπόψιν τις μελλοντικές επιδράσεις τους.

Το πρόβλημα αυτό μπορεί να αναλυθεί στην ακόλουθη μορφή σύμφωνα με τις αρχές του δυναμικού προγραμματισμού. Στην περίπτωση που η μόνη αλληλεπίδραση μεταξύ των περιόδων είναι μέσω των καταστάσεων  $x_t(\omega_t)$  η αναδρομική σχέση μπορεί να οριστεί ως εξής:

Για τις τερματικές συνθήκες ισχύει:

$$Q_H(x_{H-1}, \xi_H(\omega)) = \min_y c_H(\omega)x_H(\omega) \quad (12-3)$$

$$v. \pi. W_H x_H(\omega) = h_H(\omega) - T_{H-1}(\omega)x_{H-1}$$

$$x_H(\omega) \geq 0$$

Θεωρώντας  $S_{t+1}(x_t) = E_{\xi_{t+1}}[Q_{t+1}(x_t, \xi_{t+1}(\omega))]$  για κάθε  $t$ , υπολογίζουμε την αναδρομική σχέση για  $t = 2, 3, \dots, H - 1$ :

$$Q_t(x_{t-1}, \xi_t(\omega)) = \min_y c_t(\omega)x_t(\omega) + S_{t-1}(\omega)x_{t-1} \quad (12-4)$$

$$v. \pi. W_t x_t(\omega) = h_t(\omega) - T_{t-1}(\omega)x_{t-1}$$

$$x_t \geq 0$$

Όπου ως  $x^t$  δηλώνουμε τις καταστάσεις του συστήματος. Αναζητούμε δηλαδή την τιμή:

$$\min z = c_1 x_1 + S(x_1)$$

$$v. \pi. W_1 x_1 = h_1, \quad (12-5)$$

$$x_1 \geq 0$$

Στην περίπτωση που τα πιθανοτικά μεγέθη δεν είναι ανεξάρτητα μεταξύ των ετών και συνεπώς υπάρχει αλληλεπίδραση μεταξύ των περιόδων, για την αναλυτική γραφή του υποδείγματος χρησιμοποιούνται οι αρχές της Στατιστικής κατά Bayes (Bayesian Statistics).

### 12.1.1 Παραγωγή πιθανοτικών κατανομών σύμφωνα με τις βασικές αρχές της στατιστικής κατά Bayes (Bayesian statistics)

Το πρώτο βήμα για την ανάλυση με χρήση των αρχών της στατιστικής κατά Bayes είναι η επιλογή ενός μοντέλου πιθανοτήτων για τα δεδομένα (DeGroot & Schervish, 2002; Hirshleifer & Riley, 2002). Στη συνέχεια, καθορίζεται μια αρχική κατανομή (prior distribution) για τις πιθανοτικές παραμέτρους. Η αρχική κατανομή αντιπροσωπεύει την παρούσα γνώση για τα πιθανοτικά μεγέθη και την αβεβαιότητα ως προς την εξέλιξη των τιμών τους. Η αρχική κατανομή που επιλέγεται είναι η κανονική κατανομή. Στο πρώτο στάδιο, η επιχείρηση λειτουργεί σε περιβάλλον με έντονη έλλειψη πληροφορίας και συνεπώς η εξέλιξη των πιθανοτικών μεγεθών παρουσιάζει έντονη αβεβαιότητα. Για την προσομοίωση της κατάστασης αυτής, οι κανονικές κατανομές που υποτίθενται (prior distribution) έχουν μεγάλη τιμή τυπικής απόκλισης.

Εάν οι  $n$  ζητούμενες τιμές των πιθανοτικών παραμέτρων είναι οι  $y_i, i = 1, 2, \dots, n$  οι οποίες υποτίθενται ότι ακολουθούν κανονική κατανομή με μέση τιμή  $\bar{x}$  και τυπική απόκλιση  $\sigma$ , και το διάνυσμα των αγνώστων παραμέτρων  $\theta$  ακολουθεί κανονική κατανομή με μέση τιμή  $M$  και τυπική απόκλιση  $\tau$ , τότε η αρχική κατανομή  $p(\theta)$  δίνεται από τον τύπο:

$$p(\theta) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\tau^2}} \exp\left\{-\frac{(\theta - M)^2}{2\tau^2}\right\} \quad (12-6)$$

Στο δεύτερο στάδιο, όταν τα δεδομένα γίνουν γνωστά, κατασκευάζεται η συνάρτηση πιθανοφάνειας (likelihood function). Η συνάρτηση πιθανοφάνειας  $L(\theta|y)$  είναι η πεπλεγμένη συνάρτηση πιθανότητας (joint probability function) η οποία αποτελεί συνάρτηση των παραμέτρων και θεωρεί τα δεδομένα που έγιναν γνωστά ως σταθερές ποσότητες.

$$L(y|\theta) = p(y_1, y_2, \dots, y_n|\theta) = \prod_{i=1}^n \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left\{-\frac{(x_i - \theta)^2}{2\sigma^2}\right\} \quad (12-7)$$

Η συνάρτηση πιθανοφάνειας (likelihood function) στη συνέχεια συνδυάζεται με την αρχική κατανομή (prior distribution) για να προσδιοριστεί η τελική κατανομή (posterior distribution)  $p(\theta|y)$ , η οποία ποσοτικοποιεί την αβεβαιότητα αναφορικά με τις τιμές των στοχαστικών παραμέτρων του μοντέλου αφού γίνουν γνωστά τα δεδομένα. Συνεπώς οι πιθανοτικές κατανομές των στοχαστικών παραμέτρων για τη μετέπειτα μελλοντική τους εξέλιξη (posterior distribution) αλλάζει από την αρχική εκτίμηση και λαμβάνει υπόψιν τις

νέες πληροφορίες (likelihood function). Τέλος, με βάση την τελική κατανομή υπολογίζονται τα ζητούμενα μεγέθη.

$$p(\boldsymbol{\theta}|\mathbf{y}) = \frac{p(\boldsymbol{\theta})p(\mathbf{y}|\boldsymbol{\theta})}{\int p(\boldsymbol{\theta})p(\mathbf{y}|\boldsymbol{\theta})d\boldsymbol{\theta}} = \frac{p(\boldsymbol{\theta})L(\mathbf{y}|\boldsymbol{\theta})}{p(\mathbf{y})} \propto p(\boldsymbol{\theta})L(\mathbf{y}|\boldsymbol{\theta}) \quad (12-8)$$

Όπου το σύμβολο  $\propto$  δηλώνει αναλογία.

Συνοψίζοντας, κύριος στόχος της στατιστικής κατά Bayes είναι ο προσδιορισμός της τελικής κατανομής των στοχαστικών παραμέτρων του προβλήματος. Η τελική κατανομή μπορεί να περιγραφεί ως ένας σταθμισμένος μέσος όρος μεταξύ της γνώσης για τις τιμές των στοχαστικών παραμέτρων σε περιβάλλον με αβεβαιότητα, η οποία αντιπροσωπεύεται από την αρχική κατανομή που θεωρείται, και της πληροφορίας που λαμβάνεται αφού αρθεί η αβεβαιότητα και γίνουν γνωστές οι τιμές των παραμέτρων αυτών, η οποία αντιπροσωπεύεται από την συνάρτηση πιθανοφάνειας.

Όταν η αρχική κατανομή και η συνάρτηση πιθανοφάνειας είναι κανονικές κατανομές, προκύπτει με αναλυτικούς υπολογισμούς ότι η μορφή της τελικής κατανομής (posterior distribution) είναι κανονική κατανομή (Lynch, 2007). Η τυπική απόκλιση της τελικής κατανομής είναι μικρότερη της τυπικής απόκλισης της αρχικής κατανομής καθώς και μικρότερη της τυπικής απόκλισης της συνάρτησης πιθανοφάνειας. Με άλλα λόγια, ο συνδυασμός των δύο αυτών συναρτήσεων μας δίνει πληροφορίες οι οποίες καθιστούν τις προσεγγίσεις των πιθανοτικών μεγεθών πιο ακριβείς συγκριτικά με τις αρχικές εκτιμήσεις για τις τιμές των πιθανοτικών μεγεθών.

## 12.2 Ανάπτυξη του πιθανοτικού υποδείγματος

Στην παρούσα ενότητα θα επεκταθεί το υπόδειγμα όπως αυτό παρουσιάστηκε στο κεφάλαιο 4.

Οι τιμές των καυσίμων ( $\widetilde{fp}_{i,f,t}$ ), οι τιμές των δικαιωμάτων εκπομπών  $CO_2$  ( $\widetilde{ETS}p_t$ ) και η παράμετρος  $\widetilde{a}_{i,s,t}$  της αντίστροφης συνάρτησης ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας, όπως εξηγήθηκε προηγουμένως, είναι πιθανοτικά μεγέθη.

Στο πρώτο στάδιο, η επιχείρηση λειτουργεί σε περιβάλλον με έντονη έλλειψη πληροφορίας και συνεπώς η εξέλιξη των πιθανοτικών μεγεθών παρουσιάζει έντονη αβεβαιότητα. Τα πιθανοτικά μεγέθη ακολουθούν κανονικές κατανομές και για την προσομοίωση της έντονης αβεβαιότητας ως προς την μελλοντική εξέλιξη των τιμών τους, οι κανονικές κατανομές που υποτίθενται (prior distribution) έχουν μεγάλη τιμή διακύμανσης – τυπικής απόκλισης. Στη συνέχεια, στο δεύτερο στάδιο, έχει γίνει η

υπόθεση ότι θα έχουμε περισσότερες πληροφορίες για τις πολιτικές που θα εφαρμοστούν καθώς και θα έχουν γίνει γνωστές οι επενδυτικές αποφάσεις ( $I_{i,n,t}$ )<sup>5</sup> που έχει λάβει η επιχείρηση τα προηγούμενα έτη του πρώτου σταδίου. Συνεπώς, οι εκτιμήσεις για τη μετέπειτα μελλοντική εξέλιξη των πιθανοτικών μεγεθών μεταβάλλεται δεδομένων των νέων πληροφοριών. Για την ενσωμάτωση της νέας πληροφορίας υπολογίζεται η συνάρτηση πιθανοφάνειας (likelihood function)  $L$ , η οποία είναι συνάρτηση των τιμών των στοχαστικών παραμέτρων του πρώτου σταδίου καθώς και των τιμών των επενδυτικών αποφάσεων που έλαβε η επιχείρηση στο πρώτο στάδιο:

$$L(\widetilde{fp}_{i,f,t\setminus 2}, \widetilde{ETS}p_{t\setminus 2}, \widetilde{\alpha}_{i,s,t\setminus 2} | fp_{i,f,t\setminus 1}, ETSp_{t\setminus 1}, \alpha_{i,s,t\setminus 1}, I_{i,n,t\setminus 1}) \quad (12-9)$$

Όπου  $fp_{i,f,t\setminus 1}, ETSp_{t\setminus 1}, \alpha_{i,s,t\setminus 1}$ : οι τιμές των καυσίμων, οι τιμές των δικαιωμάτων εκπομπών  $CO_2$  και η παράμετρος  $\alpha_{i,s,t}$  της αντίστροφης συνάρτησης ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας αντίστοιχα, οι οποίες αναφέρονται στο πρώτο στάδιο και είναι γνωστές κατά το δεύτερο στάδιο

$I_{i,n,t\setminus 1}$  επένδυση κατασκευής την χρονιά  $t$  του σταθμού  $n$  στην χώρα  $i$  [GW] όπως αποφάσισε η επιχείρηση για το πρώτο στάδιο

$\widetilde{fp}_{i,f,t\setminus 2}, \widetilde{ETS}p_{t\setminus 2}, \widetilde{\alpha}_{i,s,t\setminus 2}$  οι τιμές των καυσίμων, οι τιμές των δικαιωμάτων εκπομπών  $CO_2$  και η παράμετρος  $\alpha_{i,s,t}$  της αντίστροφης συνάρτησης ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας αντίστοιχα, οι οποίες αναφέρονται στο δεύτερο στάδιο και αποτελούν τις πιθανοτικές παραμέτρους του προβλήματος κατά το δεύτερο στάδιο

Συνεπώς οι πιθανοτικές κατανομές των στοχαστικών παραμέτρων για τη μετέπειτα μελλοντική τους εξέλιξη (posterior distribution) αλλάζει από την αρχική εκτίμηση και λαμβάνει υπόψιν τις νέες πληροφορίες (likelihood function). Για την προσομοίωση της κατάστασης αυτής, οι κανονικές κατανομές που υποτίθενται έχουν μικρότερη τιμή διακύμανσης – τυπικής απόκλισης από τις αντίστοιχες που υποτίθενται στο πρώτο στάδιο σύμφωνα με την θεωρία που αναφέραμε στο προηγούμενο υποκεφάλαιο 12.1.1.

Στο πρώτο στάδιο (έως το 2030) η έλλειψη πληροφορίας αναφορικά με την εξέλιξη των στοχαστικών παραμέτρων είναι έντονη, για τον λόγο αυτό η συμπεριφορά της επιχείρησης είναι διστακτική προς τον κίνδυνο και η λήψη επενδυτικών αποφάσεων γίνεται με τέτοιο τρόπο ώστε η επιχείρηση να «μετανιώσει όσο το δυνατόν λιγότερο» τις

<sup>5</sup> Όπως έχει αναλυθεί στην υποενότητα 4.2

αποφάσεις της (minimum regret). Η συμπεριφορά αυτή προσομοιάζει την τάση για αποφυγή κινδύνου – αποτυχίας της επιχείρησης. Συνεπώς, η τεχνική που μπορεί να την προσομοιάσει είναι η μέθοδος μεγιστοποίησης της πιθανότητας αποφυγής ζημίας όπως αναλύθηκε εκτενώς στο κεφάλαιο 9.

Στο δεύτερο στάδιο (τα έτη 2035 – 2050), στο οποίο θεωρούμε ότι μέρος της άγνοιας (ή αβεβαιότητας) έχει αρθεί, η συμπεριφορά της επιχείρησης μπορεί να προσομοιωθεί με την τεχνική αξιολόγησης των επενδύσεων με τη μέθοδο των δικαιωμάτων προαίρεσης. Με τον τρόπο αυτό η επιχείρηση έχει την δυνατότητα χρησιμοποιώντας κατάλληλη συνάρτηση χρησιμότητας να λάβει υπόψιν τόσο την μέση τιμή του προς βελτιστοποίηση μεγέθους αλλά και ροπές ανωτέρας τάξης δηλαδή να λάβει υπόψιν κατά την λήψη της απόφασης όλη την κατανομή και όχι μόνο το κομμάτι της κατανομής που θα προκαλέσει ζημιά στην επιχείρηση όπως έκανε στο πρώτο στάδιο. Η μεθοδολογία αυτή έχει αναλυθεί πλήρως στο κεφάλαιο 11.

Θα αναφέρουμε το υπόδειγμα που αναπτύξαμε στην περίπτωση που η αγορά λειτουργεί υπό καθεστώς τέλειου ανταγωνισμού. Συνοψίζοντας, στην αντικειμενική συνάρτηση του αιτιοκρατικού ισοδύναμου προβλήματος του πρώτου σταδίου επιδιώκεται η μεγιστοποίηση της πιθανότητας η τιμή των συνολικών εσόδων της επιχείρησης που λειτουργεί στην αγορά να υπερβαίνει το συνολικό κόστος (να έχει δηλαδή κέρδος) και μπορεί να γραφεί ως:

$$\begin{aligned}
 & \max \sum_{t=1}^T e^{-\delta_t \cdot t} \cdot \left\{ \sum_i \left[ \frac{\left( \bar{\alpha}_{i,s,t} - \frac{1}{2} \beta_{i,s,t} \cdot D_{i,s,t} \right) \cdot D_{i,s,t}}{\left[ \sum_{t=1}^T e^{-\delta_t \cdot t} \left[ \sum_i \sigma_{i,t,1}^2 + \sigma_{i,t,2}^2 + 2 \cdot Cov_{i,t} + \sigma_{i,t,3}^2 \right] \right]^{\frac{1}{2}}} \right. \right. \\
 & \quad \frac{\sum_f \overline{fp}_{i,f,t} (F_{i,f,t}) \cdot F_{i,f,t}}{\left[ \sum_{t=1}^T e^{-\delta_t \cdot t} \left[ \sum_i \sigma_{i,t,1}^2 + \sigma_{i,t,2}^2 + 2 \cdot Cov_{i,t} + \sigma_{i,t,3}^2 \right] \right]^{\frac{1}{2}}} \\
 & \quad \frac{\sum_n \sum_{\tau \leq t} \sum_s vc_{i,n,\tau,t} (G_{i,n,\tau,s,t}) \cdot G_{i,n,\tau,s,t}}{\left[ \sum_{t=1}^T e^{-\delta_t \cdot t} \left[ \sum_i \sigma_{i,t,1}^2 + \sigma_{i,t,2}^2 + 2 \cdot Cov_{i,t} + \sigma_{i,t,3}^2 \right] \right]^{\frac{1}{2}}} \\
 & \quad \frac{\sum_n \sum_{\tau \leq t} fc_{i,n,\tau,t} (K_{i,n,\tau,t}) \cdot K_{i,n,\tau,t}}{\left[ \sum_{t=1}^T e^{-\delta_t \cdot t} \left[ \sum_i \sigma_{i,t,1}^2 + \sigma_{i,t,2}^2 + 2 \cdot Cov_{i,t} + \sigma_{i,t,3}^2 \right] \right]^{\frac{1}{2}}} \\
 & \quad \frac{\sum_n (\sum_{\tau \leq t} ni_{i,n,\tau,t} (\rho_{i,n,\tau}) \cdot icp_{i,n,\tau} (\sum_{\tau \leq t} I_{i,n,\tau,\tau}) \cdot I_{i,n,\tau})}{\left[ \sum_{t=1}^T e^{-\delta_t \cdot t} \left[ \sum_i \sigma_{i,t,1}^2 + \sigma_{i,t,2}^2 + 2 \cdot Cov_{i,t} + \sigma_{i,t,3}^2 \right] \right]^{\frac{1}{2}}} \\
 & \quad \frac{\sum_n (\sum_{\tau \leq t} ne_{i,n,\tau,t} (\rho_{i,n,\tau}) \cdot ice_{i,n,\tau} (\sum_{\tau \leq t} EI_{i,n,\tau,\tau}) \cdot EI_{i,n,\tau})}{\left[ \sum_{t=1}^T e^{-\delta_t \cdot t} \left[ \sum_i \sigma_{i,t,1}^2 + \sigma_{i,t,2}^2 + 2 \cdot Cov_{i,t} + \sigma_{i,t,3}^2 \right] \right]^{\frac{1}{2}}} \\
 & \quad \frac{ce_{i,t} (\sum_{\tau \leq t} ES_{i,\tau}) \cdot ES_{i,t}}{\left[ \sum_{t=1}^T e^{-\delta_t \cdot t} \left[ \sum_i \sigma_{i,t,1}^2 + \sigma_{i,t,2}^2 + 2 \cdot Cov_{i,t} + \sigma_{i,t,3}^2 \right] \right]^{\frac{1}{2}}} \\
 & \quad \frac{\overline{ETSp}_t \cdot EM_{i,t}}{\left[ \sum_{t=1}^T e^{-\delta_t \cdot t} \left[ \sum_i \sigma_{i,t,1}^2 + \sigma_{i,t,2}^2 + 2 \cdot Cov_{i,t} + \sigma_{i,t,3}^2 \right] \right]^{\frac{1}{2}}} \\
 & \quad \frac{\sum_{\tau \leq t} npx_{i,\tau,t} (\rho_{i,\tau}) \cdot PCX_{i,\tau,t}}{\left[ \sum_{t=1}^T e^{-\delta_t \cdot t} \left[ \sum_i \sigma_{i,t,1}^2 + \sigma_{i,t,2}^2 + 2 \cdot Cov_{i,t} + \sigma_{i,t,3}^2 \right] \right]^{\frac{1}{2}}} \\
 & \quad \left. \left[ \frac{\sum_t e^{-\delta_t \cdot t} \cdot (\sum_k \sum_s hrs_s \cdot FL_{k,s,t} \cdot gcuk_{k,t})}{\left[ \sum_{t=1}^T e^{-\delta_t \cdot t} \left[ \sum_i \sigma_{i,t,1}^2 + \sigma_{i,t,2}^2 + 2 \cdot Cov_{i,t} + \sigma_{i,t,3}^2 \right] \right]^{\frac{1}{2}}} \right] \right\} \tag{12-10}
 \end{aligned}$$

Όπου:  $\Sigma_P^2 = \sum_{t=1}^T e^{-\delta_t \cdot t} \left[ \sum_i \sigma_{i,t,1}^2 + \sigma_{i,t,2}^2 + 2 \cdot Cov_{i,t} + \sigma_{i,t,3}^2 \right]$  η διακύμανση του συνολικού κέρδους τους συστήματος

$[\sigma_{i,t,1}^2 + \sigma_{i,t,2}^2 + 2 \cdot Cov_{i,t} + \sigma_{i,t,3}^2]$  η διακύμανση του ετήσιου κέρδους. Προκύπτει ως άθροισμα της διακύμανσης των πιθανοτικών τιμών των καυσίμων ( $\sigma_{i,t,1}^2$ ), της διακύμανσης των πιθανοτικών τιμών αγοράς των δικαιωμάτων εκπομπών  $CO_2$  ( $\sigma_{i,t,2}^2$ ), της συν διακύμανσης των τιμών των καυσίμων με τις

τιμές αγοράς των δικαιωμάτων εκπομπών  $CO_2$  ( $Cov_{i,t}$ ) και της διακύμανσης του του σταθερού όρου της αντίστροφης συνάρτησης ζήτησης ( $\sigma^2_{i,t,3}$ ):

$$\sigma^2_{i,t,1} = \sum_f (F_{i,f,t}) \cdot Vf_{i,t,f,f} \cdot (F_{i,f,t}) \quad \forall i, t \quad (12-11)$$

$$\sigma^2_{i,t,2} = EM_{i,t}^2 \sigma_{ETSp}^2 \quad \forall i, t \quad (12-12)$$

$$Cov_{i,t} = \sum_f F_{i,f,t} \cdot CovFE_t \cdot EM_{i,t} + \sum_f \sum_{ff \neq f} (F_{i,f,t}) \cdot Vf_{i,t,ff} \cdot (F_{i,ff,t}) \quad \forall i, t \quad (12-13)$$

$$\sigma^2_{i,t,3} = \sum_s D_{i,s,t}^2 \sigma_{\alpha_{i,s,t}}^2 \quad \forall i, t \quad (12-14)$$

$Vf_{i,t,ff}$  ο πίνακας συσχέτισης των τιμών των καυσίμων

Στο δεύτερο στάδιο χρησιμοποιείται η μέθοδος δικαιωμάτων προαίρεσης. Υπολογίζεται η αξία που προκύπτει για την επιχείρηση από επένδυση σε σταθμό ηλεκτροπαραγωγής. Η αξία προκύπτει χρησιμοποιώντας την **(11-23)** και δίνεται από τον τύπο:

$$V_{i,n,\tau} = \varepsilon \left[ \sum_{t \geq \tau} \frac{\tilde{SMP}_{\tau,t} G_{i,n,\tau,t} - I_{i,n,\tau} sv_{i,n,\tau,t} cc_{i,n,\tau} - \tilde{v}c_{i,n,\tau,t} G_{i,n,\tau,t}}{(1+r)^{t-\tau}} \right] \quad (12-15)$$

όπου

$\tilde{SMP}_{\tau,t}$  αναπαρίστανται τα αντιπροσωπευτικά δείγματα της θεωρούμενης στοχαστικής ανέλιξης της οριακής τιμής συστήματος. Είναι εξωγενής υπόθεση του υποδείγματος. Τα δείγματα όπως συμβολίζονται έχουν δύο δείκτες χρόνου. Ο πρώτος δείκτης αφορά το έτος θεώρησης κατασκευής επένδυσης και ο δεύτερος δείκτης δείχνει το χρόνο λειτουργίας. Πρακτικά το  $\tilde{SMP}_{\tau,t}$  αναπαριστά τα δείγματα που ξεκινούν το έτος  $\tau$  και αφορούν το έτος  $t$ .

$G_{i,n,\tau,t}$  είναι η παραγωγή σταθμού  $n$  που λειτουργεί στην χώρα  $i$ , κατασκευάστηκε το έτος  $\tau$  και λειτουργεί την χρονιά  $t$ . Η  $G_{i,n,\tau,t}$  είναι μεταβλητή του προβλήματος και προκύπτει ενδογενώς κατά επίλυση.

$I_{i,n,\tau}$  είναι η επένδυση του σταθμού  $n$  το έτος  $\tau$  στην χώρα  $i$ . Είναι μεταβλητή του προβλήματος και προκύπτει από την επίλυση

$sv_{i,n,\tau,t}, cc_{i,n,\tau}$  είναι εξωγενείς παράμετροι του υποδείγματος που δηλώνουν τον χρόνο ζωής της επένδυσης και την ετήσια αποπληρωμή μοναδιαίας επένδυσης

$\tilde{v}c_{i,n,\tau,t}$  είναι η παράμετρος που δηλώνει το μεταβλητό κόστος ανά μονάδα παραγόμενης ενέργειας

$r$  είναι το επιτόκιο αναγωγής μελλοντικών κερδών στο έτος κατασκευής επένδυσης.

Στην συνέχεια, κατ' αντιστοιχία με το κεφάλαιο 11.4, παρουσιάζεται το απλοποιημένο υπόδειγμα ηλεκτρικού τομέα ( $i$  είναι το σύνολο των χωρών που επιλύουμε):

$$\begin{aligned} & \underset{q_{i,t}, I_{i,n,\tau}, G_{i,n,\tau,t}}{MAX} \sum_t P_{i,t} q_{i,t} \\ & - \sum_t \left[ \sum_n \sum_{\tau \leq t} I_{i,n,\tau} sv_{i,n,\tau,t} cc_{i,n,\tau} + \sum_n \sum_{\tau \leq t} \tilde{v}c_{i,n,\tau,t} G_{i,n,\tau,t} \right] \\ & + \sum_n \sum_{\tau \leq t} I_{i,n,\tau} sv_{i,n,\tau,t} V_{i,n,\tau} \end{aligned} \quad (12-16)$$

$$- FLOL_{i,t} \left( \sum_n \sum_{\tau \leq t} \left( exogcap_{i,n,\tau,t} + I_{i,n,\tau} sv_{i,n,\tau,t} - \frac{Qr_{i,t}}{v} \right) \right)$$

$$s. t. \quad \sum_n \sum_{\tau \leq t} G_{i,n,\tau,t} \geq q_{i,t} \quad \perp \lambda_{i,t} \quad (12-17)$$

$$I_{i,n,\tau} sv_{i,n,\tau,t} \geq G_{i,n,\tau,t} \quad \perp \xi_{i,n,\tau,t} \quad (12-18)$$

όπου

$exogcap_{i,n,\tau,t}$  είναι η εγκατεστημένη ισχύς των ήδη υπαρχόντων σταθμών το έτος έναρξης της μελέτης. Αυτή η παράμετρος δείχνει την εγκατεστημένη ισχύ του σταθμού  $n$  που κατασκευάστηκε το έτος  $\tau$  το έτος λειτουργίας  $t$ .

$Qr_{i,t}$  είναι η εξέλιξη της ζήτησης την οποία θεωρεί ο ρυθμιστής της αγοράς και η οποία πρέπει να καλύπτεται από την αγορά

$v$  είναι ο αριθμός των συμμετρικών επιχειρήσεων που λειτουργούν στην αγορά.

Οι περιορισμοί μένουν όπως στο κεφάλαιο 4.



### 12.3 Ανάλυση υποδείγματος πολλών σταδίων αβεβαιότητας

Στο πρώτο στάδιο, η επιχείρηση έχει να αντιμετωπίσει τα ακόλουθα. Το πρώτο στάδιο αφορά το μεσοπρόθεσμο μέλλον όπου η ανάγκη για επενδύσεις είναι περιορισμένη αφού στο σύστημα υπάρχουν οι εγκατεστημένοι σταθμοί το έτος έναρξης μελέτης. Η επιχείρηση παρατηρώντας αυτή την κατάσταση και με δεδομένο ότι ο σκοπός της στο πρώτο στάδιο είναι η αποφυγή μακροχρόνιας ζημίας αναβάλλει την πραγματοποίηση επενδύσεων. Αυτή όμως η αναβολή οδηγεί στο τέλος της πρώτης περιόδου να εμφανίζονται περικοπές φορτίου και ο ρυθμιστής να επεμβαίνει στην αγορά. Έτσι η επιχείρηση φοβούμενη το πιθανό πρόστιμο από τον ρυθμιστή προβαίνει στις ελάχιστες απαραίτητες επενδύσεις. Αυτές οι επενδύσεις όπως επιβεβαιώνονται από τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στο επόμενο κεφάλαιο (κεφάλαιο 13) αφορούν κυρίως την ανακαίνιση και επέκταση του χρόνου ζωής ήδη εγκατεστημένων σταθμών οι οποίοι είναι προγραμματισμένο να κλείσουν σε αυτήν την χρονική περίοδο. Επιπλέον λόγω της μεγάλης αβεβαιότητας και δεδομένου ότι η επιχείρηση αδιαφορεί για το μέγεθος του κέρδους – οφέλους αλλά επιδιώκει μόνο αποφυγή του κινδύνου, επιλέγει μονάδες μικρής έντασης κεφαλαίου και μεγάλου μέσου κόστους, όπως είναι οι μονάδες αεριοστρόβιλων έναντι μονάδων μεγαλύτερης έντασης κεφαλαίου και μικρότερου μέσου κόστους, όπως είναι οι μονάδες συνδυασμένου κύκλου ή οι σταθμοί στερεών καυσίμων.

Στο δεύτερο στάδιο, μεγάλο μέρος της αβεβαιότητας έχει ξεκαθαρίσει. Η επιχείρηση ξεκινά στο δεύτερο στάδιο με παλιές κυρίως μονάδες των οποίων έχει επεκταθεί ο χρόνος ζωής. Σε αυτό το στάδιο πλέον η αβεβαιότητα που αντιμετωπίζει η επιχείρηση για το μέλλον είναι αρκετά μικρότερη σχετικά με του πρώτου σταδίου. Επίσης με την μείωση της αβεβαιότητας, θεωρούμε ότι η επιχείρηση αλλάζει συμπεριφορά έναντι του κινδύνου. Από την πιθανότητα αποφυγής ζημίας που προσπαθούσε να μεγιστοποιήσει στο πρώτο στάδιο, σε αυτό το δεύτερο στάδιο θεωρούμε ότι η επιχείρηση αξιολογεί κάθε επένδυση ξεχωριστά με τη μέθοδο των δικαιωμάτων προαίρεσης. Η επιχείρηση λαμβάνοντας υπόψιν τις επενδυτικές αποφάσεις που έλαβε στο πρώτο στάδιο καθώς και τις νέες πληροφορίες που έχει ως προς την περεταίρω εξέλιξη των στοχαστικών μεγεθών μπορεί να λάβει στο στάδιο αυτό πιο στοχευμένες αποφάσεις. Σε αυτή την περίπτωση, η επιχείρηση προβαίνει στην υλοποίηση επενδύσεων τόσο σε νέες μονάδες όσο και σε ανακαινίσεις παλαιών σταθμών φοβούμενες το πρόστιμο από τον ρυθμιστή.



## Κεφάλαιο 13

### 13 Παρουσίαση αποτελεσμάτων

---

#### 13.1 Εισαγωγή

Τα ανωτέρω υποδείγματα επιλύθηκαν θεωρώντας τις ακόλουθες υποθέσεις. Ο ορίζοντας μελέτης του ηλεκτρικού τομέα είναι από το 2015 έως το 2050 με βήματα χρόνου ανά 5 έτη. Οι ετήσιες ώρες ομαδοποιήθηκαν σε 11 τυπικές ημέρες ώστε η ωριαία κατανομή φορτίου κατά τις τυπικές ημέρες να προσεγγίζει ικανοποιητικά τη διακύμανση και τις μέσες τιμές της πλήρους ωριαίας κατανομής της καμπύλης φορτίου. Οι μέσες τιμές της ζήτησης ελήφθησαν όπως έχουν υπολογιστεί στο Σενάριο Αναφοράς της Ευρωπαϊκής Επιτροπής<sup>6</sup> στα υποδείγματα που χρειάζεται. Με το μοντέλο έχουμε αναπαραστήσει όλες τις χώρες της Ευρωπαϊκής Ένωσης αλλά για λόγους επισκόπησης έχουμε παρουσιάσει αποτελέσματα της προσομοίωσης του ηλεκτρικού τομέα της Ελλάδας, της Πολωνίας, της Γερμανίας, της Ισπανίας και της Ιταλίας. Αναπαριστώνται με μεγάλη λεπτομέρεια οι μονάδες του ηλεκτρικού συστήματος κάθε χώρας αλλά για λόγους παρουσίασης μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε αεριοστρόβιλους, μονάδες στερεών καυσίμων, μονάδες αερίων καυσίμων, μονάδες ΑΠΕ, υδροστρόβιλοι, αντλησιοταμιευτικές μονάδες, πυρηνικοί σταθμοί και σταθμοί κατακράτησης και αποθήκευσης τόνων CO<sub>2</sub> (σταθμοί CCS). Στο έτος έναρξης της μελέτης έχουν θεωρηθεί οι υπάρχουσες μονάδες των διαφόρων χωρών το έτος 2015. Για το μακροχρόνιο ενεργειακό σχεδιασμό του συστήματος, πραγματοποιούνται επενδύσεις σε νέες μονάδες καθώς και επενδύσεις ανακαίνισης των ήδη εγκατεστημένων σταθμών.

---

<sup>6</sup> Σενάριο Αναφοράς Ευρωπαϊκής Επιτροπής  
[https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/trends\\_to\\_2050\\_update\\_2013.pdf](https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/trends_to_2050_update_2013.pdf)

Επιπλέον, έχει συμπεριληφθεί εξωγενές πρόγραμμα αποξήλωσης των ήδη εγκατεστημένων μονάδων το οποίο όμως μπορεί να μεταβληθεί από τις ενδογενείς αποφάσεις περί ανακαίνισης υπαρχόντων σταθμών. Έχουν θεωρηθεί, ακόμη, εξωγενή άνω όρια της διαθεσιμότητας στερεών καυσίμων, όπως ο λιγνίτης, που περιορίζονται κυρίως λόγω των διαθέσιμων κοιτασμάτων.

Επιπλέον, τα ανωτέρω υποδείγματα επιλύθηκαν θεωρώντας διάφορα σενάρια μοντελοποίησης της αβεβαιότητας για την εξέλιξη των τιμών των πιθανοτικών μεγεθών. Για την προσομοίωση της κατάστασης αυτής επιλύσαμε τα υποδείγματα για 5 σενάρια στα οποία θεωρήσαμε ίδια μέση τιμή της κατανομής κάθε πιθανοτικού μεγέθους και μεταβάλλαμε την τυπική απόκλιση της κατανομής. Πιο συγκεκριμένα, μεταβάλλαμε την τυπική απόκλιση της κατανομής των τιμών του άνθρακα, οι οποίες επηρεάζουν την τιμή της βιομάζας, των τιμών του φυσικού αερίου και των τιμών αγοράς των δικαιωμάτων εκπομπών CO<sub>2</sub>. Για τις τιμές των τυπικών αποκλίσεων κάθε κατανομής θεωρήθηκαν δύο σενάρια, χαμηλή τιμή και υψηλή τιμή.

Επιπλέον έχει μοντελοποιηθεί το ευρωπαϊκό δίκτυο με τις διασυνδεδετικές γραμμές μεταξύ χωρών με χρήση της μεθόδου γραμμικοποίησης κατά DC. Όσον αφορά πληροφορίες σχετικά με τις διασυνδεδετικές γραμμές έχουμε χρησιμοποιήσει πληροφορίες από την ηλεκτρονική ιστοσελίδα του Entso-E<sup>7</sup>.

Επιπλέον, τα υποδείγματα επιλύθηκαν για ένα σενάριο πολύ έντονης αβεβαιότητας αναφορικά με την μελλοντική εξέλιξη της τιμής του άνθρακα, του φυσικού αερίου και της τιμής αγοράς των δικαιωμάτων εκπομπών στο οποίο οι τιμές είναι πιθανοτικά ανεξάρτητες από κάθε προηγούμενη μεταβολή.

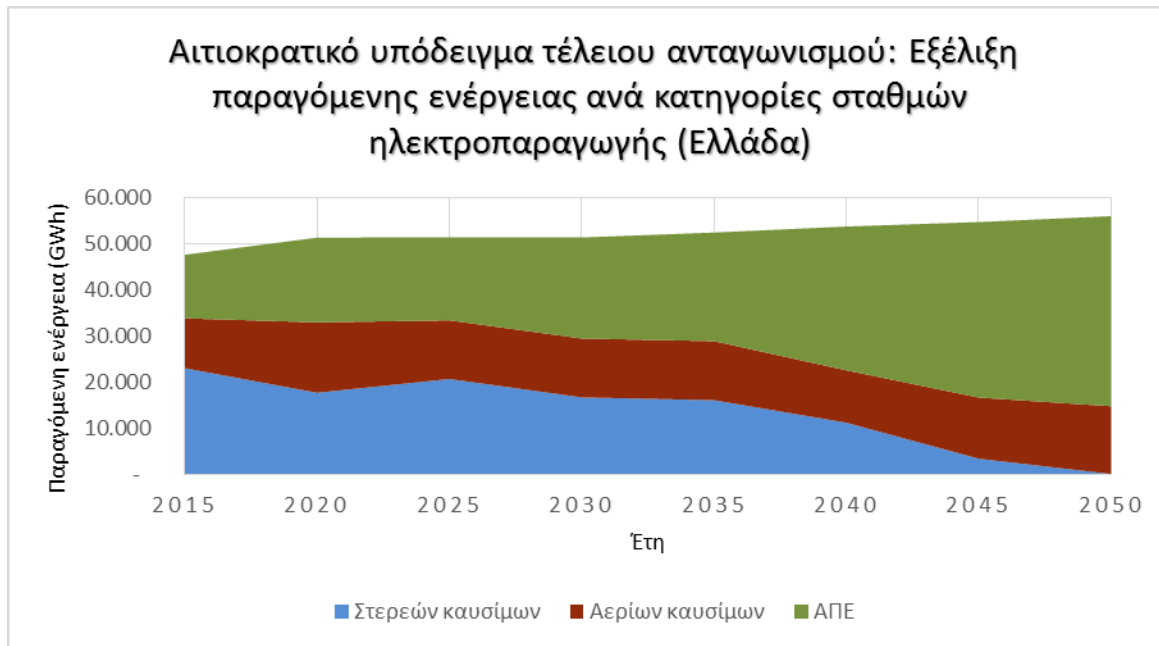
Πρέπει να αναφέρουμε ότι στα γραφήματα και στους πίνακες που παρουσιάζονται στο παρόν κεφάλαιο, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που αφορούν ολόκληρη την αγορά είτε λειτουργεί υπό καθεστώς τέλειου είτε ατελούς ανταγωνισμού και δεν δείχνουμε τα αποτελέσματα μιας μόνο επιχείρησης. Αυτό έγινε για λόγους συγκρισιμότητας των διαφόρων παραλλαγών.

<sup>7</sup> <https://www.entsoe.eu>

## 13.2 Αποτελέσματα επίλυσης υποδείγματος που αναπαριστά τον ηλεκτρικό τομέα της Ελλάδας

### 13.2.1 Αιτιοκρατικό υπόδειγμα

Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας του ηλεκτρικού τομέα της Ελλάδας διαμορφώνεται ως ακολούθως (Γράφημα 7). Στο μεσοπρόθεσμο ορίζοντα η παραγόμενη ενέργεια από

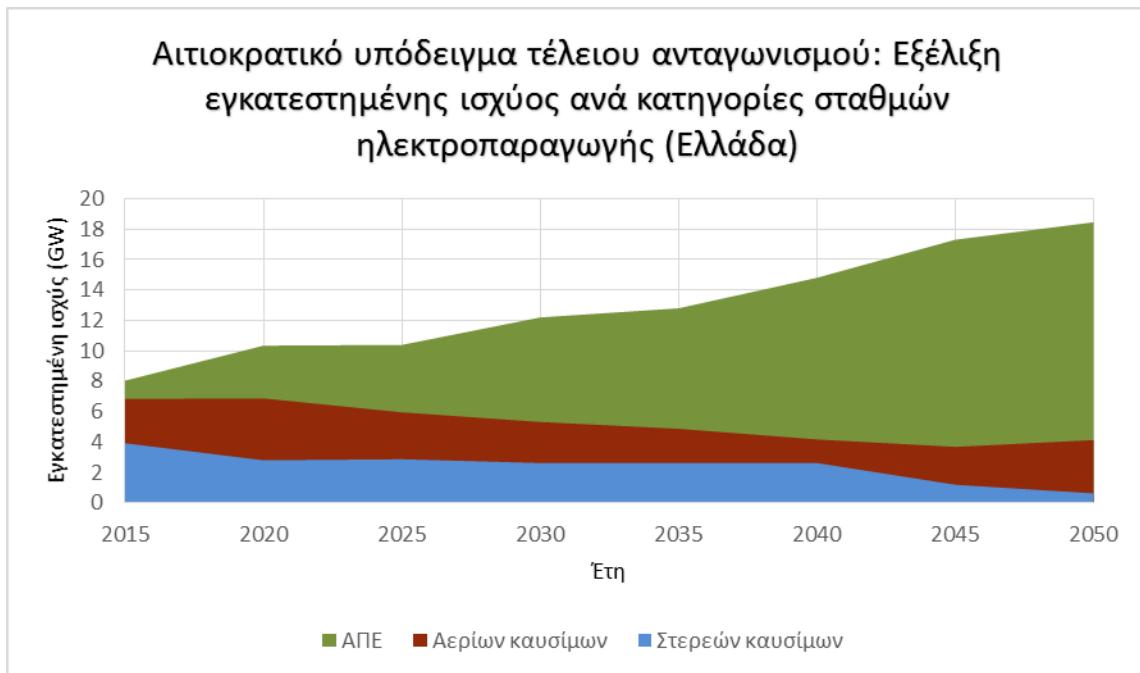


Γράφημα 7: Παραγόμενη ενέργεια σε GWh ανά κατηγορίες σταθμών ηλεκτροπαραγωγής όπως προέκυψε από την επίλυση του αιτιοκρατικού υποδείγματος αγοράς που αναπαριστά τον ηλεκτρικό τομέα της Ελλάδας στον οποίο δραστηριοποιείται επιχείρηση υπό καθεστώς τέλειου ανταγωνισμού

σταθμούς στερεών καυσίμων –κυρίως λιγνίτη– του Ελληνικού ηλεκτρικού τομέα μειώνεται λόγω της αύξησης της τιμής αγοράς των δικαιωμάτων εκπομπών. Στο μεσοπρόθεσμο διάστημα αυξάνεται η παραγωγή των μονάδων ΑΠΕ και διατηρείται η παραγωγή από μονάδες αερίων καυσίμων. Στο μακροπρόθεσμο ορίζοντα, η παραγωγή ενέργειας από μονάδες στερεών καυσίμων μειώνεται περεταίρω ενώ αυξάνεται η παραγωγή από μονάδες ΑΠΕ. Η παραγωγή από μονάδες αερίων καυσίμων αυξάνεται ελαφρώς. Η συμπεριφορά αυτή εξηγείται ως ακολούθως. Λόγω της αύξησης της τιμής αγοράς δικαιωμάτων εκπομπών, το κενό που προκύπτει από την μείωση της παραγωγής των στερεών καυσίμων στην συνολική παραγόμενη ενέργεια αντικαθίσταται από τις μονάδες ΑΠΕ οι οποίες στην πλειονότητά τους είναι διακοπτόμενες. Για την καλύτερη λειτουργία του συστήματος το οποίο αναπαρίσταται με αρκετή λεπτομέρεια όπως έχουμε ήδη εξηγήσει στο κεφάλαιο 4 και πιο συγκεκριμένα από την απαίτηση να

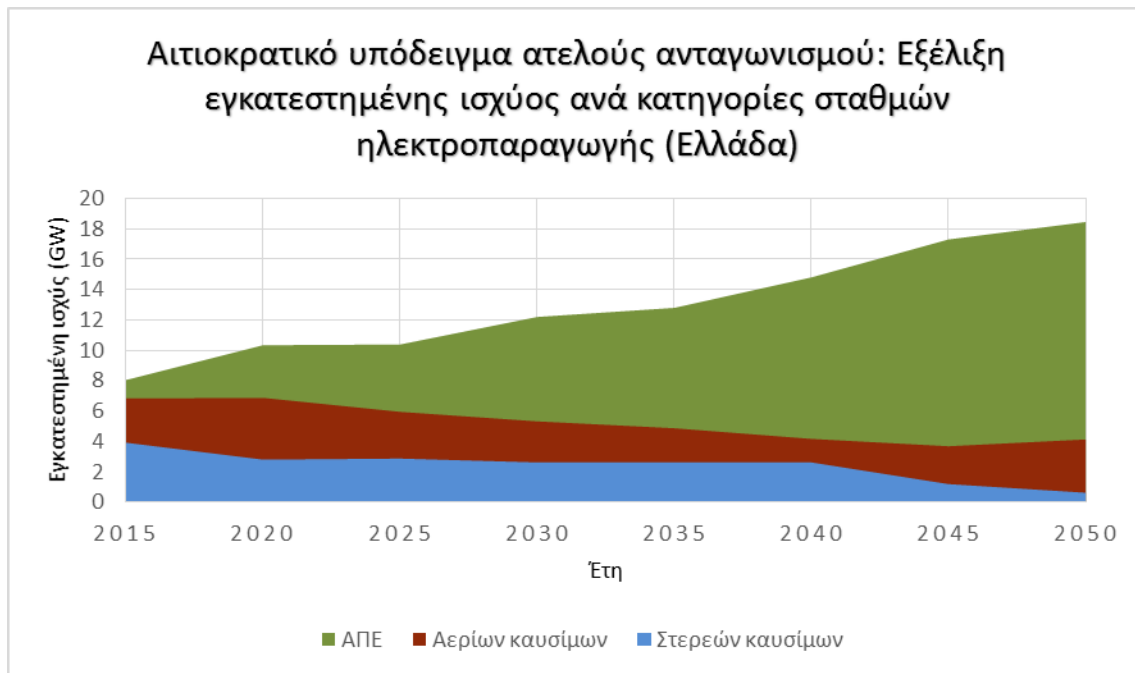
καλύπτονται οι περιορισμοί κυκλικής λειτουργίας ηλεκτροπαραγωγικών μονάδων και συνολικής εφεδρείας του συστήματος, διατηρείται η παραγωγή από μονάδες αερίων καυσίμων. Επίσης οι μονάδες αυτές έχοντας πολύ μικρότερο συντελεστή εκπομπής CO<sub>2</sub> γίνονται πιο ανταγωνιστικές στο μακροπρόθεσμο ορίζοντα σε σχέση με τις μονάδες στερεών καυσίμων.

Η εγκατεστημένη ισχύς των μονάδων στερεών καυσίμων μειώνεται μακροπρόθεσμα, δεδομένου ότι το κόστος λειτουργίας των συγκεκριμένων μονάδων αυξάνεται και ο βαθμός χρησιμοποίησης μειώνεται (Γράφημα 8). Η εγκατεστημένη ισχύς των σταθμών αερίων καυσίμων διατηρείται για λόγους λειτουργίας και εφεδρείας του συστήματος (Γράφημα 8). Η εγκατεστημένη ισχύς των μονάδων ΑΠΕ αυξάνεται ελαφρώς μεσοπρόθεσμα και με εντονότερο ρυθμό μακροπρόθεσμα (Γράφημα 8). Η αύξηση αυτή περιορίζεται δεδομένου ότι οι διαθέσιμες επιλογές αποθήκευσης (αντλησιοταμιευτικές μονάδες) έχουν δεδομένη χωρητικότητα και περιορισμένες δυνατότητες περαιτέρω ανάπτυξης. Η εγκατεστημένη ισχύς τόσο των πυρηνικών σταθμών όσο και των μονάδων CCS είναι μηδενική το έτος βάσης και δεν πραγματοποιούνται επενδύσεις σε αυτές.



Γράφημα 8: Εγκατεστημένη ισχύς σε GW ανά κατηγορίες σταθμών ηλεκτροπαραγωγής όπως προέκυψε από την επίλυση του αιτιοκρατικού υποδείγματος αγοράς που αναπαριστά τον ηλεκτρικό τομέα της Ελλάδας στον οποίο δραστηριοποιείται επιχείρηση υπό καθεστώς τέλει ανταγωνισμού

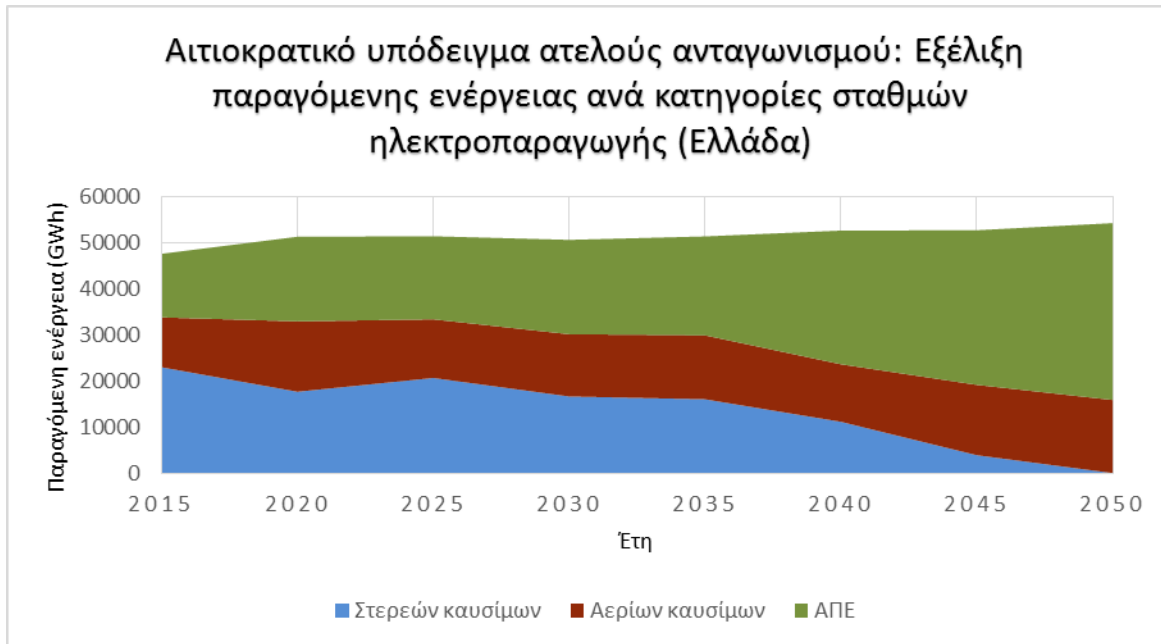
### 13.2.1.1 Αιτιοκρατικό υπόδειγμα προσομοίωσης αγοράς υπό καθεστώς ατελούς ανταγωνισμού



Γράφημα 9: Εγκατεστημένη ισχύς σε GW ανά κατηγορίες σταθμών ηλεκτροπαραγωγής όπως προέκυψε από την επίλυση του αιτιοκρατικού υποδείγματος αγοράς που αναπαριστά τον ηλεκτρικό τομέα της Ελλάδας στον οποίο δραστηριοποιείται επιχείρηση υπό καθεστώς ατελούς ανταγωνισμού

Στην υποενότητα αυτή παρουσιάζονται τα αποτελέσματα τόσο σε ενεργειακό επίπεδο όσο και σε επίπεδο εγκατεστημένης ισχύος όπως προέκυψαν από την επίλυση του αιτιοκρατικού υποδείγματος αγοράς που αναπαριστά τον ηλεκτρικό τομέα της Ελλάδας υπό καθεστώς ατελούς ανταγωνισμού. Στην αγορά δραστηριοποιούνται επιχειρήσεις υπό καθεστώς ατελούς ανταγωνισμού. Η εγκατεστημένη ισχύς των σταθμών συνδυασμένου κύκλου αυξάνεται με μικρό ρυθμό μεσοπρόθεσμα και με μεγαλύτερο μακροπρόθεσμα και πιο συγκεκριμένα, η αύξηση της ισχύος των σταθμών αυτών είναι πιο μεγάλη από την αντίστοιχη της επίλυσης του υποδείγματος αναπαράστασης της αγοράς υπό καθεστώς τέλειου ανταγωνισμού, δεδομένου ότι η επιχείρηση έχει μικρότερη αβεβαιότητα για την ανάκτηση του κεφαλαίου της όπως εξηγήθηκε στο κεφάλαιο 4.4 (Γράφημα 9). Η εγκατεστημένη ισχύς των μονάδων στερεών καυσίμων μειώνεται μεσοπρόθεσμα με μικρό ρυθμό, ενώ μακροπρόθεσμα με μεγαλύτερο λόγω της αύξησης της τιμής αγοράς των δικαιωμάτων εκπομπών (Γράφημα 9). Συνολικά, η αποξήλωση των μονάδων αυτών είναι μικρότερη της αντίστοιχης του αιτιοκρατικού υποδείγματος για την αγορά υπό καθεστώς τέλειου ανταγωνισμού. Δεδομένης της

αύξησης της τιμής αγοράς των δικαιωμάτων εκπομπών η εγκατεστημένη ισχύς των μονάδων ΑΠΕ αυξάνεται διαχρονικά (Γράφημα 9). Η παραγόμενη ενέργεια των σταθμών αυτών ακολουθεί αντίστοιχη διαχρονική μεταβολή (Γράφημα 10).



Γράφημα 10: Παραγόμενη ενέργεια σε GWh ανά κατηγορίες σταθμών ηλεκτροπαραγωγής όπως προέκυψε από την επίλυση του αιτιοκρατικού υποδείγματος αγοράς που αναπαριστά τον ηλεκτρικό τομέα της Ελλάδας στον οποίο δραστηριοποιείται επιχείρηση υπό καθεστώς ατελούς ανταγωνισμού

Οι επιχειρήσεις που λειτουργούν σε αγορά υπό καθεστώς ατελούς ανταγωνισμού έχουν τη δυνατότητα να επηρεάσουν την τιμή του ηλεκτρισμού, όπως αναλύθηκε στο κεφάλαιο 4.4. Για τον λόγο αυτό, η συνολική ζητούμενη ενέργεια μειώνεται. Στον ακόλουθο πίνακα (Πίνακας 13-1) παρουσιάζεται η διαχρονική μεταβολή της ζητούμενης ενέργειας όπως προέκυψε από την επίλυση του αιτιοκρατικού υποδείγματος της αγοράς υπό καθεστώς τέλει ανταγωνισμού και από την επίλυση του αιτιοκρατικού υποδείγματος της αγοράς υπό καθεστώς ατελούς ανταγωνισμού. Για λόγους εποπτείας, παρουσιάζονται οι τιμές ως ποσοστό της ζητούμενης ενέργειας του έτους 2020 όπως προέκυψε από την επίλυση του αιτιοκρατικού υποδείγματος της αγοράς υπό καθεστώς τέλει ανταγωνισμού.



Πίνακας 13-1: Ζητούμενη ενέργεια του αιτιοκρατικού υποδείγματος ανάλογα την κατάσταση της αγοράς θεωρώντας ως μέτρο σύγκρισης την ζητούμενη ενέργεια του τέλειου ανταγωνισμού το έτος 2020

	<b>2020</b>	<b>2030</b>	<b>2050</b>
<b>Τέλειος ανταγωνισμός</b>	100%	98%	105%
<b>Ατελής ανταγωνισμός</b>	99%	95%	101%

### 13.2.2 Σενάρια μοντελοποίησης της αβεβαιότητας

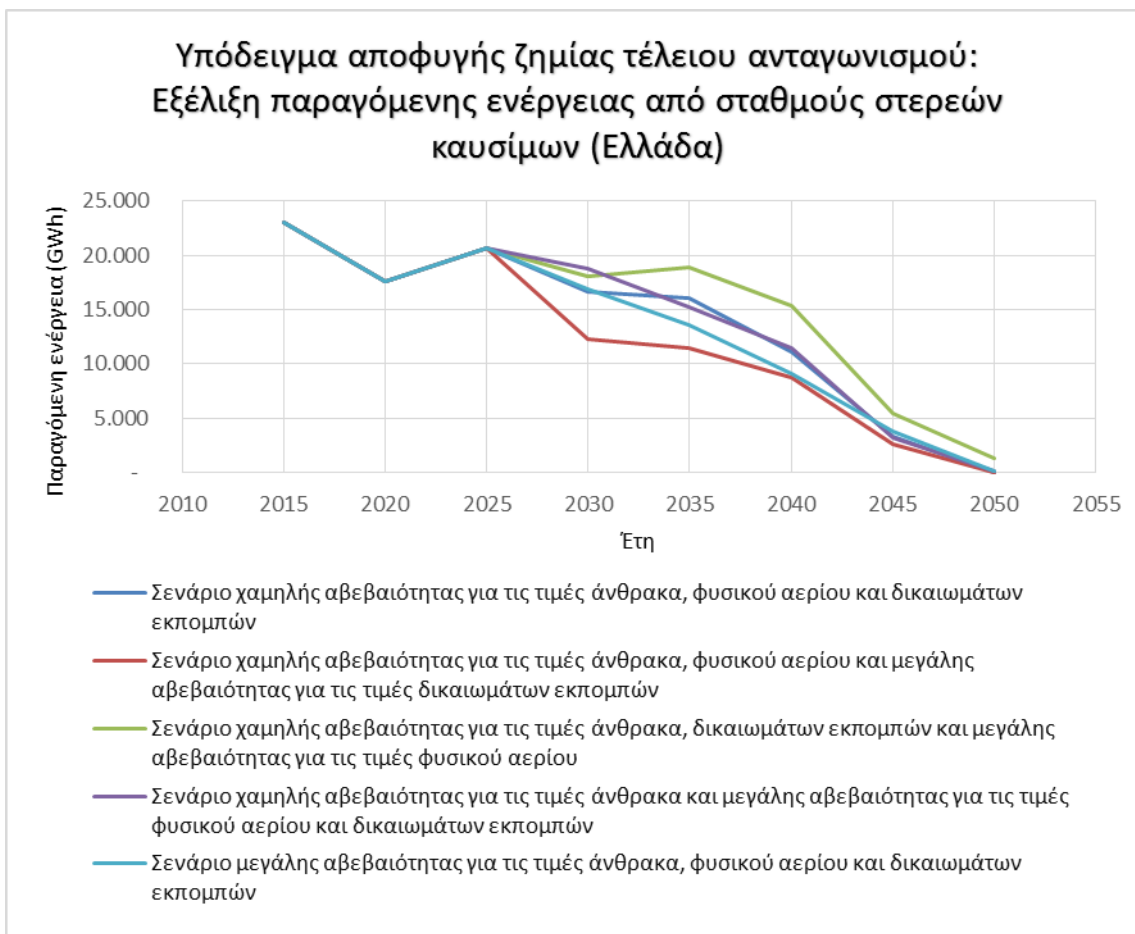
Στη συνέχεια επιλύονται τα υποδείγματα όπως αναλύθηκαν στις προηγούμενες ενότητες σε διάφορα σενάρια μοντελοποίησης της αβεβαιότητας ως προς την εξέλιξη των πιθανοτικών μεγεθών.

#### 13.2.2.1 Υπόδειγμα με αντικειμενική συνάρτηση την μεγιστοποίηση πιθανότητας αποφυγής ζημίας

Στην υποενότητα αυτή παρουσιάζονται τα αποτελέσματα τόσο σε ενεργειακό επίπεδο όσο και σε επίπεδο εγκατεστημένης ισχύος από την επίλυση του υποδείγματος με αντικειμενική συνάρτηση την μεγιστοποίηση πιθανότητας αποφυγής ζημίας μιας επιχείρησης που λειτουργεί στην αγορά της Ελλάδας υπό καθεστώς τέλειου ανταγωνισμού.

Στο σενάριο χαμηλής αβεβαιότητας για τις τιμές άνθρακα, φυσικού αερίου και δικαιωμάτων εκπομπών, το μίγμα της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από την επίλυση του υποδείγματος αξιολόγησης του κινδύνου με τη μέθοδο της μεγιστοποίησης της πιθανότητας αποφυγής ζημίας όπως έχει αναλυθεί στο κεφάλαιο 8 διαμορφώνεται αντίστοιχα με το μίγμα της παραγωγής όπως προκύπτει από την επίλυση του αιτιοκρατικού υποδείγματος.

Η μέθοδος με αντικειμενική συνάρτηση την μεγιστοποίηση πιθανότητας αποφυγής ζημίας αποτελεί μέθοδο αξιολόγησης του κινδύνου στην οποία ο αποφασίζων δηλώνει την αυξανόμενη αποστροφή του προς τον κίνδυνο, δηλαδή η συνάρτηση χρησιμότητας που προσομοιώνει τη συμπεριφορά της επιχείρησης έχει την ιδιότητα αυξανόμενης σχετικής αποστροφής προς τον κίνδυνο (IRRA increasing relative risk aversion). Η



Γράφημα 11: Παραγόμενη ενέργεια σε GWh από σταθμούς στερεών καυσίμων όπως προέκυψε από την επίλυση του υποδείγματος μεγιστοποίησης της πιθανότητας αποφυγής ζημίας για την αγορά που αναπαριστά τον ηλεκτρικό τομέα της Ελλάδας

συμπεριφορά του αυτή παρουσιάζεται στο γεγονός ότι ο αποφασίζων επιλέγει το μίγμα επενδύσεων με τέτοιο τρόπο ώστε να μειώσει την αβεβαιότητα κατά το μέγιστο ακόμη κι αν οι επενδύσεις αυτές είναι λιγότερο επικερδείς σε σχέση με τις εναλλακτικές επιλογές. Συνεπώς, σε αυτή την μεθοδολογία αξιολόγησης του κινδύνου στο σενάριο χαμηλής αβεβαιότητας για τις τιμές άνθρακα, φυσικού αερίου και δικαιωμάτων εκπομπών μειώνει την παραγωγή από στερεά καύσιμα ήδη από το μεσοπρόθεσμο ορίζοντα (Γράφημα 11). Στο μεσοπρόθεσμο διάστημα, το κενό που προκύπτει από αυτή την μείωση στην συνολική παραγόμενη ενέργεια αντικαθίσταται κατά μεγάλο μέρος από

ήδη εγκατεστημένες μονάδες αερίων καυσίμων στις οποίες αυξάνεται ο βαθμός χρησιμοποίησής τους (Γράφημα 12).

Στο σενάριο χαμηλής αβεβαιότητας για τις τιμές άνθρακα, δικαιωμάτων εκπομπών και μεγάλης αβεβαιότητας για τις τιμές φυσικού αερίου η παραγόμενη ενέργεια από μονάδες αερίων καυσίμων μειώνεται αρκετά στο μεσοπρόθεσμο διάστημα λόγω της μεγάλης αβεβαιότητας για τις τιμές φυσικού αερίου. Ωστόσο, μακροπρόθεσμα, δεδομένου ότι η παραγωγή από σταθμούς στερεών καυσίμων μειώνεται λόγω της αύξησης της τιμής αγοράς δικαιωμάτων εκπομπών, η παραγόμενη ενέργεια από τους σταθμούς αερίων καυσίμων αυξάνεται ελαφρώς για να καλύπτονται οι απαιτήσεις του συστήματος στην αύξηση του φορτίου αλλά και οι απαιτήσεις εφεδρείας. Η παραγόμενη



Γράφημα 12: Παραγόμενη ενέργεια σε GWh από σταθμούς αερίων καυσίμων όπως προέκυψε από την επίλυση του υποδείγματος μεγιστοποίησης της πιθανότητας αποφυγής ζημίας για την αγορά που αναπαριστά τον ηλεκτρικό τομέα της Ελλάδας

ενέργεια από μονάδες ΑΠΕ αυξάνεται μακροπρόθεσμα λόγω της αύξησης της τιμής αγοράς δικαιωμάτων εκπομπών.

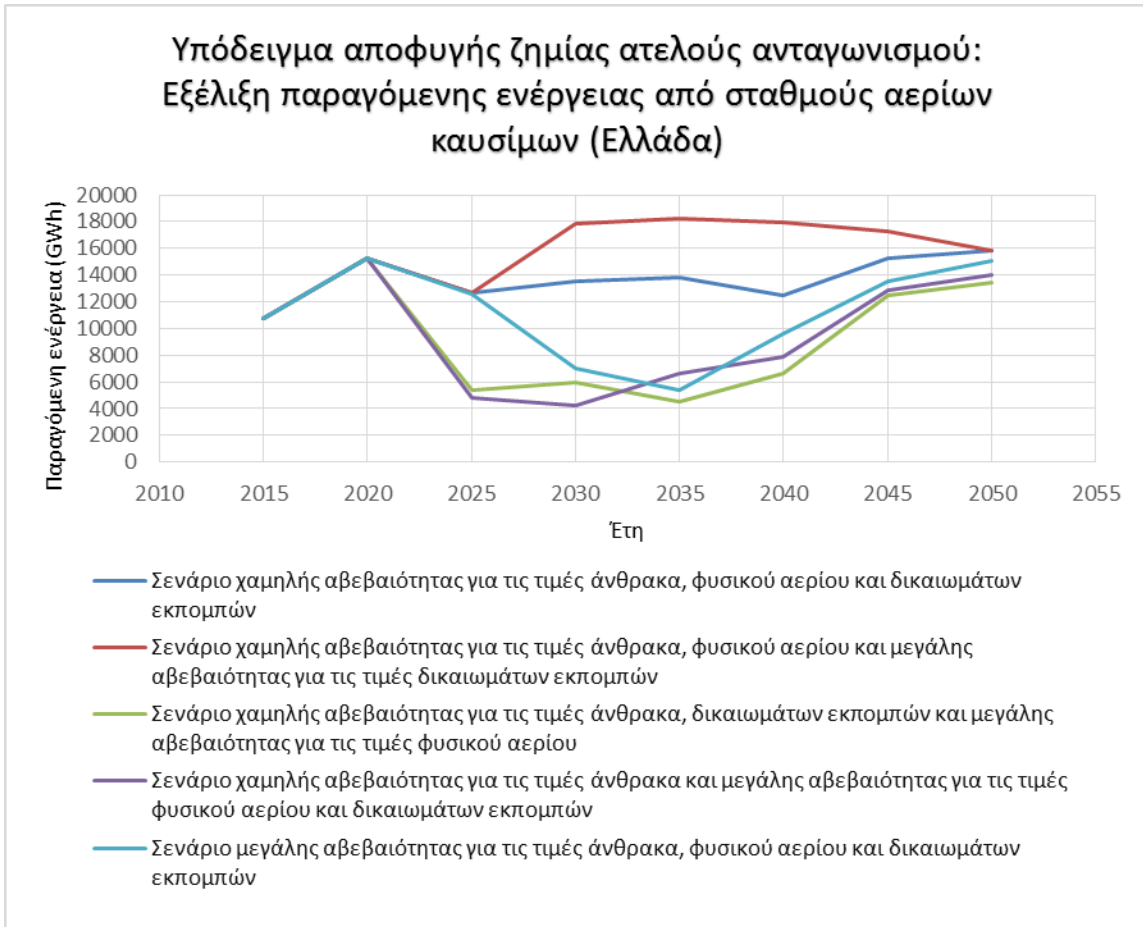
Στο σενάριο μεγάλης αβεβαιότητας για τις τιμές άνθρακα, φυσικού αερίου και δικαιωμάτων εκπομπών στο μεσοπρόθεσμο διάστημα η παραγόμενη ενέργεια από μονάδες στερεών και αερίων καυσίμων μειώνεται και αυξάνεται ελαφρώς η παραγωγή από μονάδες ΑΠΕ λόγω της μεγάλης αβεβαιότητας στο κόστος των στερεών και αερίων καυσίμων ( Γράφημα 12,Γράφημα 12). Για τον ίδιο λόγο, στο μακροχρόνιο ορίζοντα η παραγωγή τόσο από μονάδες αέριων καυσίμων όσο και από μονάδες στερεών καυσίμων, μειώνεται περεταίρω και για την κάλυψη της υπολειπόμενης ενέργειας αξιοποιούνται μονάδες ΑΠΕ και αντλησιοταμιευτικοί σταθμοί (Γράφημα 12,Γράφημα 12).

#### 13.2.2.1.1 Υπόδειγμα προσομοίωσης αγοράς υπό καθεστώς ατελούς ανταγωνισμού με αντικειμενική συνάρτηση την μεγιστοποίηση πιθανότητας αποφυγής ζημίας

Στην υποενότητα αυτή παρουσιάζονται τα αποτελέσματα τόσο σε ενεργειακό επίπεδο όσο και σε επίπεδο εγκατεστημένης ισχύος από την επίλυση του υποδείγματος με αντικειμενική συνάρτηση την μεγιστοποίηση πιθανότητας αποφυγής ζημίας μιας επιχείρησης που λειτουργεί στην αγορά της Ελλάδας υπό καθεστώς ατελούς ανταγωνισμού.

Στο σενάριο χαμηλής αβεβαιότητας για τις τιμές άνθρακα, φυσικού αερίου και δικαιωμάτων εκπομπών, το μίγμα της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας όπως προκύπτει από την επίλυση του υποδείγματος αξιολόγησης του κινδύνου με τη μέθοδο της μεγιστοποίησης της πιθανότητας αποφυγής ζημίας διαμορφώνεται αντίστοιχα με το μίγμα της παραγωγής όπως προκύπτει από την επίλυση του αιτιοκρατικού υποδείγματος (Γράφημα 13).

Στο σενάριο χαμηλής αβεβαιότητας για τις τιμές άνθρακα και μεγάλης αβεβαιότητας για τις τιμές φυσικού αερίου και δικαιωμάτων εκπομπών, η παραγόμενη ενέργεια από σταθμούς αερίων καυσίμων μειώνεται με έντονο ρυθμό λόγω της μεγάλης αβεβαιότητας στην τιμή αγοράς του καυσίμου και στο κόστος αγοράς των δικαιωμάτων εκπομπών. Η μείωση αυτή περιορίζεται διότι απαιτούμε να καλύπτονται οι περιορισμοί κυκλικής λειτουργίας ηλεκτροπαραγωγικών μονάδων και συνολικής εφεδρείας του συστήματος (Γράφημα 13).

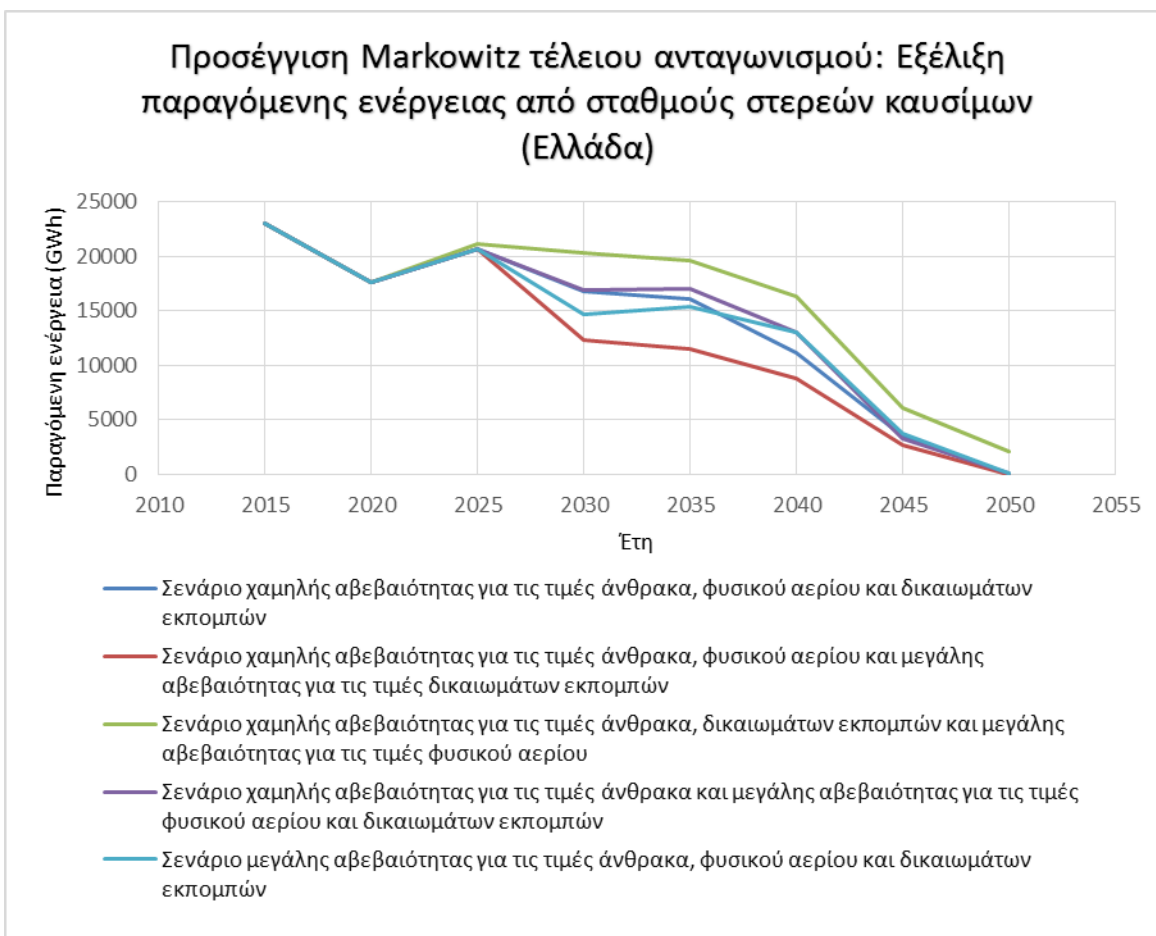


Γράφημα 13: Παραγόμενη ενέργεια σε GWh από σταθμούς αερίων καυσίμων όπως προέκυψε από την επίλυση του υποδείγματος μεγιστοποίησης της πιθανότητας αποφυγής ζημίας για την αγορά που αναπαριστά τον ηλεκτρικό τομέα της Ελλάδας στον οποίο δραστηριοποιείται επιχείρηση υπό καθεστώς ατελούς ανταγωνισμού

### 13.2.2.2 Υπόδειγμα εφαρμογής της προσέγγισης του Markowitz

Στην υποενότητα αυτή παρουσιάζονται τα αποτελέσματα τόσο σε ενεργειακό επίπεδο όσο και σε επίπεδο εγκατεστημένης ισχύος όπως προέκυψαν από την επίλυση του υποδείγματος αξιολόγησης του κινδύνου με χρήση της προσέγγισης του Markowitz μιας επιχείρησης που λειτουργεί στην αγορά υπό καθεστώς τέλειου ανταγωνισμού.

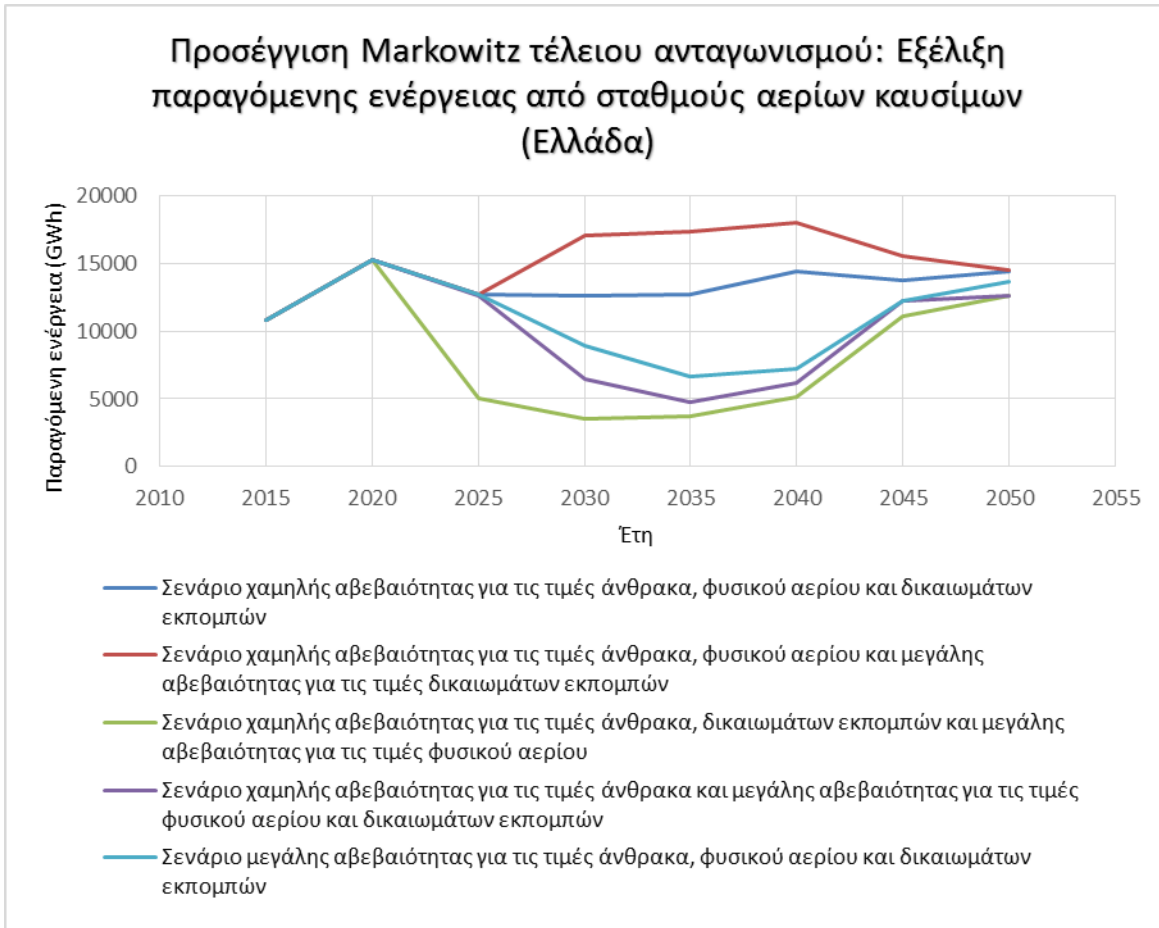
Τα αποτελέσματα επίλυσης τόσο σε ενεργειακό επίπεδο όσο και σε επίπεδο εγκατεστημένης ισχύος του υποδείγματος αυτού στο σενάριο χαμηλής αβεβαιότητας για τις τιμές άνθρακα, φυσικού αερίου και δικαιωμάτων εκπομπών πλησιάζουν τα αποτελέσματα του αιτιοκρατικού υποδείγματος. Αυτό εξηγείται από το γεγονός ότι η αβεβαιότητα ως προς τη μελλοντική εξέλιξη των τιμών των πιθανοτικών μεγεθών είναι μικρή.



Γράφημα 14: Παραγόμενη ενέργεια σε GWh από σταθμούς στερεών καυσίμων όπως προέκυψε από την επίλυση του υποδείγματος με χρήση της προσέγγισης του Markowitz για την αγορά που αναπαριστά τον ηλεκτρικό τομέα της Ελλάδας

Στο σενάριο χαμηλής αβεβαιότητας για τις τιμές άνθρακα, δικαιωμάτων εκπομπών και μεγάλης αβεβαιότητας για τις τιμές φυσικού αερίου η παραγόμενη ενέργεια από μονάδες αερίων καυσίμων μειώνεται με έντονο βαθμό μεσοπρόθεσμα λόγω της μεγάλης αβεβαιότητας για το κόστος του φυσικού αερίου (Γράφημα 15). Επιπλέον, αυξάνεται ελαφρώς η παραγόμενη ενέργεια από μονάδες στερεών καυσίμων (Γράφημα 14) και

αυξάνεται με έντονο ρυθμό η ενέργεια από μονάδες ΑΠΕ λόγω της αύξησης της τιμής αγοράς των δικαιωμάτων εκπομπών. Η εγκατεστημένη ισχύς των μονάδων αερίων καυσίμων δεν παρουσιάζει μεγάλη μείωση, ενώ η εγκατεστημένη ισχύς των μονάδων ΑΠΕ και των αντλησιοταμιευτικών μονάδων αυξάνεται διαχρονικά. Η αύξηση αυτή ωστόσο περιορίζεται από τις περιορισμένες δυνατότητες επέκτασης των αντλησιοταμιευτικών μονάδων.



Γράφημα 15: Παραγόμενη ενέργεια σε GWh από σταθμούς αερίων καυσίμων όπως προέκυψε από την επίλυση του υποδείγματος με χρήση της προσέγγισης του Markowitz για την αγορά που αναπαριστά τον ηλεκτρικό τομέα της Ελλάδας

Στο σενάριο μεγάλης αβεβαιότητας για τις τιμές άνθρακα, φυσικού αερίου και δικαιωμάτων εκπομπών, λόγω της μεγάλης αβεβαιότητας για το κόστος αγοράς των αερίων και στερεών καυσίμων η παραγόμενη ενέργεια από σταθμούς αερίων και στερεών καυσίμων μειώνεται στο μεσοπρόθεσμο διάστημα (Γράφημα 15, Γράφημα 14). Στο μακροπρόθεσμο ορίζοντα η παραγόμενη ενέργεια από σταθμούς στερεών καυσίμων

μειώνεται περεταίρω λόγω της διαχρονικής αύξησης του κόστους αγοράς δικαιωμάτων εκπομπών, ενώ η παραγόμενη ενέργεια από σταθμούς αερίων καυσίμων αυξάνεται ώστε να καλύπτονται οι απαιτήσεις του συστήματος σε άνοδο του φορτίου (Γράφημα 15, Γράφημα 14). Το κενό που δημιουργείται λόγω της μείωσης της παραγωγής από σταθμούς στερεών και αερίων καυσίμων καλύπτεται από μονάδες ΑΠΕ, η ενέργεια των οποίων τόσο μεσοπρόθεσμα όσο και μακροπρόθεσμα αυξάνεται.

#### 13.2.2.2.1 Υπόδειγμα εφαρμογής της προσέγγισης του Markowitz σε αγορά υπό καθεστώς ατελούς ανταγωνισμού

Επιλύοντας το υπόδειγμα στο οποίο εφαρμόζουμε την προσέγγιση του Markowitz και το οποίο αναπαριστά αγορά που λειτουργεί υπό καθεστώς ατελούς ανταγωνισμού προκύπτουν τα ακόλουθα αποτελέσματα.

Στο υπόδειγμα αυτό η επιχείρηση αποστρέφεται τον κίνδυνο επιδιώκοντας να βελτιστοποιήσει την αντικειμενική συνάρτησή της. Στο σενάριο χαμηλής αβεβαιότητας για τις τιμές άνθρακα, φυσικού αερίου και υψηλής αβεβαιότητας για τις τιμές αγοράς δικαιωμάτων εκπομπών και για λειτουργία στην αγορά υπό καθεστώς ατελούς ανταγωνισμού, η επιχείρηση επιλέγει να επενδύσει σε μονάδες μεγαλύτερης έντασης κεφαλαίου και μικρότερου μέσου κόστους σε αντιδιαστολή με μονάδες μικρής εντάσεως κεφαλαίου αλλά μεγάλου μέσου κόστους, δεδομένης της μείωσης της αβεβαιότητας ως προς την ανάκτηση του κεφαλαίου της, όπως έχει αναλυθεί στο κεφάλαιο 9.7. Για τον λόγο αυτό, η ισχύς των επενδύσεων σε μονάδες αεριοστρόβιλων μειώνεται, ενώ αυξάνεται η ισχύς των επενδύσεων σε μονάδες συνδυασμένου κύκλου συγκριτικά με την κατάσταση στην οποία η επιχείρηση λειτουργεί στην αγορά υπό καθεστώς τέλειου ανταγωνισμού. Ως αποτέλεσμα η παραγόμενη ενέργεια από μονάδες συνδυασμένου κύκλου αυξάνεται και η παραγόμενη ενέργεια από μονάδες αεριοστρόβιλων μειώνεται τόσο μεσοπρόθεσμα όσο και μακροπρόθεσμα συγκριτικά με την αντίστοιχη παραγόμενη ενέργεια στο ίδιο σενάριο όταν η εταιρία λειτουργεί υπό καθεστώς τέλειου ανταγωνισμού (Πίνακας 13-2).



Πίνακας 13-2: Παραγόμενη ενέργεια σε TWh ανά τύπο σταθμού όπως προέκυψε από την επίλυση του υποδείγματος με χρήση της προσέγγισης του Markowitz στο σενάριο χαμηλής αβεβαιότητας για τις τιμές άνθρακα, φυσικού αερίου και υψηλής αβεβαιότητας για τις τιμές αγοράς δικαιωμάτων εκπομπών για την αγορά που αναπαριστά τον ηλεκτρικό τομέα της Ελλάδας στον οποίο δραστηριοποιείται επιχείρηση υπό καθεστώς ατελούς ανταγωνισμού

Μονάδες	2020	2030	2050
ΑΠΕ	18,4	21,9	41,5
Αερίων καυσίμων	15,3	17,1	14,5
Στερεών καυσίμων	17,6	12,3	0
Αεριοστρόβιλοι	4,4	1,8	0,05

### 13.2.2.3 Υπόδειγμα αξίας σε κίνδυνο

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται οι επενδυτικές αποφάσεις που λαμβάνει επιχείρηση που λειτουργεί σε αγορά υπό καθεστώς τέλει ανταγωνισμού όταν η συμπεριφορά της ως προς τον κίνδυνο προσομοιώνεται από το υπόδειγμα αξιολόγησης του κινδύνου με χρήση της Αξίας σε Κίνδυνο («υπόδειγμα αξίας σε κίνδυνο»). Στο σενάριο χαμηλής αβεβαιότητας για τις τιμές άνθρακα, φυσικού αερίου και δικαιωμάτων εκπομπών, η εγκατεστημένη ισχύς των σταθμών στερεών και αερίων καυσίμων καθώς και των μονάδων ΑΠΕ διαχρονικά δεν παρουσιάζει μεγάλες διαφοροποιήσεις συγκριτικά με τα άλλα υποδείγματα στο ίδιο σενάριο.

Στο σενάριο χαμηλής αβεβαιότητας για τις τιμές άνθρακα και μεγάλης αβεβαιότητας για τις τιμές φυσικού αερίου και δικαιωμάτων εκπομπών η εγκατεστημένη ισχύς των μονάδων αερίων καυσίμων μειώνεται μεσοπρόθεσμα λόγω της μεγάλης αβεβαιότητας τόσο ως προς το κόστος αγοράς των καυσίμων όσο και ως προς το κόστος αγοράς των δικαιωμάτων εκπομπών (Πίνακας 13-3). Λόγω της αβεβαιότητας της τιμής αγοράς των δικαιωμάτων εκπομπών η εγκατεστημένη ισχύς των μονάδων στερεών καυσίμων μειώνεται διαχρονικά. Η ισχύς των σταθμών αερίων καυσίμων σε μακροχρόνιο ορίζοντα αυξάνεται ώστε η παραγόμενη ενέργειά της να μπορεί να καλύψει τις απαιτήσεις του συστήματος σε άνοδο του φορτίου. Η εγκατεστημένη ισχύς των μονάδων ΑΠΕ και κατ'επέκταση η παραγόμενη ενέργεια των μονάδων αυτών αυξάνεται μακροχρόνια ώστε να αντισταθμίσει την μείωση της παραγόμενης ενέργειας από σταθμούς στερεών και αερίων καυσίμων (Πίνακας 13-3).

Πίνακας 13-3: Εγκατεστημένη ισχύς (σε GW) ανά τύπο σταθμού όπως προέκυψε από την επίλυση του υποδείγματος αξίας σε κίνδυνο στο σενάριο χαμηλής αβεβαιότητας για τις τιμές άνθρακα και μεγάλης αβεβαιότητας για τις τιμές φυσικού αερίου και δικαιωμάτων εκπομπών για την αγορά που αναπαριστά τον ηλεκτρικό τομέα της Ελλάδας

Μονάδες	2020	2030	2050
<b>ΑΠΕ</b>	10,4	14,2	18,6
<b>Αερίων καυσίμων</b>	6,8	5,5	6,2
<b>Στερεών καυσίμων</b>	2,8	2,6	0,6

#### 13.2.2.4 Υπόδειγμα αξιολόγησης με τη μέθοδο των δικαιωμάτων προαίρεσης

Η παραγόμενη ενέργεια, όπως προέκυψε από την επίλυση του υποδείγματος αξιολόγησης των επενδύσεων με τη μέθοδο των δικαιωμάτων προαίρεσης, διαφοροποιείται από την αντίστοιχη που προέκυψε από την επίλυση των προαναφερθέντων υποδειγμάτων σε όλα τα σενάρια μοντελοποίησης της αβεβαιότητας. Στο υπόδειγμα αυτό, κάθε μία επένδυση αξιολογείται μεμονωμένα. Στο σενάριο χαμηλής αβεβαιότητας για τις τιμές άνθρακα, φυσικού αερίου και δικαιωμάτων εκπομπών η παραγόμενη ενέργεια των σταθμών στερεών καυσίμων μεσοπρόθεσμα μειώνεται ελαφρώς λόγω της αύξησης της τιμής αγοράς δικαιωμάτων εκπομπών (Πίνακας 13-4). Μακροπρόθεσμα η παραγόμενη ενέργεια των μονάδων στερεών καυσίμων είναι μηδενική διότι οι μονάδες αυτές αντιμετωπίζουν μεγάλη αβεβαιότητα ως προς το κόστος λειτουργίας τους, ενώ η παραγόμενη ενέργεια των μονάδων αερίων καυσίμων μειώνεται ελαφρώς, ωστόσο η μείωση αυτή περιορίζεται διότι απαιτούμε να καλύπτονται οι περιορισμοί κυκλικής λειτουργίας ηλεκτροπαραγωγικών μονάδων και συνολικής εφεδρείας του συστήματος (Πίνακας 13-4). Τόσο μεσοπρόθεσμα όσο και μακροπρόθεσμα η παραγόμενη ενέργεια από μονάδες ΑΠΕ αυξάνεται με έντονο ρυθμό (Πίνακας 13-4), όπως επίσης αυξάνεται και η ενέργεια που εγχέεται στο σύστημα από αντλησιοταμιευτικούς σταθμούς λόγω της διαχρονικής αύξησης της τιμής αγοράς των δικαιωμάτων εκπομπών.

Πίνακας 13-4: Παραγόμενη ενέργεια (σε TWh) ανά τύπο σταθμού όπως προέκυψε από την επίλυση του υποδείγματος αξιολόγησης των επενδύσεων με τη μέθοδο των δικαιωμάτων προαίρεσης στο σενάριο χαμηλής αβεβαιότητας για τις τιμές άνθρακα, φυσικού αερίου και δικαιωμάτων εκπομπών για την αγορά που αναπαριστά τον ηλεκτρικό τομέα της Ελλάδας

Μονάδες	2020	2030	2050
ΑΠΕ	18,4	28,9	43,1
Αερίων καυσίμων	15,3	10,5	12,0
Στερεών καυσίμων	17,6	12,1	0,0
Αντλησιοταμίευσης	0,03	0,5	2,1

#### 13.2.2.4.1 Υπόδειγμα αξιολόγησης με τη μέθοδο των δικαιωμάτων προαίρεσης σε αγορά υπό καθεστώς ατελούς ανταγωνισμού

Στην υποενότητα αυτή παρουσιάζονται τα αποτελέσματα τόσο σε ενεργειακό επίπεδο όσο και σε επίπεδο εγκατεστημένης ισχύος από την επίλυση του υποδείγματος αξιολόγησης των επενδύσεων με τη μέθοδο των δικαιωμάτων προαίρεσης σε αγορά υπό καθεστώς ατελούς ανταγωνισμού.

Δεδομένης της μείωσης της μεταβλητότητας της οριακής τιμής συστήματος και της μείωσης της αβεβαιότητας ως προς την ζητούμενη ενέργεια κάθε σταθμού σε αγορά υπό καθεστώς ατελούς ανταγωνισμού όπως έχει αναλυθεί στο κεφάλαιο 11.5, δημιουργούνται οι συνθήκες ώστε η επιχείρηση να επιλέξει να επενδύσει σε μονάδες μεγαλύτερης έντασης κεφαλαίου και μικρότερου μέσου κόστους και να μειώσει τις επενδύσεις σε μονάδες οι οποίες έχουν μικρότερη ένταση κεφαλαίου αλλά μεγαλύτερο μέσο κόστος λειτουργίας. Για τον λόγο αυτό, οι επενδύσεις σε μονάδες συνδυασμένου κύκλου στο σενάριο χαμηλής αβεβαιότητας για τις τιμές άνθρακα και μεγάλης αβεβαιότητας για τις τιμές φυσικού αερίου και δικαιωμάτων εκπομπών αυξάνονται συγκριτικά με τις επενδύσεις σε μονάδες συνδυασμένου κύκλου της επιχείρησης όταν λειτουργεί υπό καθεστώς τέλειου ανταγωνισμού. Για τον ίδιο λόγο, οι επενδύσεις σε μονάδες αεριοστρόβιλων είναι μικρότερες στο σενάριο αυτό συγκριτικά με τις αντίστοιχες επενδύσεις που πραγματοποιεί η επιχείρηση υπό καθεστώς τέλειου ανταγωνισμού.

Επιπλέον, οι επιχειρήσεις που λειτουργούν σε αγορά υπό καθεστώς ατελούς ανταγωνισμού έχουν τη δυνατότητα να επηρεάσουν την τιμή του ηλεκτρισμού, όπως αναλύθηκε στο κεφάλαιο 4.4. Για τον λόγο αυτό, η συνολική ζητούμενη ενέργεια μειώνεται. Στον ακόλουθο πίνακα (Πίνακας 13-5) παρουσιάζεται η διαχρονική μεταβολή

της ζητούμενης ενέργειας όπως προέκυψε από την επίλυση του αιτιοκρατικού υποδείγματος της αγοράς υπό καθεστώς τέλειου ανταγωνισμού και από την επίλυση του αιτιοκρατικού υποδείγματος της αγοράς υπό καθεστώς ατελούς ανταγωνισμού. Για λόγους εποπτείας, παρουσιάζονται οι τιμές ως ποσοστό της ζητούμενης ενέργειας του έτους 2020 όπως προέκυψε από την επίλυση του υποδείγματος αξιολόγησης με τη μέθοδο των δικαιωμάτων προαίρεσης σε αγορά υπό καθεστώς τέλειου ανταγωνισμού.

Πίνακας 13-5: Ζητούμενη ενέργεια του υποδείγματος αξιολόγησης με τη μέθοδο των δικαιωμάτων προαίρεσης ανάλογα την κατάσταση της αγοράς θεωρώντας ως μέτρο σύγκρισης την ζητούμενη ενέργεια του έτους 2020 όπως προέκυψε από την επίλυση του υποδείγματος αξιολόγησης με τη μέθοδο των δικαιωμάτων προαίρεσης σε αγορά υπό καθεστώς τέλειου ανταγωνισμού

	<b>2020</b>	<b>2030</b>	<b>2050</b>
<b>Τέλειος ανταγωνισμός</b>	100%	98%	106%
<b>Ατελής ανταγωνισμός</b>	99%	96%	101%

### 13.2.3 Σενάριο πολύ μεγάλης αβεβαιότητας

Στην υποενότητα αυτή θεωρείται πολύ μεγάλη αβεβαιότητα ως προς την μελλοντική εξέλιξη των τιμών των πιθανοτικών μεγεθών. Για κάθε μέθοδο αξιολόγησης της αβεβαιότητας θα συγκριθούν τα αποτελέσματα αυτού του σεναρίου με το σενάριο μεγάλης αβεβαιότητας όπως παρουσιάστηκε στην υποενότητα 13.2.2.

#### 13.2.3.1 Υπόδειγμα με αντικειμενική συνάρτηση την μεγιστοποίηση πιθανότητας αποφυγής ζημίας

Στο υπόδειγμα με αντικειμενική συνάρτηση την μεγιστοποίηση πιθανότητας αποφυγής ζημίας η επιχείρηση εκδηλώνει την αποστροφή προς τον κίνδυνο αποφεύγοντας τις επιλογές εκείνες με αβέβαιη εξέλιξη στο μέλλον. Επιπλέον, η επιχείρηση αδιαφορεί ως προς το μέγεθος του κέρδους – οφέλους από τις επιλογές που θα λάβει και επιδιώκει αυτές να είναι κατά το δυνατόν πιο σίγουρες. Για τον λόγο αυτό η επιχείρηση επιλέγει μονάδες μικρής εντάσεως κεφαλαίου και μεγαλύτερου μέσου κόστους έναντι μονάδων μεγαλύτερου κεφαλαιουχικού κόστους και μικρότερου μέσου κόστους. Συνεπώς, η

εγκατεστημένη ισχύς των μονάδων στερεών καυσίμων καθώς και η εγκατεστημένη ισχύς των μονάδων συνδυασμένου κύκλου μειώνεται. Επιπλέον, αυξάνεται η ισχύς επένδυσης για επέκταση – ανακαίνιση ήδη εγκατεστημένων μονάδων (Πίνακας 13-6) συγκριτικά με την ισχύ όπως είχε προκύψει στο σενάριο μεγάλης αβεβαιότητας το οποίο παρουσιάστηκε στην υποενότητα 13.2.2.

Πίνακας 13-6: Διαχρονική ισχύς επενδύσεων επέκτασης – ανακαίνισης ήδη εγκατεστημένων μονάδων (σε GW) όπως προέκυψε από την επίλυση του υποδείγματος μεγιστοποίησης της πιθανότητας αποφυγής ζημίας στο σενάριο μεγάλης αβεβαιότητας όπως παρουσιάστηκε στην υποενότητα 13.2.2 και πολύ μεγάλης αβεβαιότητας για την αγορά που αναπαριστά τον ηλεκτρικό τομέα της Ελλάδας

Μονάδες	Σενάριο μεγάλης αβεβαιότητας υποενότητας 13.2.2	Σενάριο πολύ μεγάλης αβεβαιότητας
ΑΠΕ	0,20	0,28
Αερίων καυσίμων	0,02	0,83
Στερεών καυσίμων	1,14	2,17

### 13.2.3.2 Υπόδειγμα εφαρμογής της προσέγγισης του Markowitz

Στο υπόδειγμα στο οποίο εφαρμόζεται η προσέγγιση του Markowitz η επιχείρηση εκδηλώνει την αποστροφή προς τον κίνδυνο αποφεύγοντας τις επιλογές εκείνες με αβέβαιη εξέλιξη στο μέλλον επιδιώκοντας παράλληλα μεγιστοποίηση του κέρδους – οφέλους της. Η εγκατεστημένη ισχύς των μονάδων στερεών καυσίμων και των μονάδων συνδυασμένου κύκλου μειώνεται λόγω της μεγάλης αβεβαιότητας ως προς το κόστος τους. Επιπλέον, λόγω της πολύ μεγάλης αβεβαιότητας ως προς την ανάκτηση του κεφαλαιουχικού κόστους η επιχείρηση δεν επενδύσει σε εγκατάσταση νέων μονάδων, αλλά αυξάνει την ισχύ επένδυσης για επέκταση – ανακαίνιση ήδη εγκατεστημένων μονάδων (Πίνακας 13-7) συγκριτικά με την ισχύ όπως είχε προκύψει στο σενάριο μεγάλης αβεβαιότητας όπως παρουσιάστηκε στην υποενότητα 13.2.2

Πίνακας 13-7: Διαχρονική ισχύς επενδύσεων επέκτασης – ανακαίνισης ήδη εγκατεστημένων μονάδων (σε GW) όπως προέκυψε από την επίλυση του υποδείγματος με χρήση της προσέγγισης του Markowitz στο σενάριο μεγάλης αβεβαιότητας όπως παρουσιάστηκε στην υποενότητα 13.2.2 και πολύ μεγάλης αβεβαιότητας για την αγορά που αναπαριστά τον ηλεκτρικό τομέα της Ελλάδας

Μονάδες	Σενάριο μεγάλης αβεβαιότητας υποενότητας 13.2.2	Σενάριο πολύ μεγάλης αβεβαιότητας
ΑΠΕ	0,20	0,24
Αερίων καυσίμων	0	0,57
Στερεών καυσίμων	1,12	1,36

### 13.2.3.3 Υπόδειγμα αξιολόγησης με τη μέθοδο των δικαιωμάτων προαίρεσης

Στο υπόδειγμα αξιολόγησης των επενδύσεων με τη μέθοδο των δικαιωμάτων προαίρεσης η επιχείρηση αξιολογεί κάθε μία επένδυση ξεχωριστά και αποφασίζει για την πραγματοποίηση της επένδυσης. Η εγκατεστημένη ισχύς των μονάδων στερεών καυσίμων καθώς και η εγκατεστημένη ισχύς των μονάδων συνδυασμένου κύκλου μειώνεται διαχρονικά λόγω της μεγάλης αβεβαιότητας. Απεναντίας αυξάνεται η ισχύς επένδυσης για κατασκευή αεριοστρόβιλων (Πίνακας 13-9) και για επέκταση ήδη εγκατεστημένων μονάδων (Πίνακας 13-8) συγκριτικά με την ισχύ όπως είχε προκύψει στο σενάριο μεγάλης αβεβαιότητας όπως παρουσιάστηκε στην υποενότητα 13.2.2.

Πίνακας 13-8: Διαχρονική ισχύς επενδύσεων επέκτασης – ανακαίνισης ήδη εγκατεστημένων μονάδων (σε GW) όπως προέκυψε από την επίλυση του υποδείγματος δικαιωμάτων προαίρεσης στο σενάριο μεγάλης αβεβαιότητας που παρουσιάστηκε στην υποενότητα 13.2.2 και πολύ μεγάλης αβεβαιότητας για την αγορά που αναπαριστά τον ηλεκτρικό τομέα της Ελλάδας

Μονάδες	Σενάριο μεγάλης αβεβαιότητας υποενότητας 13.2.2	Σενάριο πολύ μεγάλης αβεβαιότητας
ΑΠΕ	0,10	0
Αερίων καυσίμων	0,03	0,04
Στερεών καυσίμων	0,56	1,14
Αεριοστρόβιλοι	0,03	0,04

Πίνακας 13-9: Εγκατεστημένη ισχύς αεριοστρόβιλων (σε GW) όπως προέκυψε από την επίλυση του υποδείγματος δικαιωμάτων προαίρεσης στο σενάριο μεγάλης αβεβαιότητας που παρουσιάστηκε στην υποενότητα 13.2.2 και πολύ μεγάλης αβεβαιότητας για την αγορά που αναπαριστά τον ηλεκτρικό τομέα της Ελλάδας

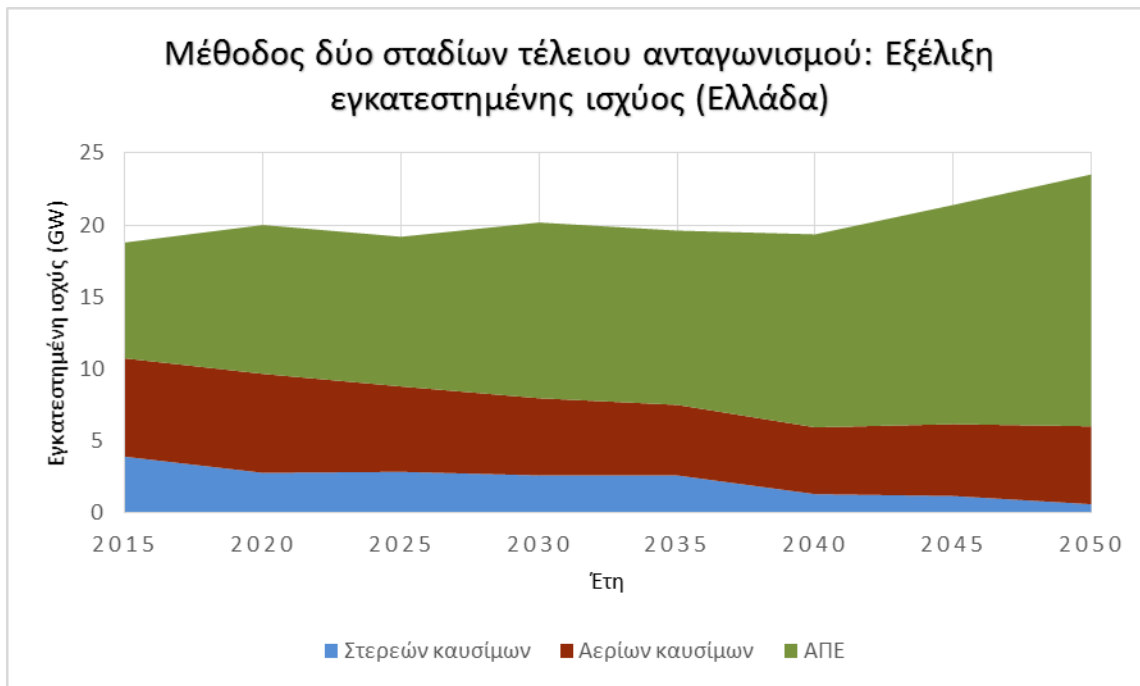
Σενάριο	2025	2030	2035	2040	2045	2050
<b>Μεγάλης αβεβαιότητας υποενότητας 13.2.2</b>	1,02	0,76	0,7	1,2	3,83	5,39
<b>Πολύ μεγάλης αβεβαιότητας</b>	0,98	1,59	7,02	7,1	7,1	6,83

### 13.2.4 Υπόδειγμα δύο σταδίων

Στο υπόδειγμα δύο σταδίων στο μεσοπρόθεσμο διάστημα η αβεβαιότητα ως προς την εξέλιξη των πιθανοτικών μεγεθών είναι μεγάλη ωστόσο στο μακροχρόνιο διάστημα θεωρείται ότι μέρος της αβεβαιότητας θα έχει αρθεί. Συνεπώς, ο αποφασίζων καθυστερεί τις αποφάσεις για τις επενδύσεις. Για τον λόγο αυτό στο μεσοπρόθεσμο διάστημα η εγκατεστημένη ισχύς των μονάδων στερεών και αερίων καυσίμων ως προκύπτει από την επίλυση του υποδείγματος δύο σταδίων είναι μικρότερη συγκριτικά με την ισχύ των άλλων υποδειγμάτων στο σενάριο πολύ μεγάλης αβεβαιότητας. Λόγω της μεγάλης αβεβαιότητας μεσοπρόθεσμα η επιχείρηση δεν επενδύει σε κατασκευή νέων μονάδων αλλά αυξάνει τις επενδύσεις επέκτασης – ανακαίνισης ήδη υπαρχόντων σταθμών, όπως παρουσιάζεται στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 13-10). Επιπλέον, αξιοποιεί τις ήδη υπάρχουσες μονάδες, αυξάνοντας τον βαθμό χρησιμοποίησής τους.

Πίνακας 13-10: Διαχρονική ισχύς επενδύσεων επέκτασης – ανακαίνισης ήδη εγκατεστημένων μονάδων όπως προέκυψε από την επίλυση του υποδείγματος δύο σταδίων και των υπολοίπων υποδειγμάτων στο σενάριο πολύ μεγάλης αβεβαιότητας για την αγορά που αναπαριστά τον ηλεκτρικό τομέα της Ελλάδας όπως παρουσιάστηκαν στην ενότητα 13.2.3 (σε GW)

Μονάδες	Μεγιστοποίηση πιθανότητας αποφυγής ζημίας	Προσέγγιση Markowitz	Δικαιώματα προαίρεσης	Δύο σταδίων
ΑΠΕ	0,28	0,24	0	0,27
Αερίων καυσίμων	0,83	0,57	0,04	0,75
Στερεών καυσίμων	2,17	1,36	1,14	2,23
Αεριοστρόβιλοι	0	0	0,04	0,19



Γράφημα 16: Εγκατεστημένη ισχύς σε GW ανά κατηγορίες σταθμών ηλεκτροπαραγωγής όπως προέκυψε από την επίλυση του υποδείγματος δύο σταδίων για την αγορά που αναπαριστά τον ηλεκτρικό τομέα της Ελλάδας

### 13.3 Αποτελέσματα επίλυσης υποδείγματος που αναπαριστά τον ηλεκτρικό τομέα της Πολωνίας

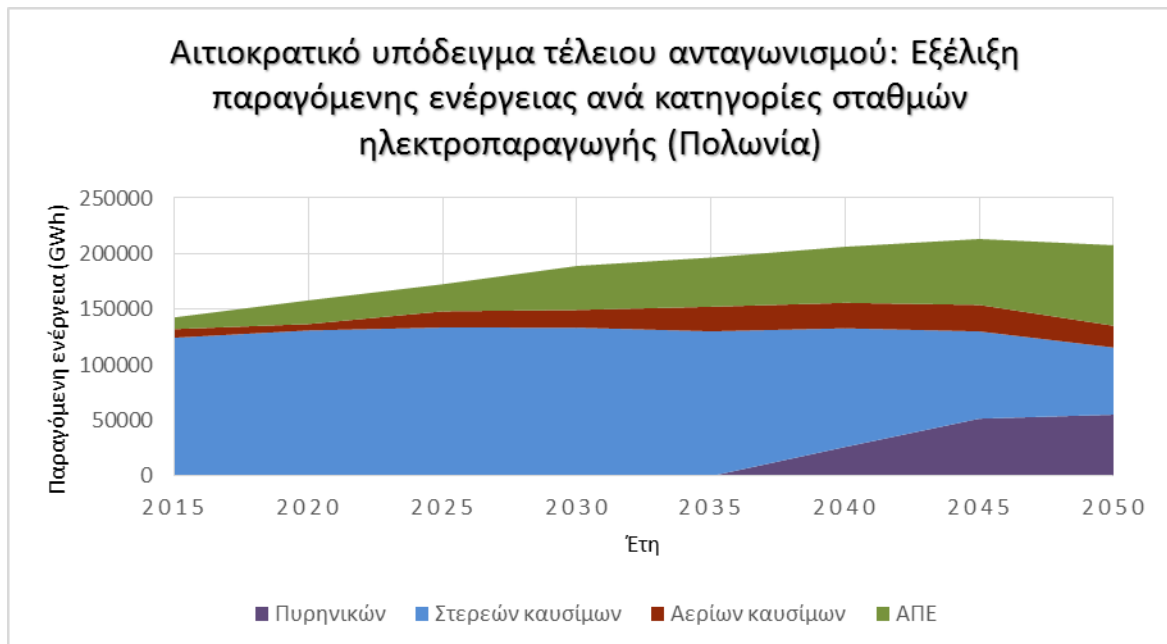
#### 13.3.1 Αιτιοκρατικό υπόδειγμα

Η παραγόμενη ενέργεια ανά τύπο σταθμού όπως προέκυψε από την επίλυση του αιτιοκρατικού υποδείγματος προσομοίωσης του ηλεκτρικού τομέα της Πολωνίας παρουσιάζεται στο Γράφημα 17. Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας του ηλεκτρικού τομέα της Πολωνίας στηρίζεται κυρίως σε σταθμούς στερεών καυσίμων και συγκεκριμένα σε σταθμούς άνθρακα. Σε μικρότερο βαθμό η παραγωγή προέρχεται από μονάδες αερίων καυσίμων και αιολικές. Μεσοπρόθεσμα η παραγωγή από μονάδες στερεών καυσίμων μειώνεται με έντονο ρυθμό λόγω της αύξησης του κόστους των δικαιωμάτων εκπομπών CO<sub>2</sub> και αυξάνεται η παραγωγή από αιολικές μονάδες. Λόγω της απαίτησης να καλύπτονται οι περιορισμοί κυκλικής λειτουργίας

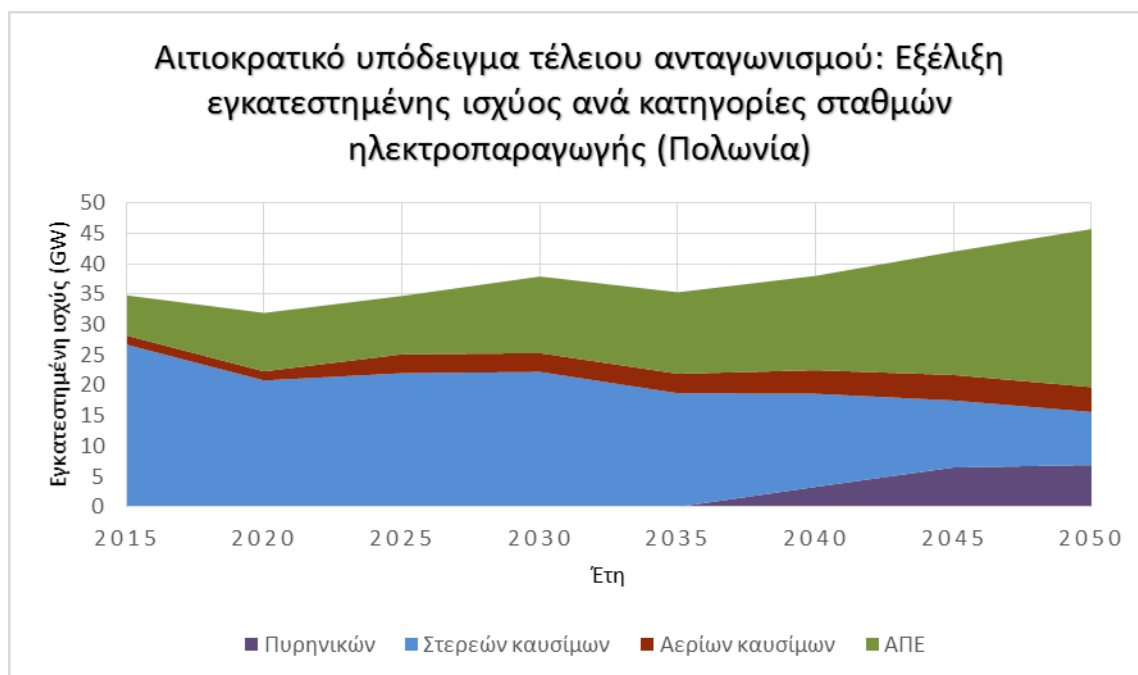


ηλεκτροπαραγωγικών μονάδων και συνολικής εφεδρείας του συστήματος, η παραγωγή από μονάδες αερίων καυσίμων αυξάνεται ελαφρώς διαχρονικά.

Αντίστοιχα είναι τα αποτελέσματα ως προς την εγκατεστημένη ισχύ των μονάδων ηλεκτροπαραγωγής (Γράφημα 18). Μεσοπρόθεσμα η εγκατεστημένη ισχύς των σταθμών στερεών καυσίμων είναι μεγάλη, σε μακροπρόθεσμο όμως ορίζοντα μειώνεται λόγω της αύξησης του κόστους για αγορά δικαιωμάτων εκπομπών. Μεσοπρόθεσμα η εγκατεστημένη ισχύς των μονάδων αερίων καυσίμων καθώς και των μονάδων ΑΠΕ είναι μικρή και αυξάνεται, η πρώτη με μικρότερο και η δεύτερη με εντονότερο ρυθμό. Επιπλέον μεσοπρόθεσμα δεν υπάρχουν εγκατεστημένοι πυρηνικοί σταθμοί, ωστόσο κατασκευάζονται μακροπρόθεσμα.



Γράφημα 17: Παραγόμενη ενέργεια σε GWh ανά κατηγορίες σταθμών ηλεκτροπαραγωγής όπως προέκυψε από την επίλυση του αιτιοκρατικού υποδείγματος αγοράς που αναπαριστά τον ηλεκτρικό τομέα της Πολωνίας στον οποίο δραστηριοποιείται επιχείρηση υπό καθεστώς τέλει ανταγωνισμού

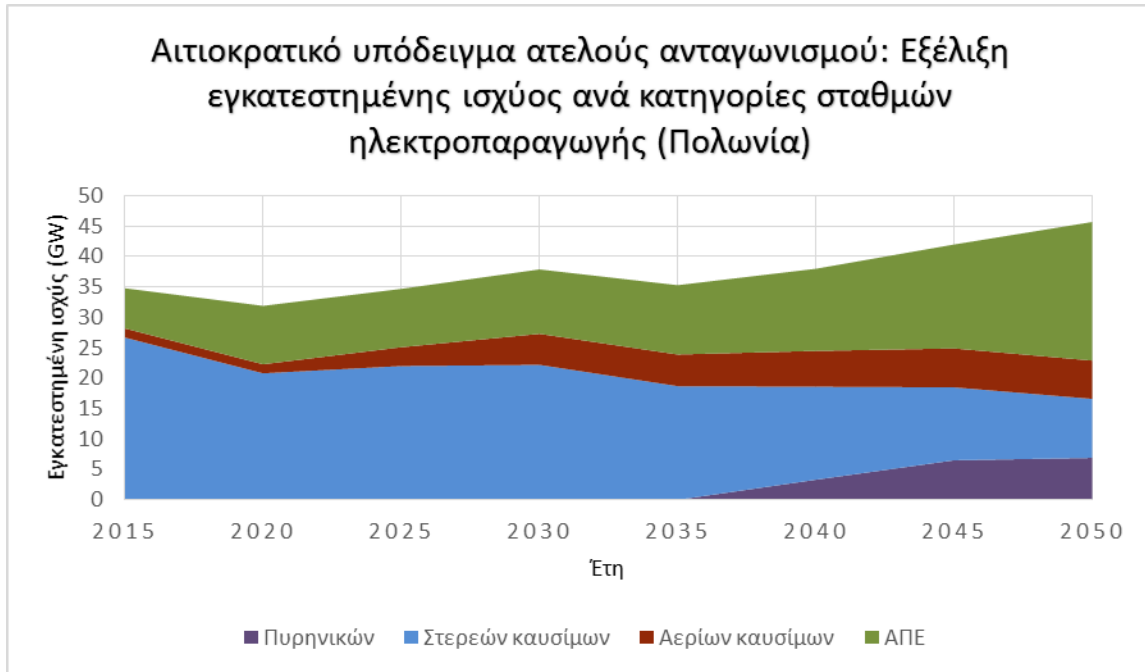


Γράφημα 18: Εγκατεστημένη ισχύς σε GW ανά κατηγορίες σταθμών ηλεκτροπαραγωγής όπως προέκυψε από την επίλυση του αιτιοκρατικού υποδείγματος αγοράς που αναπαριστά τον ηλεκτρικό τομέα της Πολωνίας στον οποίο δραστηριοποιείται επιχείρηση υπό καθεστώς τέλει ανταγωνισμού

### 13.3.1.1 Αιτιοκρατικό υπόδειγμα προσομοίωσης αγοράς υπό καθεστώς ατελούς ανταγωνισμού

Στην υποενότητα αυτή παρουσιάζονται οι επενδυτικές αποφάσεις επιχείρησης όπως προκύπτουν από την επίλυση του αιτιοκρατικού υποδείγματος αγοράς που αναπαριστά τον ηλεκτρικό τομέα της Πολωνίας. Η επιχείρηση δραστηριοποιείται στην αγορά υπό καθεστώς ατελούς ανταγωνισμού. Η εγκατεστημένη ισχύς των μονάδων στερεών καυσίμων λόγω της αύξησης της τιμής αγοράς δικαιωμάτων εκπομπών μειώνεται μεσοπρόθεσμα με μικρό ρυθμό, ενώ μακροπρόθεσμα μειώνεται με μεγαλύτερο ρυθμό (Γράφημα 19). Η εγκατεστημένη ισχύς των σταθμών συνδυασμένου κύκλου αυξάνεται ελαφρώς μεσοπρόθεσμα. Λόγω της μείωσης της αβεβαιότητας για την ανάκτηση του κεφαλαίου της επένδυσης σε αγορά υπό καθεστώς ατελούς ανταγωνισμού όπως αναλύθηκε στο κεφάλαιο 4.4, η αύξηση της ισχύος των μονάδων συνδυασμένου κύκλου είναι μεγαλύτερη μακροπρόθεσμα και συγκεκριμένα πιο μεγάλη από την αντίστοιχη της επίλυσης του υποδείγματος αναπαράστασης της αγοράς υπό καθεστώς τέλει ανταγωνισμού (Γράφημα 19). Η εγκατεστημένη ισχύς των μονάδων ΑΠΕ αυξάνεται διαχρονικά λόγω της αύξησης της τιμής αγοράς δικαιωμάτων εκπομπών (Γράφημα 19).

Μεσοπρόθεσμα δεν υπάρχουν ήδη εγκατεστημένοι πυρηνικοί σταθμοί, μακροπρόθεσμα ωστόσο κατασκευάζονται (Γράφημα 19).



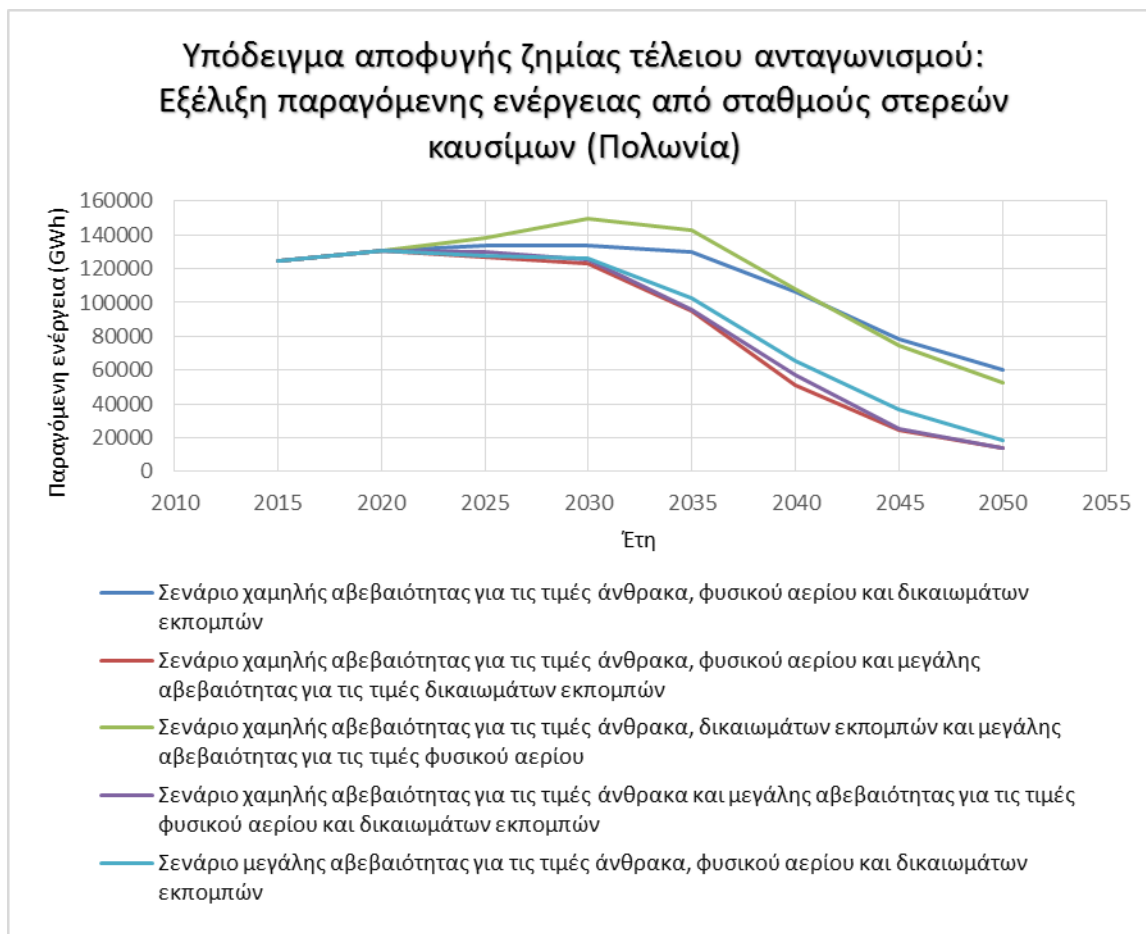
Γράφημα 19: Εγκατεστημένη ισχύς σε GW ανά κατηγορίες σταθμών ηλεκτροπαραγωγής όπως προέκυψε από την επίλυση του αιτιοκρατικού υποδείγματος αγοράς που αναπαριστά τον ηλεκτρικό τομέα της Πολωνίας στον οποίο δραστηριοποιείται επιχείρηση υπό καθεστώς ατελούς ανταγωνισμού

### 13.3.2 Σενάρια μοντελοποίησης της αβεβαιότητας

Στη συνέχεια αναλύονται τα αποτελέσματα της επίλυσης των υποδειγμάτων αξιολόγησης του κινδύνου με διάφορες μεθόδους όπως αναλύθηκαν στις προηγούμενες ενότητες στα διάφορα σενάρια εξέλιξης των τιμών των πιθανοτικών μεγεθών. Τα σενάρια αυτά περιλαμβάνουν μικρή ή μεγάλη αβεβαιότητα ως προς την εξέλιξη των τιμών του άνθρακα, του φυσικού αερίου και της τιμής αγοράς των δικαιωμάτων εκπομπών CO<sub>2</sub>.

### 13.3.2.1 Υπόδειγμα μεγιστοποίησης της πιθανότητας αποφυγής ζημίας

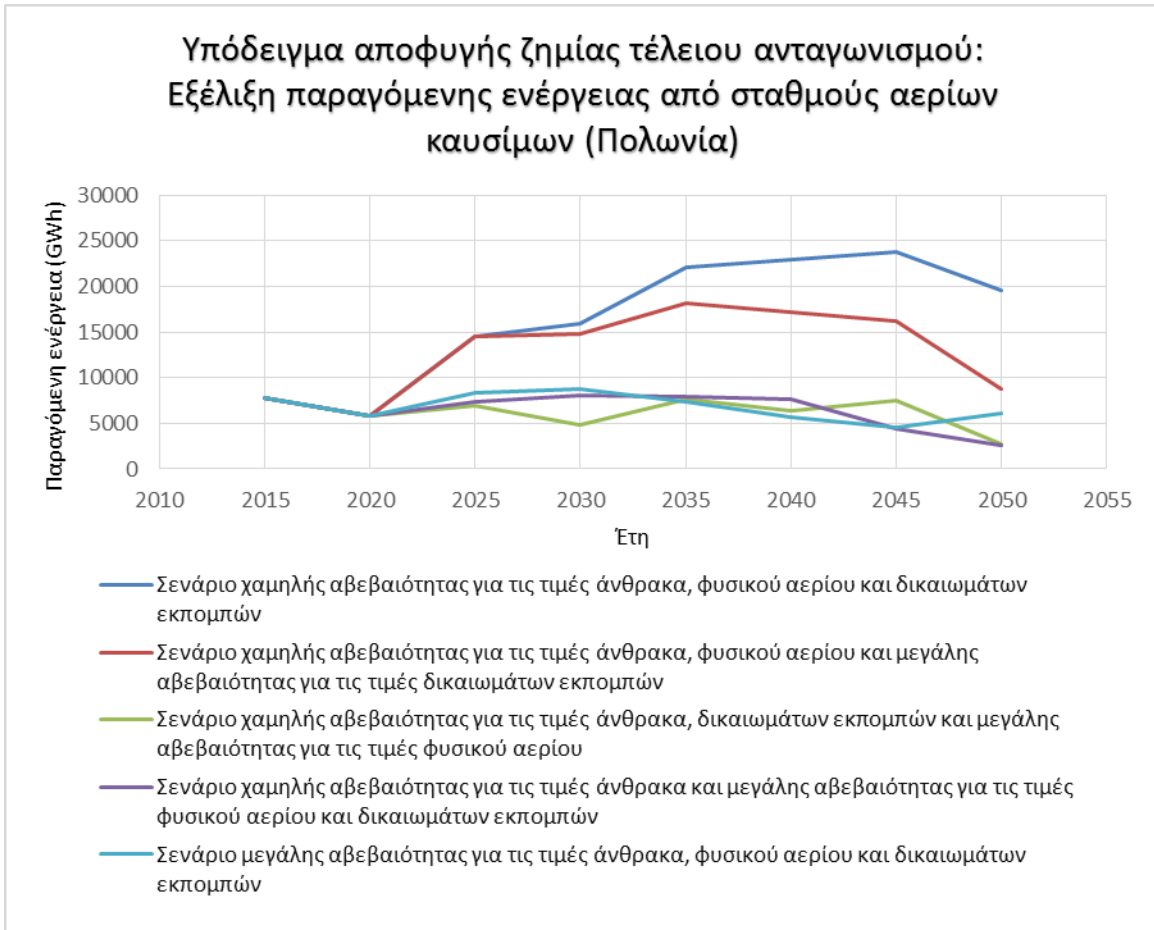
Στην υποενότητα αυτή παρουσιάζονται τα αποτελέσματα τόσο σε ενεργειακό επίπεδο όσο και σε επίπεδο εγκατεστημένης ισχύος από την επίλυση του υποδείγματος με αντικειμενική συνάρτηση την μεγιστοποίηση πιθανότητας αποφυγής ζημίας μιας



Γράφημα 20: Παραγόμενη ενέργεια σε GWh από σταθμούς στερεών καυσίμων όπως προέκυψε από την επίλυση του υποδείγματος μεγιστοποίησης της πιθανότητας αποφυγής ζημίας για την αγορά που αναπαριστά τον ηλεκτρικό τομέα της Πολωνίας στον οποίο δραστηριοποιείται επιχείρηση υπό καθεστώς τέλειου ανταγωνισμού

επιχείρησης που λειτουργεί στην αγορά της Πολωνίας υπό καθεστώς τέλειου ανταγωνισμού. Τα ενεργειακά αποτελέσματα στο σενάριο χαμηλής αβεβαιότητας για τις τιμές άνθρακα, φυσικού αερίου και δικαιωμάτων εκπομπών δεδομένου ότι η συνάρτηση χρησιμότητας που έχουμε υποθέσει για την προσομοίωση της συμπεριφοράς της επιχείρησης εμπίπτει στην κατηγορία IRRA ως προς την σχετική αποστροφή του κινδύνου

και CARA<sup>8</sup> ως προς την αποστροφή του κινδύνου σε ποσότητες, διαμορφώνονται ως εξής. Η παραγωγή από μονάδες στερεών καυσίμων μειώνεται αρκετά διαχρονικά λόγω της αύξησης της τιμής αγοράς δικαιωμάτων εκπομπών (Γράφημα 20). Επιπλέον, αυξάνεται η παραγόμενη ενέργεια από μονάδες CCS άνθρακα. Αντίστοιχα, η παραγωγή από μονάδες αερίων καυσίμων μειώνεται αλλά με μικρότερο ρυθμό (Γράφημα 21) ώστε να καλύπτονται οι απαιτήσεις του συστήματος στην άνοδο του φορτίου (εφεδρεία

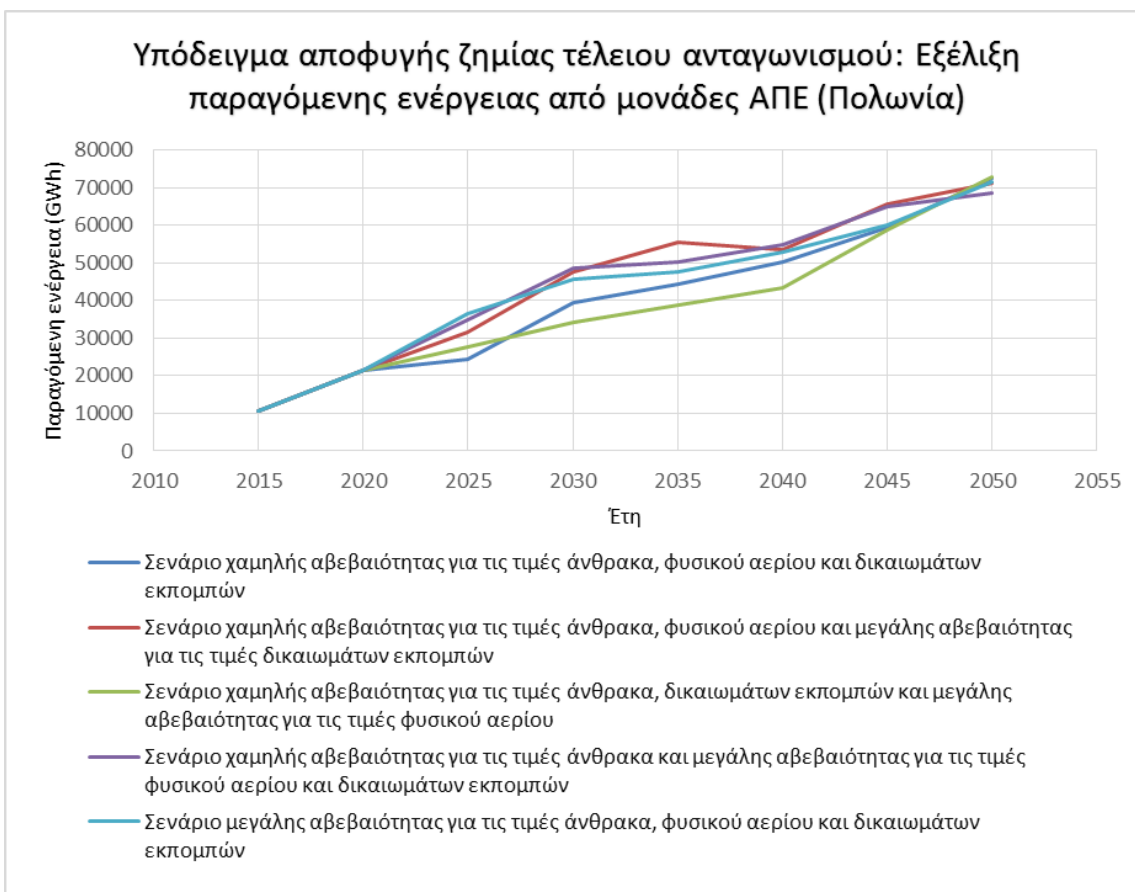


Γράφημα 21: Παραγόμενη ενέργεια σε GWh από σταθμούς αερίων καυσίμων όπως προέκυψε από την επίλυση του υποδείματος μεγιστοποίησης της πιθανότητας αποφυγής ζημίας για την αγορά που αναπαριστά τον ηλεκτρικό τομέα της Πολωνίας

συστήματος). Το κενό στην παραγωγή λόγω της μείωσης της παραγόμενης ενέργειας από σταθμούς στερεών καυσίμων παράγεται από μονάδες ΑΠΕ και πυρηνικές μονάδες (Γράφημα 22).

<sup>8</sup> IRRA-Increasing Relative Risk Aversion και CARA- Constant Absolute Risk Aversion, όπως αναλύθηκε στην υποενότητα 6.4

Στο σενάριο χαμηλής αβεβαιότητας για τις τιμές άνθρακα, δικαιωμάτων εκπομπών και μεγάλης αβεβαιότητας για τις τιμές φυσικού αερίου η παραγωγή από μονάδες αερίων καυσίμων μειώνεται ελαφρώς τόσο στο μεσοπρόθεσμο όσο και στο μακροπρόθεσμο διάστημα λόγω της μεγάλης αβεβαιότητας εξέλιξης της τιμής του φυσικού αερίου (Γράφημα 21). Η μείωση αυτή δεν είναι εντονότερη λόγω της απαίτησης να καλύπτονται οι περιορισμοί κυκλικής λειτουργίας των ηλεκτροπαραγωγικών μονάδων και συνολικής εφεδρείας του συστήματος.



Γράφημα 22: Παραγόμενη ενέργεια σε GWh από σταθμούς ΑΠΕ όπως προέκυψε από την επίλυση του υποδείγματος μεγιστοποίησης της πιθανότητας αποφυγής ζημίας για την αγορά που αναπαριστά τον ηλεκτρικό τομέα της Πολωνίας στον οποίο δραστηριοποιείται επιχείρηση υπό καθεστώς τέλει ανταγωνισμού

Λόγω της μείωσης της παραγόμενης ενέργειας από σταθμούς στερεών και αερίων καυσίμων, αυξάνεται διαχρονικά η παραγωγή από πυρηνικούς σταθμούς και μονάδες ΑΠΕ, οι οποίες είναι στην πλειονότητά τους διακοπτόμενες (Γράφημα 22). Η ενέργεια που εγχέεται στο σύστημα από αντλησιοταμιευτικούς σταθμούς αυξάνεται, όπως επίσης αυξάνεται η ενέργεια από σταθμούς CCS άνθρακα. Η αύξηση της παραγόμενης ενέργειας από μονάδες ΑΠΕ δεν είναι μεγαλύτερη διότι οι φθηνές επιλογές αποθήκευσης, και

συγκεκριμένα οι αντλησιοταμιευτικοί σταθμοί, έχουν δεδομένη διαθεσιμότητα και οι δυνατότητες περεταίρω ανάπτυξής τους είναι περιορισμένες.

Στο σενάριο χαμηλής αβεβαιότητας για τις τιμές άνθρακα και μεγάλης αβεβαιότητας για τις τιμές φυσικού αερίου και δικαιωμάτων εκπομπών υπάρχουν δύο επιδράσεις. Οι τιμές αγοράς των δικαιωμάτων εκπομπών παρουσιάζουν μεγάλη αβεβαιότητα και συνεπώς η παραγωγή από σταθμούς στερεών καυσίμων μειώνεται αρκετά. Επίσης, το κόστος φυσικού αερίου παρουσιάζει μεγάλη αβεβαιότητα με αποτέλεσμα να μειώνεται η παραγόμενη ενέργεια από σταθμούς αερίων καυσίμων. Η εγκατεστημένη ισχύς των πυρηνικών σταθμών, των μονάδων ΑΠΕ και των μονάδων CCS άνθρακα ώστε να καλύψουν το κενό στην ζήτηση λόγω της μείωσης της παραγόμενης ενέργειας από σταθμούς στερεών και αερίων καυσίμων (Γράφημα 22).

#### 13.3.2.1.1 Υπόδειγμα προσομοίωσης αγοράς υπό καθεστώς ατελούς ανταγωνισμού με αντικειμενική συνάρτηση την μεγιστοποίηση πιθανότητας αποφυγής ζημίας

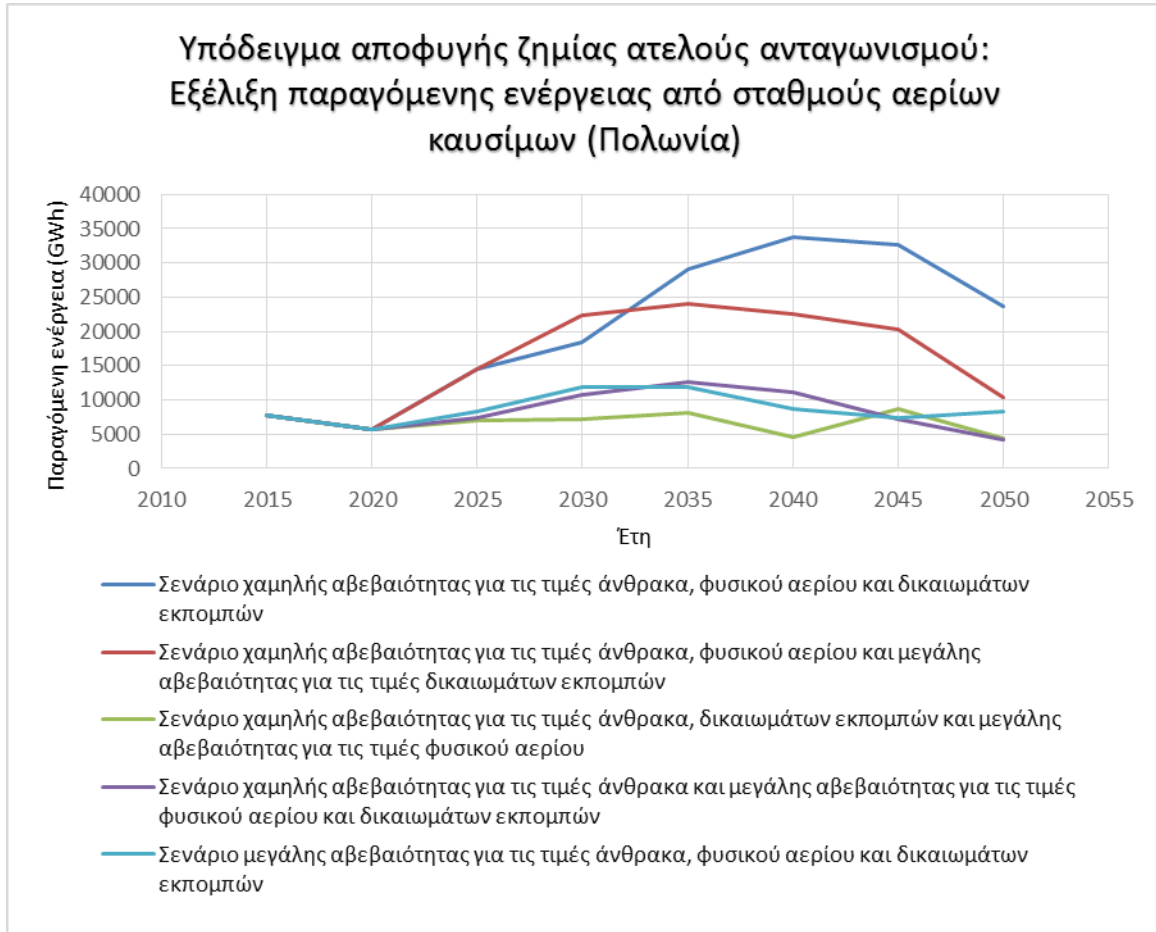
Στη συνέχεια, παρουσιάζονται οι επενδυτικές αποφάσεις και οι αποφάσεις για τη λειτουργία που λαμβάνει επιχείρηση η οποία δραστηριοποιείται στην αγορά υπό καθεστώς ατελούς ανταγωνισμού.

Στο σενάριο χαμηλής αβεβαιότητας για τις τιμές άνθρακα, φυσικού αερίου και δικαιωμάτων εκπομπών η παραγόμενη ενέργεια από τους σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής είναι αντίστοιχη της παραγόμενης ενέργειας όπως προέκυψε από την επίλυση του αιτιοκρατικού υποδείγματος προσομοίωσης αγοράς υπό καθεστώς ατελούς ανταγωνισμού (Γράφημα 23).

Στο σενάριο χαμηλής αβεβαιότητας για τις τιμές άνθρακα και μεγάλης αβεβαιότητας για τις τιμές φυσικού αερίου και δικαιωμάτων εκπομπών, η παραγόμενη ενέργεια από σταθμούς αερίων καυσίμων μειώνεται με έντονο ρυθμό λόγω της μεγάλης αβεβαιότητας στην τιμή αγοράς του καυσίμου και στο κόστος αγοράς των δικαιωμάτων εκπομπών. Η μείωση αυτή περιορίζεται διότι απαιτούμε να καλύπτονται οι περιορισμοί κυκλικής λειτουργίας ηλεκτροπαραγωγικών μονάδων και συνολικής εφεδρείας του συστήματος (Γράφημα 23).

Ακόμη, οι επιχειρήσεις που δραστηριοποιούνται σε αγορά υπό καθεστώς ατελούς ανταγωνισμού έχουν τη δυνατότητα να επηρεάσουν την τιμή του ηλεκτρισμού (Πίνακας 13-11), όπως αναλύθηκε στο κεφάλαιο 4.4. Συνεπώς, η συνολική ζητούμενη ενέργεια μειώνεται. Στον ακόλουθο πίνακα (Πίνακας 13-12) παρουσιάζεται η διαχρονική μεταβολή της ζητούμενης ενέργειας όπως προέκυψε από την επίλυση του αιτιοκρατικού υποδείγματος της αγοράς υπό καθεστώς τέλει ανταγωνισμού και από την επίλυση του

αιτιοκρατικού υποδείγματος της αγοράς υπό καθεστώς ατελούς ανταγωνισμού. Για λόγους εποπτείας, παρουσιάζονται οι τιμές ως ποσοστό της ζητούμενης ενέργειας του έτους 2020 όπως προέκυψε από την επίλυση του υποδείγματος αξιολόγησης με τη μέθοδο των δικαιωμάτων προαίρεσης σε αγορά υπό καθεστώς τέλειου ανταγωνισμού.



Γράφημα 23: Παραγόμενη ενέργεια σε GWh από σταθμούς αερίων καυσίμων όπως προέκυψε από την επίλυση του υποδείγματος μεγιστοποίησης της πιθανότητας αποφυγής ζημίας για την αγορά που αναπαριστά τον ηλεκτρικό τομέα της Πολωνίας στον οποίο δραστηριοποιείται επιχείρηση υπό καθεστώς ατελούς ανταγωνισμού



Πίνακας 13-11: Τιμή ηλεκτρισμού του υποδείγματος με αντικειμενική συνάρτηση την μεγιστοποίηση πιθανότητας αποφυγής ζημίας ανάλογα την κατάσταση της αγοράς (€/KWh)

	2020	2030	2050
<b>Τέλειος ανταγωνισμός</b>	0,060	0,074	0,091
<b>Ατελής ανταγωνισμός</b>	0,063	0,078	0,097

Πίνακας 13-12: Ζητούμενη ενέργεια του υποδείγματος με αντικειμενική συνάρτηση την μεγιστοποίηση πιθανότητας αποφυγής ζημίας ανάλογα την κατάσταση της αγοράς θεωρώντας ως μέτρο σύγκρισης την ζητούμενη ενέργεια του έτους 2020 όπως προέκυψε από την επίλυση του υποδείγματος με αντικειμενική συνάρτηση την μεγιστοποίηση πιθανότητας αποφυγής ζημίας σε αγορά υπό καθεστώς τέλειου ανταγωνισμού

	2020	2030	2050
<b>Τέλειος ανταγωνισμός</b>	100%	97%	104%
<b>Ατελής ανταγωνισμός</b>	99%	95%	101%

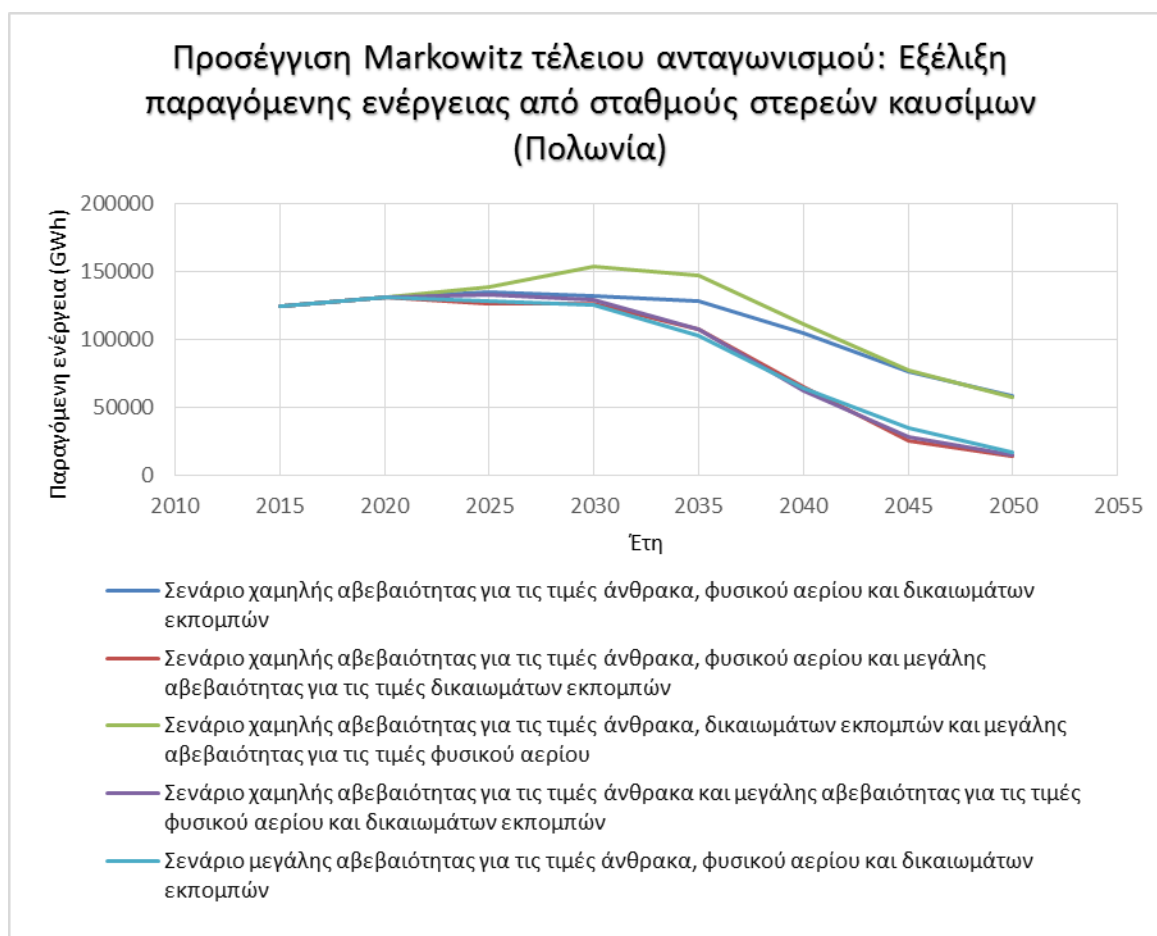
### 13.3.2.2 Υπόδειγμα εφαρμογής της προσέγγισης του Markowitz

Τα ενεργειακά αποτελέσματα του υποδείγματος με χρήση της προσέγγισης του Markowitz στο σενάριο χαμηλής αβεβαιότητας για τις τιμές άνθρακα, φυσικού αερίου και δικαιωμάτων εκπομπών είναι παρόμοια των ενεργειακών αποτελεσμάτων του αιτιοκρατικού υποδείγματος στο ίδιο σενάριο. Η επιχείρηση επιδιώκει να μεγιστοποιήσει το κέρδος – όφελός της επιδιώκοντας την ανάληψη του ελάχιστου δυνατού ρίσκου. Η συνάρτηση χρησιμότητας που προσομοιώνει τις προτιμήσεις της επιχείρησης εμπίπτει στην κατηγορία CRRA<sup>9</sup>, δηλαδή σταθερή σχετική αποφυγή κινδύνου και στην κατηγορία DARA<sup>10</sup>, δηλαδή φθίνουσα αποφυγή κινδύνου σε ποσότητες.

<sup>9</sup> CRRA-Constant Relative Risk Aversion και DARA-Decreasing Absolute Risk Aversion, όπως αναλύθηκε στην υποενότητα 6.4

<sup>10</sup> CRRA-Constant Relative Risk Aversion και DARA-Decreasing Absolute Risk Aversion, όπως αναλύθηκε στην υποενότητα 6.4

Συνεπώς, στο σενάριο χαμηλής αβεβαιότητας για τις τιμές άνθρακα και μεγάλης αβεβαιότητας για τις τιμές φυσικού αερίου και δικαιωμάτων εκπομπών, η εγκατεστημένη ισχύς των σταθμών στερεών καυσίμων μειώνεται ελαφρώς μεσοπρόθεσμα και με εντονότερο βαθμό μακροπρόθεσμα λόγω της μεγάλης αβεβαιότητας ως προς την εξέλιξη της τιμής αγοράς των δικαιωμάτων εκπομπών. Η εγκατεστημένη ισχύς των σταθμών αερίων καυσίμων μειώνεται ελαφρώς μεσοπρόθεσμα και αυξάνεται ελαφρώς μακροπρόθεσμα. Αυτό εξηγείται από το γεγονός ότι απαιτούμε να καλύπτονται οι περιορισμοί κυκλικής λειτουργίας των μονάδων ηλεκτροπαραγωγής και συνολικής εφεδρείας του συστήματος, οπότε η παραγωγή των αερίων καυσίμων διαχρονικά δεν μεταβάλλεται ιδιαίτερα.



Γράφημα 24: Παραγόμενη ενέργεια σε GWh από σταθμούς στερεών καυσίμων όπως προέκυψε από την επίλυση του υποδείγματος με χρήση της προσέγγισης του Markowitz για την αγορά που αναπαριστά τον ηλεκτρικό τομέα της Πολωνίας

Μεσοπρόθεσμα αυξάνεται η εγκατεστημένη ισχύς των μονάδων ΑΠΕ και των μονάδων CCS άνθρακα. Μακροπρόθεσμα, η εγκατεστημένη ισχύς των μονάδων αυτών αυξάνεται περεταίρω και γίνονται επενδύσεις σε πυρηνικούς σταθμούς. Η παραγόμενη ενέργεια

από τους προαναφερθέντες σταθμούς ακολουθεί διαχρονικά αντίστοιχη μεταβολή. Η αύξηση της εγκατεστημένης ισχύος και της παραγόμενης ενέργειας από πυρηνικούς σταθμούς περιορίζεται λόγω της αβεβαιότητας επί της λειτουργίας των πυρηνικών σταθμών που θεωρήσαμε, που περιλαμβάνει αβέβαια τυχαία γεγονότα με μικρή πιθανότητα όπως η καταστροφή Φουκουσίμα.

#### 13.3.2.2.1 Υπόδειγμα εφαρμογής της προσέγγισης του Markowitz σε αγορά υπό καθεστώς ατελούς ανταγωνισμού

Στην ενότητα αυτή εφαρμόζουμε την προσέγγιση του Markowitz σε αγορά που λειτουργεί υπό καθεστώς ατελούς ανταγωνισμού. Στο υπόδειγμα αυτό η επιχείρηση εκδηλώνει την αποστροφή της προς τον κίνδυνο επιδιώκοντας ταυτόχρονα να βελτιστοποιήσει την αντικειμενική συνάρτησή της. Όπως αναλύθηκε στην ενότητα 9.7, όταν μια επιχείρηση δραστηριοποιείται σε αγορά υπό καθεστώς ατελούς ανταγωνισμού, με δεδομένη την μείωση στην αβεβαιότητα της μελλοντικής ζήτησης, δημιουργούνται οι συνθήκες ώστε να επενδύσει σε μονάδες μεγαλύτερης έντασης κεφαλαίου και μικρότερου μέσου κόστους σε αντιδιαστολή με μονάδες μικρής εντάσεως κεφαλαίου αλλά μεγάλου μέσου κόστους μεγαλύτερου κεφαλαιουχικού κόστους. Ως αποτέλεσμα, στο σενάριο μεγάλης αβεβαιότητας για τις τιμές άνθρακα, φυσικού αερίου και αγοράς δικαιωμάτων εκπομπών, η ισχύς των επενδύσεων σε μονάδες αεριοστρόβιλων μειώνεται, ενώ αυξάνεται η ισχύς των επενδύσεων σε μονάδες συνδυασμένου κύκλου συγκριτικά με την κατάσταση στην οποία η επιχείρηση λειτουργεί στην αγορά υπό καθεστώς τέλει ανταγωνισμού. Συνεπώς, η παραγόμενη ενέργεια από μονάδες συνδυασμένου κύκλου αυξάνεται και η παραγόμενη ενέργεια από μονάδες αεριοστρόβιλων μειώνεται τόσο μεσοπρόθεσμα όσο και μακροπρόθεσμα συγκριτικά με την αντίστοιχη παραγόμενη ενέργεια στο ίδιο σενάριο όταν η εταιρία λειτουργεί υπό καθεστώς τέλει ανταγωνισμού (Πίνακας 13-13).

Πίνακας 13-13: Παραγόμενη ενέργεια σε TWh ανά τύπο σταθμού όπως προέκυψε από την επίλυση του υποδείγματος με χρήση της προσέγγισης του Markowitz στο σενάριο χαμηλής αβεβαιότητας για τις τιμές άνθρακα, φυσικού αερίου και υψηλής αβεβαιότητας για τις τιμές αγοράς δικαιωμάτων εκπομπών για την αγορά που αναπαριστά τον ηλεκτρικό τομέα της Πολωνίας στον οποίο δραστηριοποιείται επιχείρηση υπό καθεστώς ατελούς ανταγωνισμού

Μονάδες	2020	2030	2050
<b>ΑΠΕ</b>	18,4	21,9	41,5
<b>Αερίων καυσίμων</b>	15,3	17,1	14,5
<b>Στερεών καυσίμων</b>	17,6	12,3	0
<b>Αεριοστρόβιλοι</b>	4,4	1,8	0,05

### 13.3.2.3 Υπόδειγμα αξίας σε κίνδυνο

Η εγκατεστημένη ισχύς και η παραγόμενη ενέργεια του υποδείγματος αξίας σε κίνδυνο στο σενάριο χαμηλής αβεβαιότητας για τις τιμές άνθρακα, φυσικού αερίου και δικαιωμάτων εκπομπών είναι παρόμοια της αντίστοιχης όπως προκύπτει από την επίλυση του αιτιοκρατικού υποδείγματος.

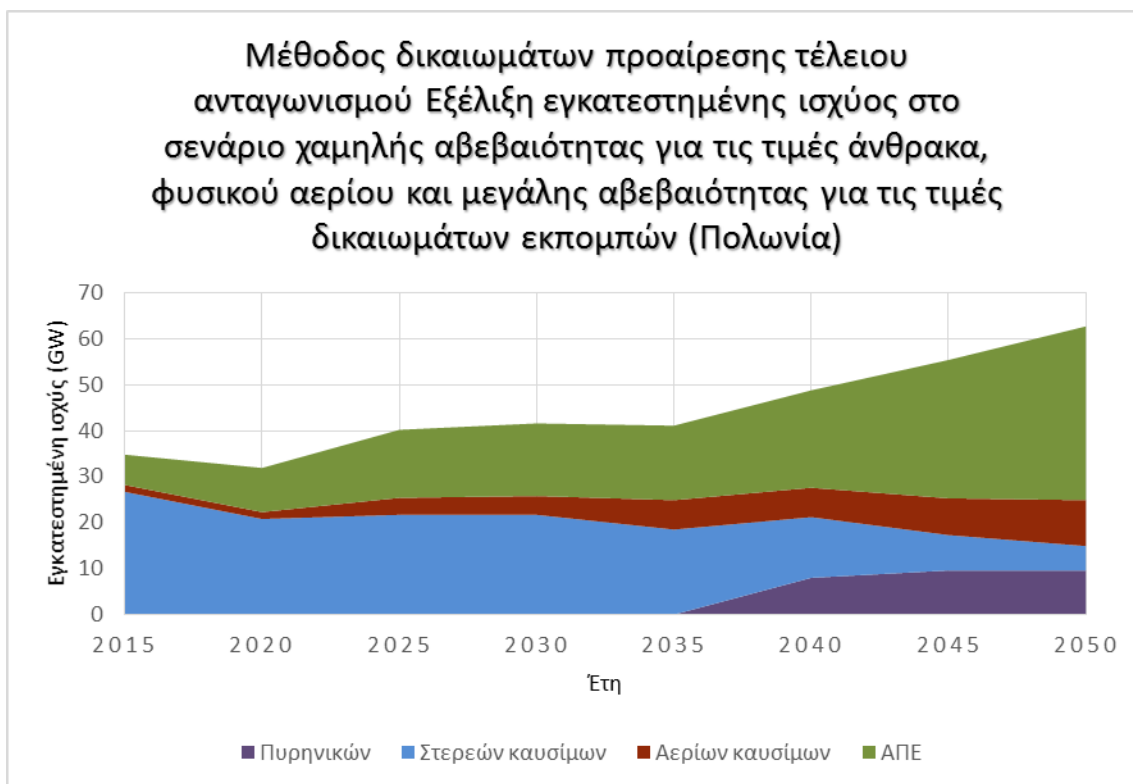
Στο σενάριο χαμηλής αβεβαιότητας για τις τιμές άνθρακα, φυσικού αερίου και μεγάλης αβεβαιότητας για τις τιμές δικαιωμάτων εκπομπών η εγκατεστημένη ισχύς των μονάδων φυσικού αερίου αυξάνεται ελαφρώς τόσο μεσοπρόθεσμα όσο και μακροπρόθεσμα, ώστε η παραγόμενη ενέργεια από τους σταθμούς αυτούς να καλύπτει τις απαιτήσεις του συστήματος σε άνοδο του φορτίου (Πίνακας 13-14). Η εγκατεστημένη ισχύς των σταθμών στερεών καυσίμων μειώνεται με μικρό ρυθμό μεσοπρόθεσμα και με μεγαλύτερο μακροπρόθεσμα λόγω της διαχρονικής αύξησης της τιμής αγοράς εκπομπών όπως επίσης και της μεγάλης αβεβαιότητας ως προς την τιμή τους (Πίνακας 13-14). Για την αντιστάθμιση της μείωσης της ισχύος των σταθμών στερεών καυσίμων και συνεπώς της μείωσης της παραγόμενης ενέργειάς τους, η εγκατεστημένη ισχύς των αντλησιοταμιευτικών σταθμών, των μονάδων CCS άνθρακα και των μονάδων ΑΠΕ αυξάνεται διαχρονικά (Πίνακας 13-14). Η εγκατεστημένη ισχύς των πυρηνικών σταθμών είναι μηδενική μεσοπρόθεσμα και αυξάνεται μακροπρόθεσμα για τον ίδιο λόγο (Πίνακας 13-14).

Πίνακας 13-14: Εγκατεστημένη ισχύς (σε GW) ανά τύπο σταθμού όπως προέκυψε από την επίλυση του υποδείγματος αξίας σε κίνδυνο στο σενάριο χαμηλής αβεβαιότητας για τις τιμές άνθρακα και φυσικού αερίου και μεγάλης αβεβαιότητας για τις τιμές αγοράς δικαιωμάτων εκπομπών για την αγορά που αναπαριστά τον ηλεκτρικό τομέα της Πολωνίας στον οποίο δραστηριοποιείται επιχείρηση υπό καθεστώς ατελούς ανταγωνισμού

Μονάδες	2020	2030	2050
ΑΠΕ	9,6	17,9	26
Αερίων καυσίμων	1,5	3,3	5,7
Στερεών καυσίμων	20,8	19,6	2,9
Πυρηνικών	0	0	12,1
Αεριοστρόβιλοι	0,1	0,1	0

#### 13.3.2.4 Υπόδειγμα αξιολόγησης με τη μέθοδο των δικαιωμάτων προαίρεσης

Τα ενεργειακά αποτελέσματα επίλυσης του υποδείγματος αξιολόγησης των επενδύσεων με τη μέθοδο των δικαιωμάτων προαίρεσης διαφοροποιούνται από τα ενεργειακά αποτελέσματα επίλυσης των προαναφερθέντων υποδειγμάτων. Στο σενάριο χαμηλής αβεβαιότητας για τις τιμές άνθρακα, φυσικού αερίου και δικαιωμάτων εκπομπών δεδομένου ότι με την μέθοδο αυτή κάθε μονάδα αξιολογείται μεμονωμένα, η εγκατεστημένη ισχύς των σταθμών στερεών καυσίμων μειώνεται ήδη από το μεσοπρόθεσμο διάστημα (Γράφημα 25). Μακροπρόθεσμα, η μείωση της εγκατεστημένης ισχύος των μονάδων στερεών καυσίμων είναι μεγαλύτερη. Στο ίδιο σενάριο μεσοπρόθεσμα δεν υπάρχουν εγκατεστημένοι πυρηνικοί σταθμοί ωστόσο γίνονται επενδύσεις κατασκευής τους μακροπρόθεσμα. Η εγκατεστημένη ισχύς των μονάδων αερίων καυσίμων αυξάνεται (Γράφημα 25). Διαχρονικά η ενέργεια που εγχέεται στο σύστημα από αντλησιοταμιευτικούς σταθμούς αυξάνεται αρκετά, ενώ οι σταθμοί στερεών καυσίμων παράγουν λιγότερη ενέργεια.



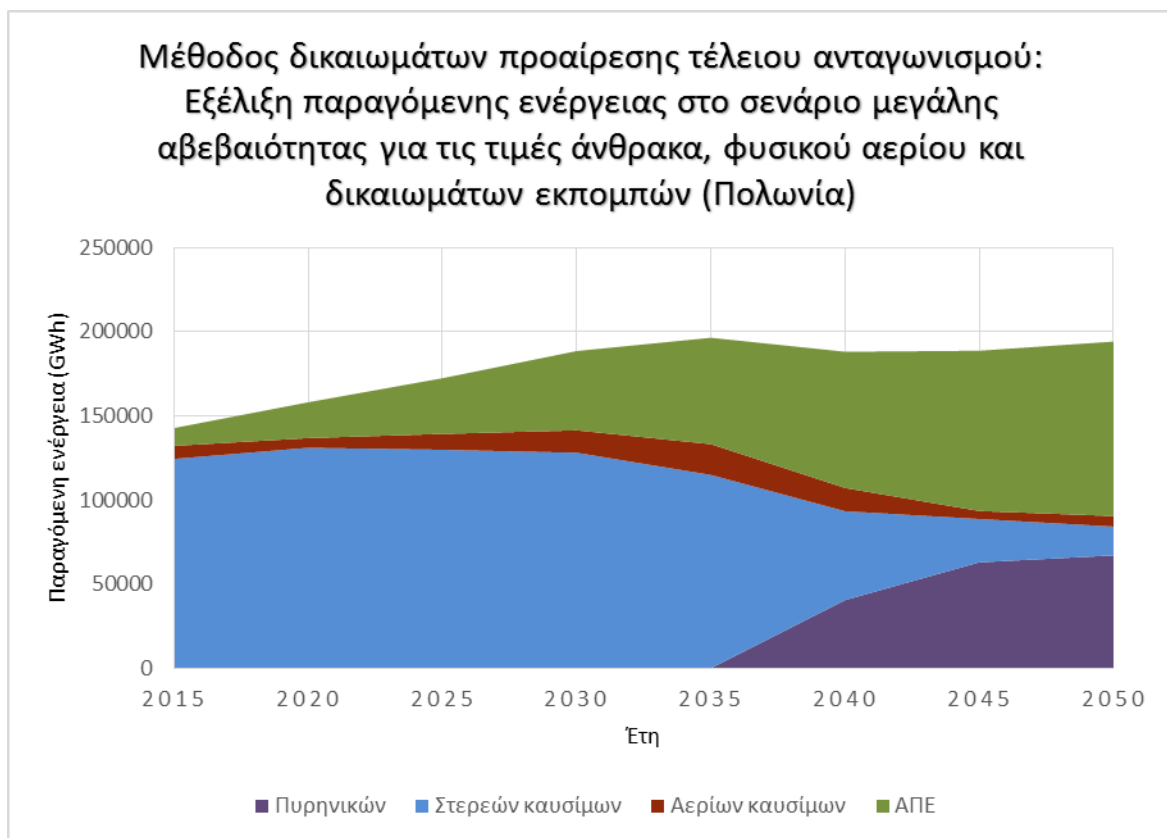
Γράφημα 25: Εγκατεστημένη ισχύς σε GW ανά κατηγορίες σταθμών ηλεκτροπαραγωγής όπως προέκυψε από την επίλυση του υποδείγματος με τη μέθοδο δικαιωμάτων προαίρεσης στο σενάριο χαμηλής αβεβαιότητας για τις τιμές άνθρακα, φυσικού αερίου και μεγάλης αβεβαιότητας για τις τιμές δικαιωμάτων εκπομπών για την αγορά που αναπαριστά τον ηλεκτρικό τομέα της Πολωνίας

Στο σενάριο μεγάλης αβεβαιότητας για τις τιμές άνθρακα, φυσικού αερίου και δικαιωμάτων εκπομπών, η παραγόμενη ενέργεια από σταθμούς στερεών καυσίμων μειώνεται αρκετά και μειώνεται επίσης η παραγόμενη ενέργεια από σταθμούς αερίων καυσίμων μεσοπρόθεσμα και μακροπρόθεσμα λόγω της μεγάλης αβεβαιότητας ως προς το κόστος των μονάδων αυτών (Γράφημα 26). Για την κάλυψη του κενού της μείωσης της παραγωγής από τις μονάδες αυτές, αυξάνεται η παραγόμενη ενέργεια από τις μονάδες που αντιμετωπίζουν μικρότερη αβεβαιότητα ως προς το κόστος λειτουργίας. Συνεπώς, η παραγόμενη ενέργεια από πυρηνικούς σταθμούς και μονάδες ΑΠΕ αυξάνεται (Γράφημα 26). Η αύξηση της παραγόμενης ενέργειας από μονάδες ΑΠΕ δεν είναι τόσο έντονη μακροχρόνια διότι περιορίζεται από τις περιορισμένες δυνατότητες επέκτασης των αντλησιοταμιευτικών μονάδων. Όπως έχει εξηγηθεί προηγουμένως, οι επενδυτικές αποφάσεις και οι αποφάσεις που λαμβάνει η επιχείρηση στο υπόδειγμα αξιολόγησης των επενδύσεων με τη μέθοδο των δικαιωμάτων προαίρεσης προκύπτουν ως αποτέλεσμα της αξιολόγησης κάθε επένδυσης ξεχωριστά. Αυτό συνεπάγεται πως

δύναται οι μονάδες που θα κατασκευαστούν να παράγουν ενέργεια η οποία δεν επαρκεί για την κάλυψη της ζήτησης. Στην περίπτωση αυτή επεμβαίνει ο ρυθμιστής της αγοράς κατασκευάζοντας μονάδες συνδυασμένου κύκλου από τις οποίες παράγεται η υπολειπόμενη ενέργεια.

### 13.3.3 Σενάριο πολύ μεγάλης αβεβαιότητας

Στην υποενότητα αυτή θεωρείται πολύ μεγάλη αβεβαιότητα ως προς την εξέλιξη των πιθανοτικών μεγεθών. Για κάθε μέθοδο αξιολόγησης της αβεβαιότητας θα συγκριθούν τα αποτελέσματα αυτού του σεναρίου με το σενάριο μεγάλης αβεβαιότητας όπως παρουσιάστηκε στην υποενότητα 13.3.2.



Γράφημα 26: Παραγόμενη ενέργεια σε GWh ανά τύπο σταθμού όπως προέκυψε από την επίλυση του υποδείγματος με τη μέθοδο δικαιωμάτων προαίρεσης στο σενάριο μεγάλης αβεβαιότητας για τις τιμές άνθρακα, φυσικού αερίου και δικαιωμάτων εκπομπών για την αγορά που αναπαριστά τον ηλεκτρικό τομέα της Πολωνίας

### 13.3.3.1 Υπόδειγμα μεγιστοποίησης της πιθανότητας αποφυγής ζημίας

Στο υπόδειγμα μεγιστοποίησης της πιθανότητας αποφυγής ζημίας η επιχείρηση εκδηλώνει την έντονη αποστροφή προς τον κίνδυνο λαμβάνοντας τις αποφάσεις εκείνες που θα της προσδώσουν «ανοσία» ως προς τα πιθανά ενδεχόμενα στο μέλλον και αποφεύγει τις επιλογές με περισσότερο αβέβαια αποτελέσματα. Επίσης, η επιχείρηση αδιαφορεί ως προς το μέγεθος του κέρδους – οφέλους από τις επιλογές που θα λάβει. Για τον λόγο αυτό η επιχείρηση επιλέγει μονάδες μικρής εντάσεως κεφαλαίου και μεγαλύτερου λειτουργικού κόστους έναντι μονάδων μεγαλύτερης εντάσεως κεφαλαίου και μικρότερου λειτουργικού κόστους. Συνεπώς, η εγκατεστημένη ισχύς των μονάδων αεριοστρόβιλων αυξάνεται (Πίνακας 13-15), ενώ η εγκατεστημένη ισχύς των μονάδων στερεών καυσίμων και των μονάδων συνδυασμένου κύκλου μειώνεται. Λόγω της μεγάλης αβεβαιότητας, η επιχείρηση δεν επενδύει στην κατασκευή πολλών νέων μονάδων αλλά επιλέγει την πραγματοποίηση επενδύσεων επέκτασης – ανακαίνισης των ήδη εγκατεστημένων μονάδων. Η ισχύς των επενδύσεων αυτών, όπως παρουσιάζεται στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 13-16) είναι μεγαλύτερη της αντίστοιχης στο σενάριο μεγάλης αβεβαιότητας όπως παρουσιάστηκε στην υποενότητα 13.3.2.1.

Πίνακας 13-15: Εγκατεστημένη ισχύς αεριοστρόβιλων (σε GW) όπως προέκυψε από την επίλυση του υποδείγματος μεγιστοποίησης της πιθανότητας αποφυγής ζημίας στο σενάριο μεγάλης αβεβαιότητας που παρουσιάστηκε στην υποενότητα 13.3.2 και πολύ μεγάλης αβεβαιότητας για την αγορά που αναπαριστά τον ηλεκτρικό τομέα της Πολωνίας

Σενάριο	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Μεγάλης αβεβαιότητας υποενότητας 13.3.2	0,08	0,08	0,06	0,06	0,04	0,04
Πολύ μεγάλης αβεβαιότητας	0,09	0,09	0,09	0,10	0,25	0,30



Πίνακας 13-16: Διαχρονική ισχύς επενδύσεων επέκτασης – ανακαίνισης ήδη εγκατεστημένων μονάδων (σε GW) όπως προέκυψε από την επίλυση του υποδείγματος μεγιστοποίησης της πιθανότητας αποφυγής ζημίας στο σενάριο μεγάλης αβεβαιότητας όπως παρουσιάστηκε στην υποενότητα 13.3.2 και πολύ μεγάλης αβεβαιότητας για την αγορά που αναπαριστά τον ηλεκτρικό τομέα της Πολωνίας

Μονάδες	Σενάριο μεγάλης αβεβαιότητας υποενότητας 13.3.2	Σενάριο πολύ μεγάλης αβεβαιότητας
ΑΠΕ	0,02	0,14
Αερίων καυσίμων	0,56	0,54
Στερεών καυσίμων	9,46	11,35
Αεριοστρόβιλων	0,04	0,04

#### 13.3.3.2 Υπόδειγμα με χρήση της προσέγγισης του Markowitz

Στο υπόδειγμα με χρήση της προσέγγισης του Markowitz η επιχείρηση εκδηλώνει την αποστροφή προς τον κίνδυνο αποφεύγοντας τις επιλογές εκείνες με αβέβαιη εξέλιξη στο μέλλον επιδιώκοντας παράλληλα μεγιστοποίηση του κέρδους – οφέλους της. Η εγκατεστημένη ισχύς των μονάδων στερεών καυσίμων και των μονάδων συνδυασμένου κύκλου μειώνεται λόγω της μεγάλης αβεβαιότητας ως προς το κόστος λειτουργίας τους και για την κάλυψη του κενού στην παραγόμενη ενέργεια αυξάνεται με έντονο ρυθμό η εγκατεστημένη ισχύς των μονάδων ΑΠΕ. Επιπλέον, λόγω της μεγάλης αβεβαιότητας η επιχείρηση επιλέγει να ανακαινίσει – επεκτείνει μονάδες που ήδη διαθέτει.

Πίνακας 13-17: Διαχρονική ισχύς επενδύσεων επέκτασης – ανακαίνισης ήδη εγκατεστημένων μονάδων (σε GW) όπως προέκυψε από την επίλυση του υποδείγματος με χρήση της προσέγγισης του Markowitz στο σενάριο μεγάλης αβεβαιότητας όπως παρουσιάστηκε στην υποενότητα 13.3.2 και πολύ μεγάλης αβεβαιότητας για την αγορά που αναπαριστά τον ηλεκτρικό τομέα της Πολωνίας

Μονάδες	Σενάριο μεγάλης αβεβαιότητας υποενότητας 13.3.2	Σενάριο πολύ μεγάλης αβεβαιότητας
ΑΠΕ	0,02	0,13
Αερίων καυσίμων	0,50	0,51
Στερεών καυσίμων	9,67	10,96
Αεριοστρόβιλων	0,04	0,04

Στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 13-17) παρουσιάζεται η ισχύς επέκτασης ήδη εγκατεστημένων μονάδων του υποδείγματος με χρήση της προσέγγισης του Markowitz στο σενάριο πολύ μεγάλης αβεβαιότητας και τα αποτελέσματα αυτά συγκρίνονται με την αντίστοιχη ισχύ στο σενάριο υψηλής αβεβαιότητας όπως παρουσιάστηκε στην υποενότητα 13.3.2.

### 13.3.3.3 Υπόδειγμα αξιολόγησης με τη μέθοδο των δικαιωμάτων προαίρεσης

Στο υπόδειγμα αξιολόγησης των επενδύσεων με τη μέθοδο των δικαιωμάτων προαίρεσης κάθε μία επένδυση αξιολογείται ξεχωριστά. Η εγκατεστημένη ισχύς των μονάδων στερεών καυσίμων καθώς και η εγκατεστημένη ισχύς των μονάδων συνδυασμένου κύκλου μειώνεται διαχρονικά λόγω της πολύ μεγάλης αβεβαιότητας ως προς το κόστος λειτουργίας των σταθμών αυτών. Επιπλέον, αυξάνεται η εγκατεστημένη ισχύς των μονάδων ΑΠΕ για την κάλυψη της ζητούμενης ενέργειας όπως επίσης, δεδομένου ότι η επιχείρηση δεν επενδύει σε κατασκευή νέων μονάδων λόγω της μεγάλης αβεβαιότητας αλλά αξιοποιεί και επεκτείνει τις ήδη υπάρχουσες, αυξάνεται η ισχύς επένδυσης για επέκταση ήδη εγκατεστημένων μονάδων, (Πίνακας 13-18) συγκριτικά με την ισχύ όπως είχε προκύψει στο σενάριο μεγάλης αβεβαιότητας όπως παρουσιάστηκε στην υποενότητα 13.3.2. Ακόμη, στο σενάριο αυτό γίνονται περικοπές φορτίου στο μεσοπρόθεσμο διάστημα στο οποίο υπάρχει έντονη αβεβαιότητα (Πίνακας 13-19).

Πίνακας 13-18: Διαχρονική ισχύς επενδύσεων επέκτασης – ανακαίνισης ήδη εγκατεστημένων μονάδων (σε GW) όπως προέκυψε από την επίλυση του υποδείγματος δικαιωμάτων προαίρεσης στο σενάριο μεγάλης αβεβαιότητας που παρουσιάστηκε στην υποενότητα 13.3.2 και πολύ μεγάλης αβεβαιότητας για την αγορά που αναπαριστά τον ηλεκτρικό τομέα της Πολωνίας

Μονάδες	Σενάριο μεγάλης αβεβαιότητας υποενότητας 13.3.2	Σενάριο πολύ μεγάλης αβεβαιότητας
ΑΠΕ	0,07	0,13
Αερίων καυσίμων	0,94	0,49
Στερεών καυσίμων	11,15	11,15
Αεριοστρόβιλοι	0,02	0,04

Πίνακας 13-19: Περικοπές φορτίου (σε GWh) όπως προέκυψε από την επίλυση του υποδείγματος δικαιωμάτων προαίρεσης στο σενάριο μεγάλης αβεβαιότητας που παρουσιάστηκε στην υποενότητα 13.3.2 και πολύ μεγάλης αβεβαιότητας για την αγορά που αναπαριστά τον ηλεκτρικό τομέα της Πολωνίας

	2025	2030
<b>Σενάριο μεγάλης αβεβαιότητας υποενότητας 13.3.2</b>	2,1	7,8
<b>Σενάριο πολύ μεγάλης αβεβαιότητας</b>	8,4	22,2

### 13.3.4 Υπόδειγμα δύο σταδίων

Η εγκατεστημένη ισχύς της επίλυσης του υποδείγματος δύο σταδίων διαφέρει σημαντικά από την εγκατεστημένη ισχύ επίλυσης των υπολοίπων υποδειγμάτων (Γράφημα 27). Στο υπόδειγμα δύο σταδίων μεσοπρόθεσμα υπάρχει έντονη έλλειψη πληροφορίας για την εξέλιξη των τιμών των πιθανοτικών μεγεθών. Μακροπρόθεσμα μέρος της αβεβαιότητας έχει αρθεί και οι αποφάσεις της επιχείρησης μεσοπρόθεσμα είναι γνωστές, με αποτέλεσμα να μεταβάλλεται η θεώρηση για την περεταίρω εξέλιξη των πιθανοτικών μεγεθών. Επομένως, ο αποφασίζων καθυστερεί τη λήψη απόφασης και μακροπρόθεσμα δύναται να ληφθούν διορθωτικές αποφάσεις. Συνεπώς, μεσοπρόθεσμα μειώνεται η ισχύς των επενδύσεων κατασκευής νέων μονάδων και, δεδομένης της μεγάλης αβεβαιότητας, η επιχείρηση επιλέγει να ανακαινίσει ήδη εγκατεστημένες μονάδες και να επενδύσει σε μονάδες μικρής έντασης κεφαλαίου, όπως είναι οι μονάδες αεριοστρόβιλων. Στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 13-20) παρουσιάζεται η ισχύς των επενδύσεων ανακαίνισης - επέκτασης ήδη υπάρχοντων σταθμών στερεών καυσίμων.

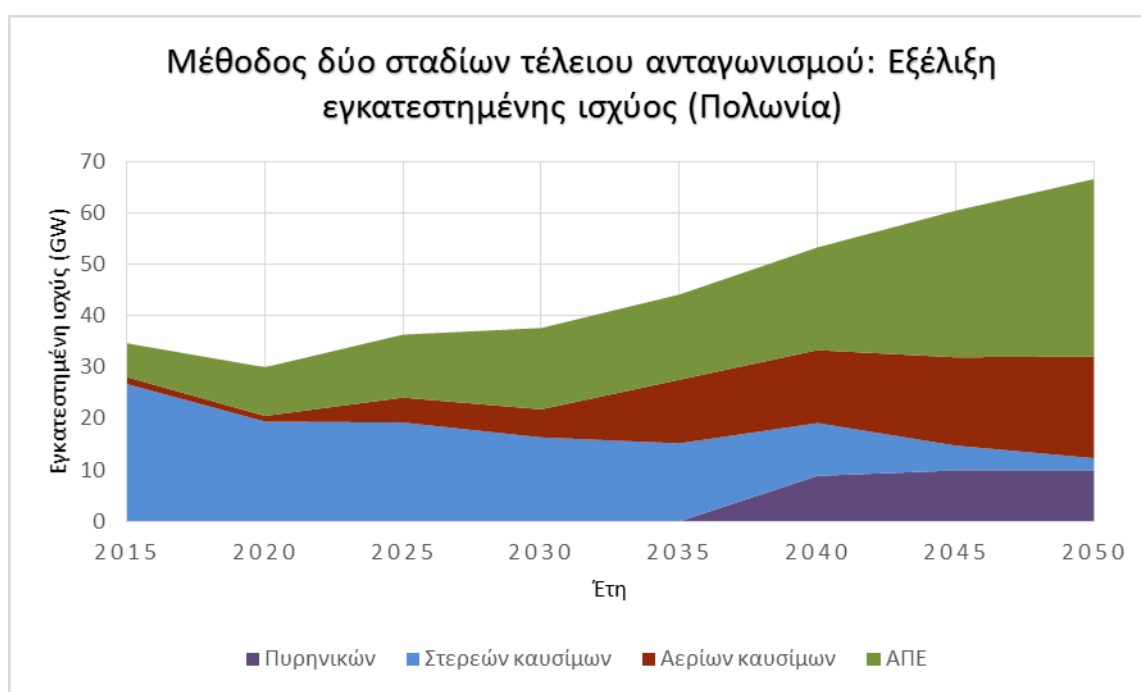
Πίνακας 13-20: Διαχρονική ισχύς επενδύσεων επέκτασης – ανακαίνισης ήδη εγκατεστημένων μονάδων όπως προέκυψε από την επίλυση του υποδείγματος δύο σταδίων και των υπολοίπων υποδειγμάτων στο σενάριο πολύ μεγάλης αβεβαιότητας για την αγορά που αναπαριστά τον ηλεκτρικό τομέα της Πολωνίας (σε GW)

Μονάδες	Μεγιστοποίηση πιθανότητας αποφυγής ζημίας	Προσέγγιση Markowitz	Δικαιώματα προαίρεσης	Δύο σταδίων
ΑΠΕ	0,14	0,13	0,13	0,12
Αερίων καυσίμων	0,54	0,51	0,49	0,59
Στερεών καυσίμων	11,35	10,96	11,15	11,24
Αεριοστρόβιλοι	0,04	0,04	0,04	0,04

## 13.4 Αποτελέσματα επίλυσης υποδείγματος που αναπαριστά τον ηλεκτρικό τομέα της Γερμανίας

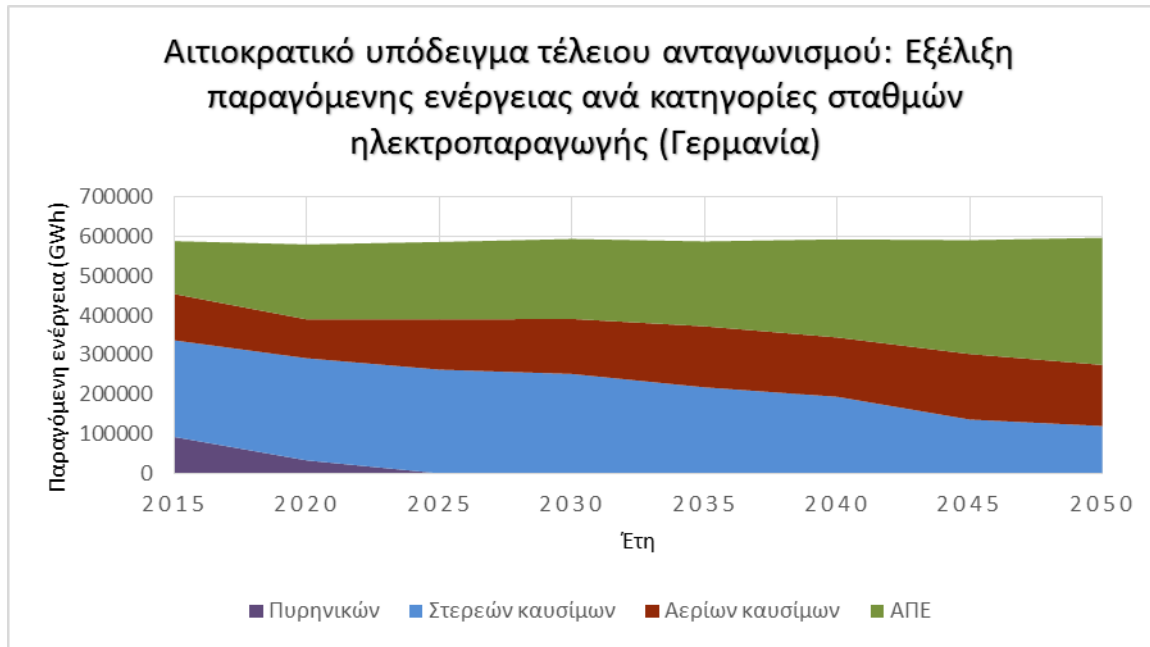
### 13.4.1 Αιτιοκρατικό υπόδειγμα

Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας του ηλεκτρικού τομέα της Γερμανίας προέρχεται κυρίως από μονάδες στερεών καυσίμων, αερίων καυσίμων και μονάδες ΑΠΕ τόσο μεσοπρόθεσμα όσο και μακροπρόθεσμα (Γράφημα 28). Οι πυρηνικοί σταθμοί που λειτουργούν στη Γερμανία προβλέπεται να κλείσουν έως το 2022, συνεπώς από το 2025 και μετά η Γερμανία δεν θα έχει καθόλου πυρηνικούς σταθμούς. Η παραγόμενη ενέργεια

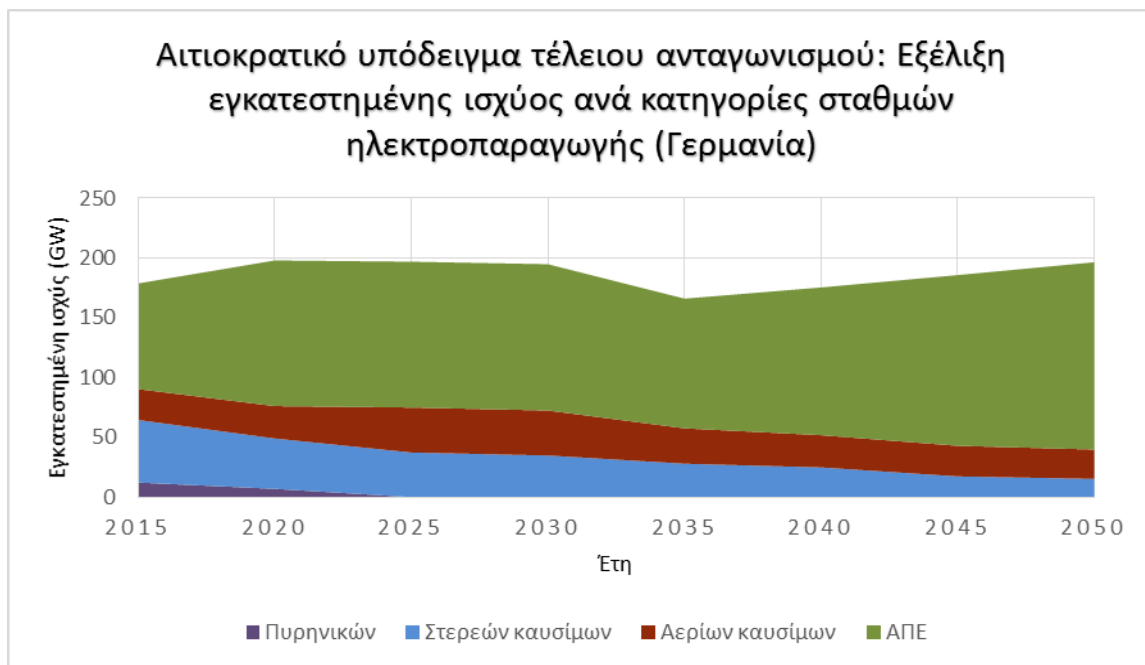


Γράφημα 27: Εγκατεστημένη ισχύς σε GW ανά τύπο σταθμού όπως προέκυψε από την επίλυση του υποδείγματος δύο σταδίων για την αγορά που αναπαριστά τον ηλεκτρικό τομέα της Πολωνίας

από σταθμούς στερεών καυσίμων μειώνεται διαχρονικά (Γράφημα 28). Η ενέργεια που παράγεται από σταθμούς αερίων καυσίμων, λόγω της απαίτησης να καλύπτονται οι περιορισμοί κυκλικής λειτουργίας των μονάδων ηλεκτροπαραγωγής και συνολικής εφεδρείας του συστήματος, αυξάνεται με πολύ μικρό ρυθμό (Γράφημα 28). Η παραγωγή των μονάδων ΑΠΕ αυξάνεται με έντονο ρυθμό ώστε να καλύψει τη μείωση της παραγόμενης ενέργειας από τους σταθμούς στερεών καυσίμων και από τους πυρηνικούς σταθμούς όπως επίσης μακροπρόθεσμα χρησιμοποιούνται αντλησιοταμιευτικοί σταθμοί και σταθμοί CCS φυσικού αερίου (Γράφημα 28).



Γράφημα 28: Παραγόμενη ενέργεια σε GWh ανά κατηγορίες σταθμών ηλεκτροπαραγωγής όπως προέκυψε από την επίλυση του αιτιοκρατικού υποδείγματος αγοράς που αναπαριστά τον ηλεκτρικό τομέα της Γερμανίας στον οποίο δραστηριοποιείται επιχείρηση υπό καθεστώς τέλει ανταγωνισμού



Γράφημα 29: Εγκατεστημένη ισχύς σε GW ανά κατηγορίες σταθμών ηλεκτροπαραγωγής όπως προέκυψε από την επίλυση του αιτιοκρατικού υποδείγματος αγοράς που αναπαριστά τον ηλεκτρικό τομέα της Γερμανίας στον οποίο δραστηριοποιείται επιχείρηση υπό καθεστώς τέλει ανταγωνισμού

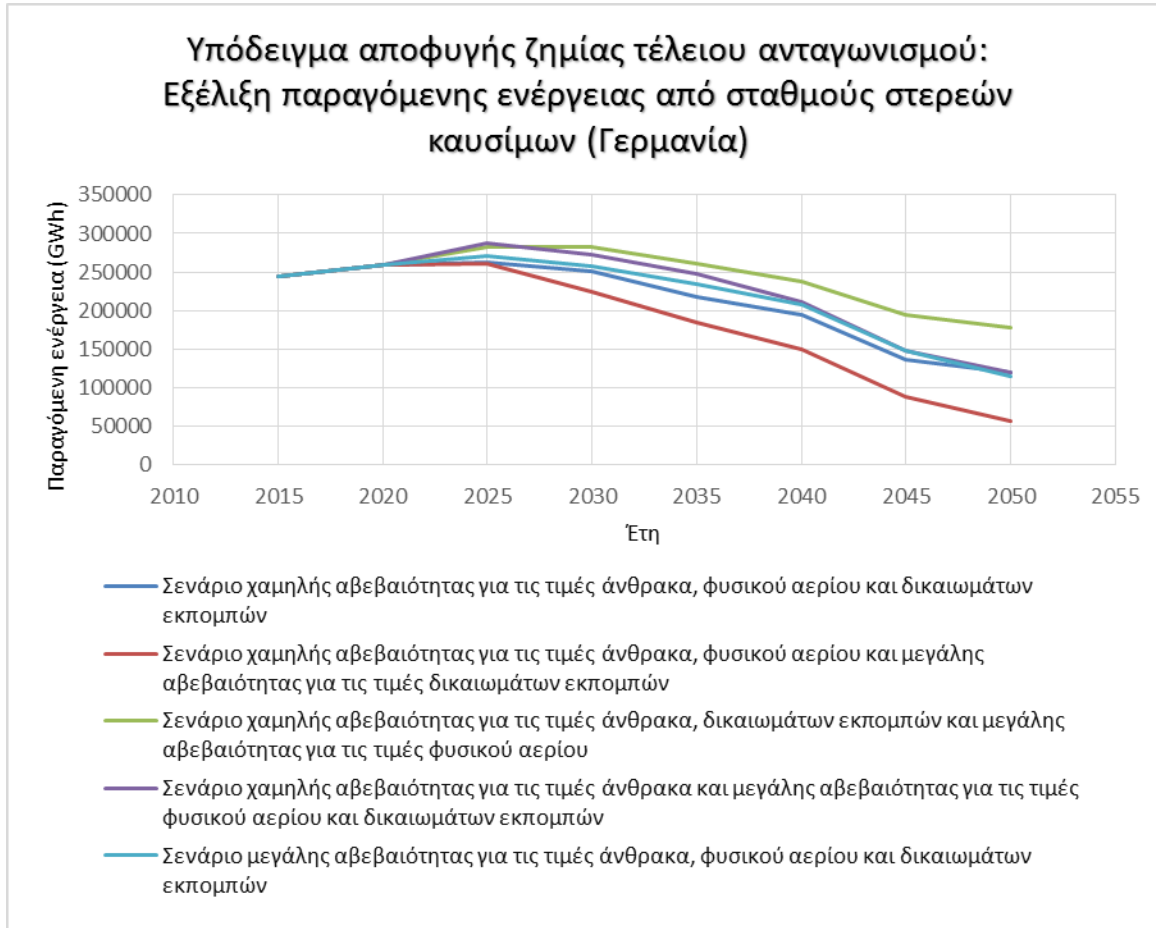
Η εγκατεστημένη ισχύς των σταθμών στερεών καυσίμων όπως προκύπτει από την επίλυση του αιτιοκρατικού υποδείγματος προσομοίωσης της ηλεκτρικής αγοράς της Γερμανίας μειώνεται διαχρονικά λόγω του αυξανόμενου κόστους για αγορά δικαιωμάτων εκπομπών CO<sub>2</sub> (Γράφημα 29). Η εγκατεστημένη ισχύς των σταθμών αερίων καυσίμων αυξάνεται ελαφρώς ενώ η ισχύς των μονάδων ΑΠΕ αυξάνεται με έντονο ρυθμό διαχρονικά (Γράφημα 29). Η αύξηση της ισχύος των μονάδων ΑΠΕ ωστόσο περιορίζεται λόγω της δεδομένης χωρητικότητας και των περιορισμένων δυνατοτήτων ανάπτυξης των αντλησιοταμιευτικών μονάδων.

### 13.4.2 Σενάρια μοντελοποίησης της αβεβαιότητας

Στη συνέχεια αναλύονται τα αποτελέσματα της επίλυσης των υποδειγμάτων αξιολόγησης του κινδύνου με διάφορες μεθόδους όπως αναλύθηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια σε διάφορα σενάρια εξέλιξης των τιμών των πιθανοτικών μεγεθών. Τα σενάρια αυτά θεωρούν μικρή ή μεγάλη αβεβαιότητα ως προς την εξέλιξη των τιμών του άνθρακα, του φυσικού αερίου και αγοράς των δικαιωμάτων εκπομπών CO<sub>2</sub>.

#### 13.4.2.1 Υπόδειγμα μεγιστοποίησης της πιθανότητας αποφυγής ζημίας

Στην υποενότητα αυτή παρουσιάζονται τα αποτελέσματα τόσο σε ενεργειακό επίπεδο όσο και σε επίπεδο εγκατεστημένης ισχύος από την επίλυση του υποδείγματος με αντικειμενική συνάρτηση την μεγιστοποίηση πιθανότητας αποφυγής ζημίας μιας επιχείρησης που λειτουργεί στην αγορά της Γερμανίας υπό καθεστώς τέλειου ανταγωνισμού. Το υπόδειγμα αυτό προσομοιώνει τη συμπεριφορά της επιχείρησης κατά την οποία η επιχείρηση εκδηλώνει έντονη αποστροφή προς τον κίνδυνο. Επιδιώκει να λάβει εκείνες τις επενδυτικές αποφάσεις και αποφάσεις για τη λειτουργία των μονάδων ώστε να μην «μετανιώσει» εκ των υστέρων, δηλαδή επιδιώκει να ελαχιστοποιήσει την πιθανότητα να έχει ζημία. Στο σενάριο χαμηλής αβεβαιότητας για τις τιμές άνθρακα, φυσικού αερίου και δικαιωμάτων εκπομπών τα ενεργειακά αποτελέσματα του υποδείγματος μεγιστοποίησης της πιθανότητας αποφυγής ζημίας είναι παρεμφερή με τα αποτελέσματα του αιτιοκρατικού υποδείγματος.



Γράφημα 30: Παραγόμενη ενέργεια σε GWh από σταθμούς στερεών καυσίμων όπως προέκυψε από την επίλυση του υποδείγματος μεγιστοποίησης της πιθανότητας αποφυγής ζημίας για την αγορά που αναπαριστά τον ηλεκτρικό τομέα της Γερμανίας

Στο σενάριο χαμηλής αβεβαιότητας για τις τιμές άνθρακα, φυσικού αερίου και μεγάλης αβεβαιότητας για τις τιμές δικαιωμάτων εκπομπών, η παραγωγή από άνθρακα του υποδείγματος μεγιστοποίησης της πιθανότητας αποφυγής ζημίας, του οποίου η συνάρτηση χρησιμότητας που έχουμε υποθέσει εμπίπτει στην κατηγορία IRRA δηλαδή αυξανόμενης σχετικής αποστροφής προς τον κίνδυνο, μειώνεται ελαφρώς στο μεσοπρόθεσμο διάστημα και μειώνεται πιο έντονα στο μακροπρόθεσμο διάστημα (Γράφημα 30). Η παραγωγή από μονάδες ΑΠΕ αυξάνεται τόσο στο μεσοπρόθεσμο ορίζοντα όσο και μακροχρόνια. Δεδομένων των περιορισμών κυκλικής λειτουργίας των μονάδων ηλεκτροπαραγωγής και της απαίτησης να καλύπτονται οι περιορισμοί συνολικής εφεδρείας του συστήματος, η παραγωγή από μονάδες συνδυασμένου κύκλου αυξάνεται ελαφρώς διαχρονικά. Η παραγόμενη ενέργεια των σταθμών CCS φυσικού αερίου αυξάνεται όπως επίσης αυξάνεται σε μεγάλο βαθμό η ενέργεια που εγχέεται στο σύστημα από αντλησιοταμιευτικούς σταθμούς.

Η εγκατεστημένη ισχύς των σταθμών στερεών καυσίμων στο σενάριο αυτό μειώνεται αρκετά λόγω της μεγάλης αβεβαιότητας για την τιμή αγοράς δικαιωμάτων εκπομπών. Η εγκατεστημένη ισχύς των μονάδων ΑΠΕ αυξάνεται με έντονο ρυθμό και η ισχύς των σταθμών αερίων καυσίμων αυξάνεται ελαφρώς (Γράφημα 31). Η εγκατεστημένη ισχύς των σταθμών CCS άνθρακα και φυσικού αερίου αυξάνεται.

#### 13.4.2.2 Υπόδειγμα εφαρμογής της προσέγγισης του Markowitz

Τα ενεργειακά αποτελέσματα του υποδείγματος με χρήση της προσέγγισης του Markowitz στο σενάριο χαμηλής αβεβαιότητας για τις τιμές άνθρακα, φυσικού αερίου και μεγάλης αβεβαιότητας για τις τιμές δικαιωμάτων εκπομπών προσομοιάζουν τα αποτελέσματα της επίλυσης του αιτιοκρατικού υποδείγματος.

Στο σενάριο χαμηλής αβεβαιότητας για τις τιμές άνθρακα, φυσικού αερίου και μεγάλης αβεβαιότητας για τις τιμές δικαιωμάτων εκπομπών του υποδείγματος με χρήση της προσέγγισης του Markowitz στο οποίο η συνάρτηση χρησιμότητας που προσομοιάζει τη συμπεριφορά της επιχείρησης εμπίπτει στις κατηγορίες CRRA, δηλαδή σταθερή σχετική αποφυγή κινδύνου και στην κατηγορία DARA<sup>11</sup>, δηλαδή φθίνουσα αποφυγή κινδύνου σε ποσότητες, η παραγόμενη ενέργεια από σταθμούς στερεών καυσίμων μειώνεται τόσο μεσοπρόθεσμα όσο και μακροπρόθεσμα λόγω της μεγάλης αβεβαιότητας ως προς την εξέλιξη των τιμών αγοράς δικαιωμάτων εκπομπών. Για την κάλυψη της μείωσης αυτής, αυξάνεται με έντονο ρυθμό η παραγόμενη ενέργεια από μονάδες ΑΠΕ, ενώ η παραγωγή των μονάδων αερίων καυσίμων αυξάνεται ελαφρώς διαχρονικά για να καλύπτονται οι απαιτήσεις τους συστήματος σε άνοδο του φορτίου (εφεδρεία συστήματος) (Γράφημα 31).

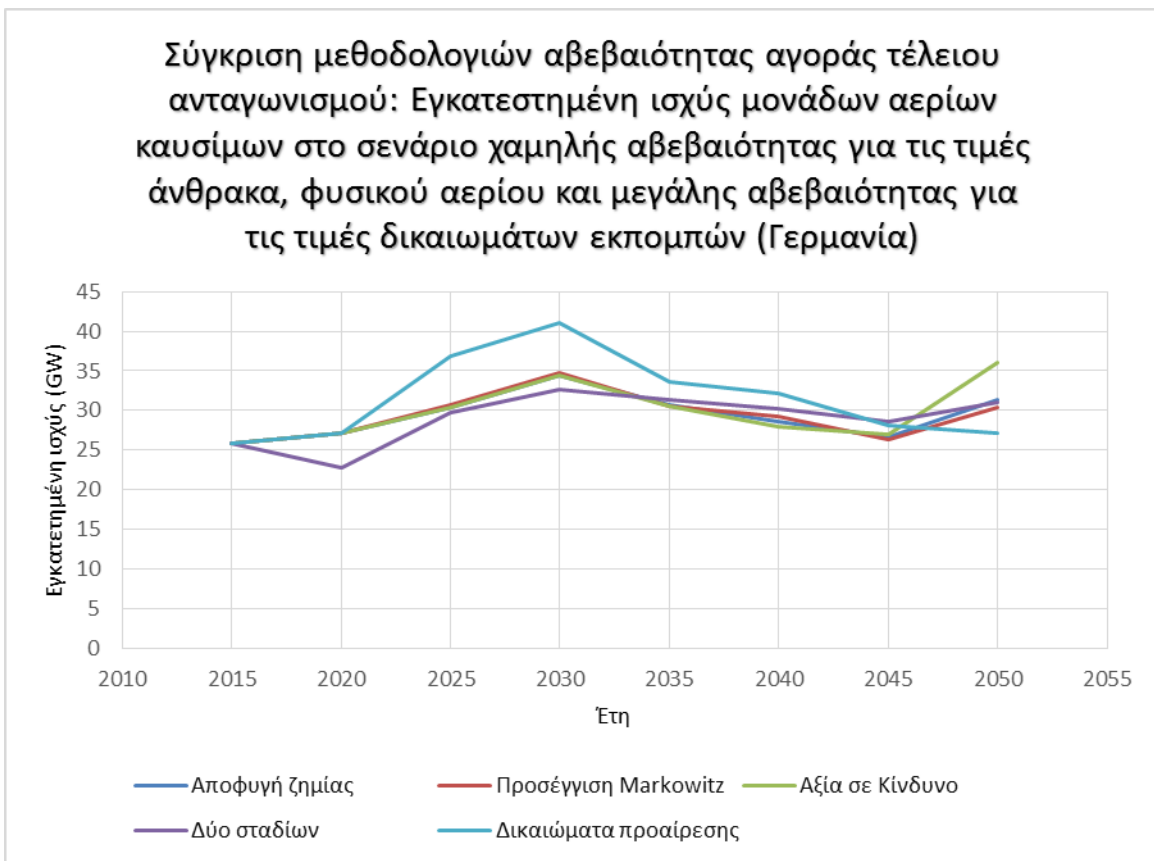
Η εγκατεστημένη ισχύς των μονάδων στερεών καυσίμων στο σενάριο αυτό μειώνεται με μικρό ρυθμό μεσοπρόθεσμα και με εντονότερο μακροπρόθεσμα δεδομένης της μεγάλης αβεβαιότητας ως προς την εξέλιξη των τιμών αγοράς δικαιωμάτων εκπομπών. Για τον ίδιο λόγο η εγκατεστημένη ισχύς των μονάδων αερίων καυσίμων μειώνεται ελαφρώς διαχρονικά. Η εγκατεστημένη ισχύς των μονάδων ΑΠΕ και των αντλησιοταμιευτικών σταθμών αυξάνεται διαχρονικά, ωστόσο η αύξηση της ισχύος των μονάδων ΑΠΕ περιορίζεται από τις περιορισμένες δυνατότητες ανάπτυξης περεταίρω των σταθμών αντλησιοταμίευσης.

<sup>11</sup> CRRA-Constant Relative Risk Aversion και DARA-Decreasing Absolute Risk Aversion, όπως αναλύθηκε στην υποενότητα 6.4



13.4.2.3 Υπόδειγμα αξίας σε κίνδυνο

Στο υπόδειγμα αξιολόγησης του κινδύνου με εφαρμογή της θεωρίας της αξίας σε κίνδυνο η εγκατεστημένη ισχύς των μονάδων ηλεκτροπαραγωγής στο σενάριο χαμηλής αβεβαιότητας για τις τιμές άνθρακα, φυσικού αερίου και αγοράς δικαιωμάτων εκπομπών CO<sub>2</sub> προσομοιάζει την ισχύ των σταθμών αυτών όπως προκύπτει από την επίλυση του αιτιοκρατικού υποδείγματος δεδομένου ότι η αβεβαιότητα ως προς την εξέλιξη των τιμών των πιθανοτικών μεγεθών είναι μικρή.



Γράφημα 31: Εγκατεστημένη ισχύς σε GW σταθμών αερίων καυσίμων όπως προέκυψε από την επίλυση των υποδειγμάτων στο σενάριο χαμηλής αβεβαιότητας για τις τιμές άνθρακα, φυσικού αερίου και μεγάλης αβεβαιότητας για τις τιμές δικαιωμάτων εκπομπών για την αγορά που αναπαριστά τον ηλεκτρικό τομέα της Γερμανίας

Στο σενάριο χαμηλής αβεβαιότητας για τις τιμές άνθρακα, φυσικού αερίου και μεγάλης αβεβαιότητας για τις τιμές αγοράς δικαιωμάτων εκπομπών η εγκατεστημένη ισχύς των μονάδων αερίων καυσίμων αυξάνεται ελαφρώς (Γράφημα 31). Αυτό συμβαίνει διότι δεδομένων των περιορισμών κυκλικής λειτουργίας και της απαίτησης να καλύπτονται οι

περιορισμοί συνολικής εφεδρείας του συστήματος, η παραγόμενη ενέργεια των σταθμών αυτών αυξάνεται ελαφρώς για την κάλυψη των απαιτήσεων του συστήματος σε άνοδο του φορτίου. Η εγκατεστημένη ισχύς των μονάδων στερεών καυσίμων μειώνεται με μικρό ρυθμό σε μεσοπρόθεσμο ορίζοντα και με μεγαλύτερο ρυθμό σε μακροχρόνιο ορίζοντα λόγω της μεγάλης αβεβαιότητας ως προς την εξέλιξη του κόστους αγοράς δικαιωμάτων εκπομπών. Για την κάλυψη της μειούμενης παραγωγής των σταθμών στερεών καυσίμων αξιοποιούνται μονάδες ΑΠΕ των οποίων η εγκατεστημένη ισχύς αυξάνεται διαχρονικά με έντονο ρυθμό. Ωστόσο, λόγω της περιορισμένης δυνατότητας ανάπτυξης των αντλησιοταμιευτικών μονάδων, αυτή η αύξηση της ισχύος περιορίζεται.

#### 13.4.2.4 Υπόδειγμα αξιολόγησης με τη μέθοδο των δικαιωμάτων προαίρεσης

Στο υπόδειγμα αξιολόγησης των επενδύσεων με τη μέθοδο των δικαιωμάτων προαίρεσης η εγκατεστημένη ισχύς και η παραγόμενη ενέργεια των μονάδων ηλεκτροπαραγωγής διαφοροποιείται από τις αντίστοιχες των προαναφερθέντων υποδειγμάτων στα ίδια σενάρια. Στο υπόδειγμα αυτό κάθε επένδυση αξιολογείται ξεχωριστά.

Η παραγόμενη ενέργεια από τις μονάδες στερεών καυσίμων και σταθμών CCS άνθρακα στο σενάριο χαμηλής αβεβαιότητας για τις τιμές άνθρακα και μεγάλης αβεβαιότητας για τις τιμές φυσικού αερίου και δικαιωμάτων εκπομπών μειώνεται διαχρονικά δεδομένης της μεγάλης αβεβαιότητας ως προς το κόστος αγοράς δικαιωμάτων εκπομπών. Για την κάλυψη της ζήτησης αυξάνεται η παραγόμενη ενέργεια από μονάδες ΑΠΕ. Ωστόσο, η αύξηση αυτή δεν επαρκεί για την κάλυψη της μείωσης της παραγόμενης ενέργειας από τους άλλους σταθμούς και η ζητούμενη ενέργεια δεν καλύπτεται. Στην περίπτωση αυτή επεμβαίνει ο διαχειριστής της αγοράς ο οποίος κατασκευάζει μονάδες συνδυασμένου κύκλου για την κάλυψη της υπολειπόμενης ενέργειας.

#### 13.4.3 Σενάριο πολύ μεγάλης αβεβαιότητας

Στην υποενότητα αυτή θεωρείται πολύ μεγάλη αβεβαιότητα ως προς την εξέλιξη των πιθανοτικών μεγεθών. Για κάθε μέθοδο αξιολόγησης της αβεβαιότητας θα συγκριθούν τα αποτελέσματα αυτού του σεναρίου με το σενάριο μεγάλης αβεβαιότητας όπως παρουσιάστηκε στην υποενότητα 13.4.2.

### 13.4.3.1 Υπόδειγμα μεγιστοποίησης της πιθανότητας αποφυγής ζημίας

Στο υπόδειγμα μεγιστοποίησης της πιθανότητας αποφυγής ζημίας προσομοιώνεται η έντονη αποστροφή προς τον κίνδυνο που εκδηλώνει η επιχείρηση. Η επιχείρηση αποφεύγει τις επιλογές εκείνες με αβέβαιη εξέλιξη στο μέλλον και, επιπλέον, αδιαφορεί ως προς το μέγεθος του κέρδους – οφέλους από τις επιλογές που θα λάβει και αλλά βασίζει τις αποφάσεις σε ελαχιστοποίηση της τυχόν ζημίας ακολουθώντας επενδυτική στρατηγική για την οποία δεν θα «μετανιώσει» εκ των υστέρων. Για τον λόγο αυτό η επιχείρηση επιλέγει μονάδες μικρής εντάσεως κεφαλαίου και μεγαλύτερου μέσου κόστους αποφεύγοντας μονάδες με μικρότερο μέσο κόστος αλλά μεγαλύτερο κεφαλαιουχικό. Συνεπώς, η εγκατεστημένη ισχύς των μονάδων αεριοστρόβιλων αυξάνεται (Πίνακας 13-21). Για τον ίδιο λόγο, η εγκατεστημένη ισχύς των μονάδων στερεών καυσίμων καθώς και η εγκατεστημένη ισχύς των μονάδων συνδυασμένου κύκλου μειώνεται. Δεδομένης της μεγάλης αβεβαιότητας η επιχείρηση αποφεύγει την κατασκευή πολλών νέων μονάδων αλλά προτιμά να ανακαινίσει ήδη υπάρχουσες μονάδες, οπότε οι επενδύσεις για επέκταση – ανακαίνιση ήδη εγκατεστημένων μονάδων αυξάνονται συγκριτικά με την ισχύ όπως είχε προκύψει στο σενάριο μεγάλης αβεβαιότητας όπως παρουσιάστηκε στην υποενότητα 13.4.2.

Πίνακας 13-21: Εγκατεστημένη ισχύς αεριοστρόβιλων (σε GW) όπως προέκυψε από την επίλυση του υποδείγματος μεγιστοποίησης της πιθανότητας αποφυγής ζημίας στο σενάριο μεγάλης αβεβαιότητας που παρουσιάστηκε στην υποενότητα 13.2.2 και πολύ μεγάλης αβεβαιότητας για την αγορά που αναπαριστά τον ηλεκτρικό τομέα της Γερμανίας

Σενάριο	2025	2030	2035	2040	2045	2050
<b>Μεγάλης αβεβαιότητας υποενότητας 13.4.2</b>	7,90	7,90	3,49	1,84	0,63	0,17
<b>Πολύ μεγάλης αβεβαιότητας</b>	8,93	8,74	7,44	4,15	1,94	1,66

### 13.4.3.2 Υπόδειγμα εφαρμογής της προσέγγισης του Markowitz

Στο υπόδειγμα με χρήση της προσέγγισης του Markowitz η επιχείρηση εκδηλώνει την αποστροφή προς τον κίνδυνο αποφεύγοντας τις επιλογές εκείνες με αβέβαιη εξέλιξη στο μέλλον επιδιώκοντας παράλληλα μεγιστοποίηση του κέρδους – οφέλους της. Λόγω της πολύ μεγάλης αβεβαιότητας ως προς το κόστος λειτουργίας τους η εγκατεστημένη ισχύς των μονάδων στερεών και αερίων καυσίμων μειώνεται διαχρονικά. Η επιχείρηση επιδιώκοντας να αποφύγει όσο το δυνατόν περισσότερο αβέβαιες επιλογές, δεν

επενδύει στην κατασκευή νέων μονάδων αλλά επεκτείνει τις ήδη εγκατεστημένες μονάδες που διαθέτει. Ως αποτέλεσμα, η ισχύς επένδυσης για επέκταση ήδη εγκατεστημένων μονάδων αυξάνεται (Πίνακας 13-22) συγκριτικά με την ισχύ όπως είχε προκύψει στο σενάριο μεγάλης αβεβαιότητας το οποίο παρουσιάστηκε στην υποενότητα 13.4.2.

Πίνακας 13-22: Διαχρονική ισχύς επενδύσεων επέκτασης – ανακαίνισης ήδη εγκατεστημένων μονάδων (σε GW) όπως προέκυψε από την επίλυση του υποδείγματος με χρήση της προσέγγισης του Markowitz στο σενάριο μεγάλης αβεβαιότητας όπως παρουσιάστηκε στην υποενότητα 13.4.2 και πολύ μεγάλης αβεβαιότητας για την αγορά που αναπαριστά τον ηλεκτρικό τομέα της Γερμανίας

<b>Μονάδες</b>	<b>Σενάριο μεγάλης αβεβαιότητας υποενότητας 13.4.2</b>	<b>Σενάριο πολύ μεγάλης αβεβαιότητας</b>
<b>ΑΠΕ</b>	3,32	3,78
<b>Αερίων καυσίμων</b>	6,13	6,34
<b>Στερεών καυσίμων</b>	4,05	13,02
<b>Πυρηνικών</b>	2,13	1,81

### 13.4.3.3 Υπόδειγμα αξιολόγησης με τη μέθοδο των δικαιωμάτων προαίρεσης

Στο υπόδειγμα αξιολόγησης των επενδύσεων με τη μέθοδο των δικαιωμάτων προαίρεσης η επιχείρηση αξιολογεί κάθε μία επένδυση ξεχωριστά. Η εγκατεστημένη ισχύς των μονάδων στερεών καυσίμων καθώς και η εγκατεστημένη ισχύς των μονάδων συνδυασμένου κύκλου μειώνεται. Δεδομένης της μεγάλης αβεβαιότητας η επιχείρηση επενδύσεις ε μονάδες με πιο βέβαια αποτελέσματα και συγκεκριμένα προτιμά μονάδες μικρού κεφαλαιουχικού κόστους, πιο συγκεκριμένα η ισχύς επένδυσης για κατασκευή αεριοστρόβιλων αυξάνεται (Πίνακας 13-23). Επιπλέον, η επιχείρηση λόγω της αβεβαιότητας ως προς την ανάκτηση του κεφαλαίου της επενδύει περισσότερη ισχύ σε επέκταση ήδη εγκατεστημένων μονάδων (Πίνακας 13-24) συγκριτικά με την ισχύ όπως είχε προκύψει στο σενάριο μεγάλης αβεβαιότητας που παρουσιάστηκε στην υποενότητα 13.4.2

Πίνακας 13-23: Εγκατεστημένη ισχύς αεριοστρόβιλων (σε GW) όπως προέκυψε από την επίλυση του υποδείγματος δικαιωμάτων προαίρεσης στο σενάριο μεγάλης αβεβαιότητας που παρουσιάστηκε στην υποενότητα 13.2.2 και πολύ μεγάλης αβεβαιότητας για την αγορά που αναπαριστά τον ηλεκτρικό τομέα της Γερμανίας

Σενάριο	2025	2030	2035	2040	2045	2050
<b>Μεγάλης αβεβαιότητας υποενότητας 13.4.2</b>	7,90	7,90	3,28	3,13	22,78	46,47
<b>Πολύ μεγάλης αβεβαιότητας</b>	8,49	17,95	27,06	38,05	41,47	45,85

Πίνακας 13-24: Διαχρονική ισχύς επενδύσεων επέκτασης – ανακαίνισης ήδη εγκατεστημένων μονάδων (σε GW) όπως προέκυψε από την επίλυση του υποδείγματος δικαιωμάτων προαίρεσης στο σενάριο μεγάλης αβεβαιότητας που παρουσιάστηκε στην υποενότητα 13.4.2 και πολύ μεγάλης αβεβαιότητας για την αγορά που αναπαριστά τον ηλεκτρικό τομέα της Γερμανίας

Μονάδες	Σενάριο μεγάλης αβεβαιότητας υποενότητας 13.4.2	Σενάριο πολύ μεγάλης αβεβαιότητας
<b>ΑΠΕ</b>	1,12	3,52
<b>Αερίων καυσίμων</b>	7,47	9,49
<b>Στερεών καυσίμων</b>	10,02	12,07
<b>Αεριοστρόβιλοι</b>	0,17	0,36

#### 13.4.4 Υπόδειγμα δύο σταδίων

Η εγκατεστημένη ισχύς των σταθμών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας του υποδείγματος δύο σταδίων διαφοροποιείται συγκριτικά με την ισχύ των σταθμών στα προαναφερθέντα υποδείγματα.

Η παραγόμενη ενέργεια των σταθμών αερίων και στερεών καυσίμων τόσο μεσοπρόθεσμα όσο και μακροπρόθεσμα μειώνεται στο υπόδειγμα δύο σταδίων δεδομένης της μεγάλης αβεβαιότητας. Η μείωση της παραγόμενης ενέργειας των σταθμών αερίων καυσίμων δεν είναι μεγαλύτερη διότι απαιτούμε να καλύπτονται οι περιορισμοί κυκλικής λειτουργίας των μονάδων καθώς και οι περιορισμοί συνολικής εφεδρείας του συστήματος. Ωστόσο η εγκατεστημένη ισχύς των σταθμών αυτών μειώνεται ελαφρώς (Γράφημα 31). Λόγω της μεγάλης αβεβαιότητας μεσοπρόθεσμα, η επιχείρηση αποφεύγει την ανάληψη ρίσκου και αναμένει να λάβει περισσότερες πληροφορίες προτού προβεί σε επενδύσεις μεγαλύτερης έντασης κεφαλαίου, για τον

λόγο αυτό ανακαινίζει ήδη υπάρχουσες μονάδες (Πίνακας 13-25). Οι αποφάσεις για τις επενδύσεις σε μακροχρόνιο ορίζοντα λαμβάνονται αφού θα έχουν γίνει γνωστές οι επενδυτικές αποφάσεις που έλαβε η επιχείρηση μεσοπρόθεσμα και θα αρθεί μέρος της αβεβαιότητας ως προς την εξέλιξη των τιμών των πιθανοτικών μεγεθών και συνεπώς δύναται να ληφθούν πιο στοχευμένες αποφάσεις ανάλογα τις τιμές που θα λάβουν τα στοχαστικά μεγέθη.

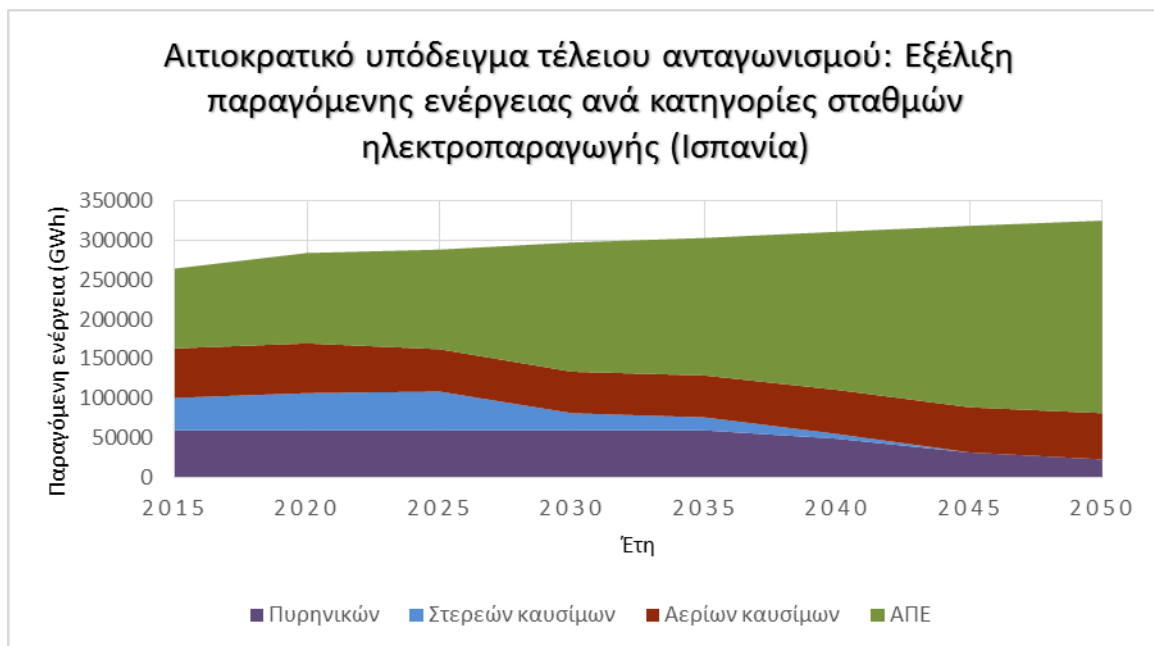
Πίνακας 13-25: Διαχρονική ισχύς επενδύσεων επέκτασης – ανακαίνισης ήδη εγκατεστημένων μονάδων όπως προέκυψε από την επίλυση του υποδείγματος δύο σταδίων και των υπολοίπων υποδειγμάτων στο σενάριο πολύ μεγάλης αβεβαιότητας για την αγορά που αναπαριστά τον ηλεκτρικό τομέα της Γερμανίας (σε GW)

Μονάδες	Μεγιστοποίηση πιθανότητας αποφυγής ζημίας	Προσέγγιση Markowitz	Δικαιώματα προαίρεσης	Δύο σταδίων
ΑΠΕ	3,95	3,78	3,52	3,90
Αερίων καυσίμων	6,40	6,34	9,49	6,32
Στερεών καυσίμων	13,39	13,02	12,07	13,77
Αεριοστρόβιλοι	1,73	1,81	0,36	1,89

## 13.5 Αποτελέσματα επίλυσης υποδείγματος που αναπαριστά τον ηλεκτρικό τομέα της Ισπανίας

### 13.5.1 Αιτιοκρατικό υπόδειγμα

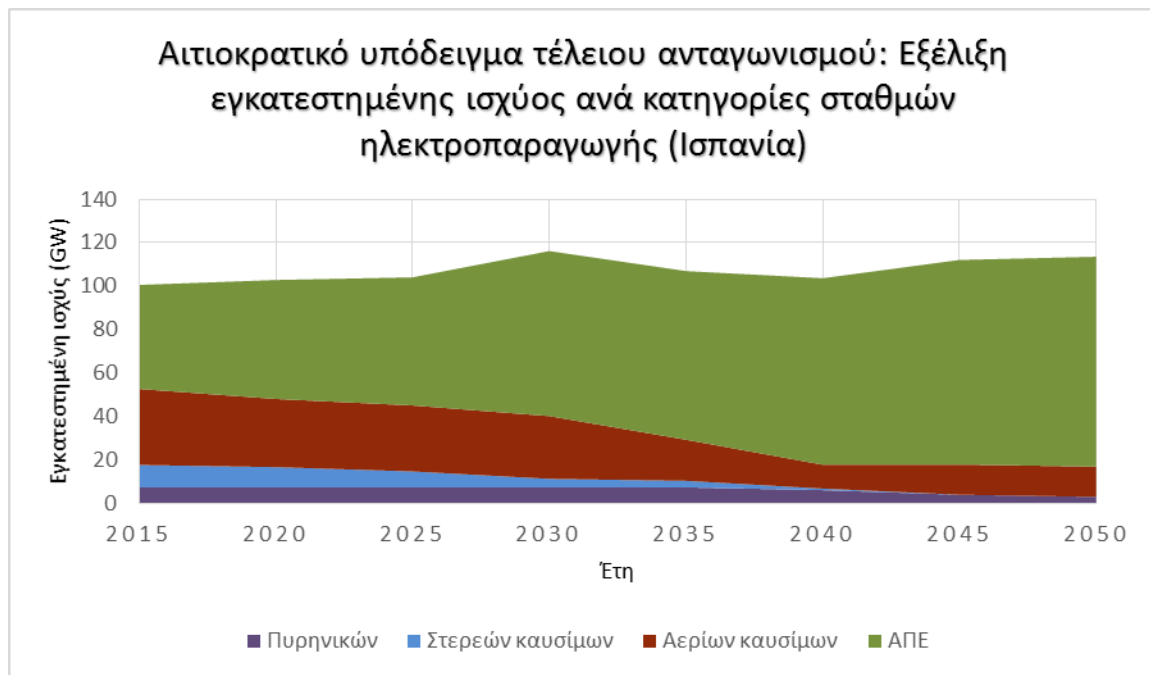
Η παραγόμενη ενέργεια ανά τύπο σταθμού ηλεκτροπαραγωγής όπως προέκυψε από την επίλυση του αιτιοκρατικού υποδείγματος προσομοίωσης του ηλεκτρικού τομέα της Ισπανίας παρουσιάζεται στο Γράφημα 32. Η παραγωγή του ηλεκτρικού τομέα της Ισπανίας στο μεσοπρόθεσμο διάστημα προέρχεται σε μεγάλο βαθμό από μονάδες ΑΠΕ και σε μικρότερο από μονάδες αερίων καυσίμων και πυρηνικούς σταθμούς (Γράφημα 32). Μικρό μέρος της παραγωγής αποτελεί η παραγωγή από σταθμούς στερεών καυσίμων μεσοπρόθεσμα καθώς και η ενέργεια που εγχέεται στο σύστημα από



Γράφημα 32: Παραγόμενη ενέργεια σε GWh ανά κατηγορίες σταθμών ηλεκτροπαραγωγής όπως προέκυψε από την επίλυση του αιτιοκρατικού υποδείγματος αγοράς που αναπαριστά τον ηλεκτρικό τομέα της Ισπανίας στον οποίο δραστηριοποιείται επιχείρηση υπό καθεστώς τέλει ανταγωνισμού

αντλησιοταμιευτικούς σταθμούς τόσο μεσοπρόθεσμα όσο και μακροπρόθεσμα. Σε μακροπρόθεσμο ορίζοντα το σύστημα δεν παράγει ενέργεια από σταθμούς άνθρακα και αυξάνει την παραγωγή από μονάδες ΑΠΕ (Γράφημα 32). Η παραγωγή από μονάδες αερίων καυσίμων διατηρείται δεδομένης της απαίτησης να καλύπτονται οι περιορισμοί κυκλικής λειτουργίας ηλεκτροπαραγωγικών μονάδων καθώς και συνολικής εφεδρείας του συστήματος.

Η εγκατεστημένη ισχύς των μονάδων στερεών καυσίμων μειώνεται στο μεσοπρόθεσμο διάστημα, ενώ οι εναπομείναντες σταθμοί αποξηλώνονται πλήρως στο μακροχρόνιο ορίζοντα λόγω της διαχρονικής αύξησης της τιμής αγοράς των δικαιωμάτων εκπομπών (Γράφημα 33). Για τον ίδιο λόγο, η εγκατεστημένη ισχύς των μονάδων αερίων καυσίμων μειώνεται ελαφρώς τόσο μεσοπρόθεσμα όσο και μακροπρόθεσμα (Γράφημα 33). Η εγκατεστημένη ισχύς των μονάδων ΑΠΕ αυξάνεται με μικρό ρυθμό μεσοπρόθεσμα και με εντονότερο μακροπρόθεσμα, όπως επίσης αυξάνεται διαχρονικά και η ισχύς των αντλησιοταμιευτικών σταθμών (Γράφημα 33). Η αύξηση της ισχύος των μονάδων ΑΠΕ, οι οποίες στην πλειονότητα είναι διακοπτόμενες, περιορίζεται λόγω των περιορισμένων δυνατοτήτων περεταίρω ανάπτυξης των φθηνών επιλογών αποθήκευσης, δηλαδή των αντλησιοταμιευτικών σταθμών.



Γράφημα 33: Εγκατεστημένη ισχύς σε GW ανά κατηγορίες σταθμών ηλεκτροπαραγωγής όπως προέκυψε από την επίλυση του αιτιοκρατικού υποδείγματος αγοράς που αναπαριστά τον ηλεκτρικό τομέα της Ισπανίας στον οποίο δραστηριοποιείται επιχείρηση υπό καθεστώς τέλει ανταγωνισμού

### 13.5.2 Σενάρια μοντελοποίησης της αβεβαιότητας

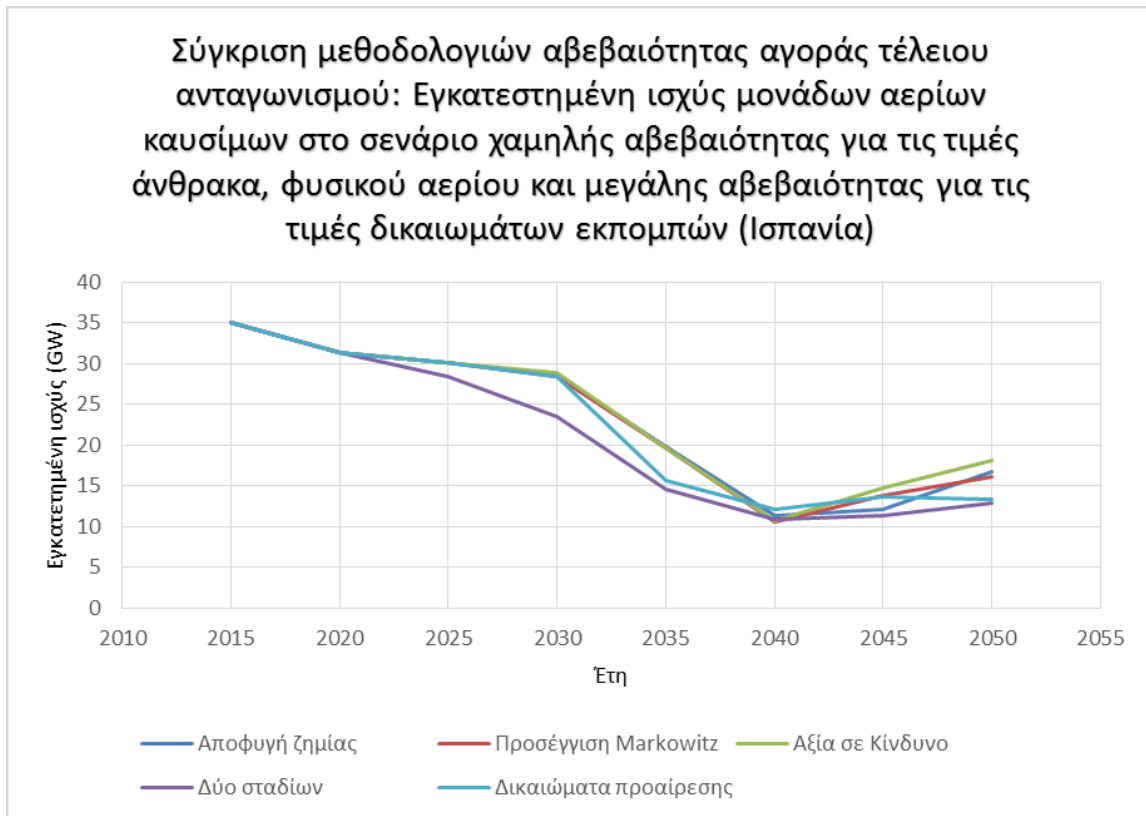
Στις ακόλουθες υποενότητες αναλύονται τα αποτελέσματα της επίλυσης των υποδειγμάτων αξιολόγησης του κινδύνου με διάφορες μεθόδους όπως αναλύθηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια σε διάφορα σενάρια εξέλιξης των τιμών των πιθανοτικών μεγεθών. Τα σενάρια αυτά περιλαμβάνουν μικρή ή μεγάλη αβεβαιότητα ως προς την



εξέλιξη των τιμών του άνθρακα, του φυσικού αερίου και των τιμών αγοράς δικαιωμάτων εκπομπών CO2.

### 13.5.2.1 Υπόδειγμα μεγιστοποίησης της πιθανότητας αποφυγής ζημίας

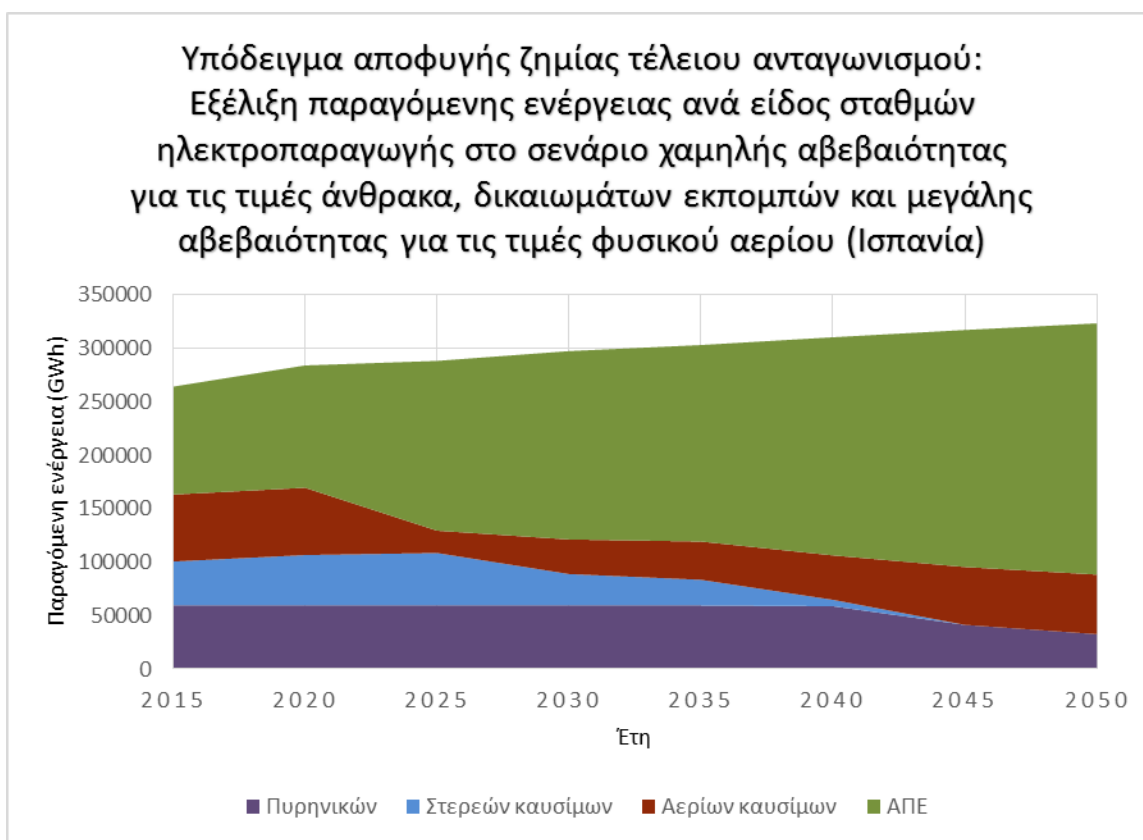
Στην υποενότητα αυτή παρουσιάζονται τα αποτελέσματα τόσο σε ενεργειακό επίπεδο όσο και σε επίπεδο εγκατεστημένης ισχύος από την επίλυση του υποδείγματος με αντικειμενική συνάρτηση την μεγιστοποίηση πιθανότητας αποφυγής ζημίας μιας επιχείρησης που λειτουργεί στην αγορά της Ισπανίας υπό καθεστώς τέλειου



Γράφημα 34: Εγκατεστημένη ισχύς σε GW των σταθμών αερίων καυσίμων όπως προέκυψε από την επίλυση των υποδειγμάτων στο σενάριο χαμηλής αβεβαιότητας για τις τιμές άνθρακα, φυσικού αερίου και μεγάλης αβεβαιότητας για τις τιμές δικαιωμάτων εκπομπών για την αγορά που αναπαριστά τον ηλεκτρικό τομέα της Ισπανίας

ανταγωνισμού. Στο σενάριο χαμηλής αβεβαιότητας για την εξέλιξη των τιμών των πιθανοτικών μεγεθών τα αποτελέσματα τόσο σε ενεργειακό επίπεδο όσο και σε επίπεδο ισχύος του υποδείγματος μεγιστοποίησης της πιθανότητας αποφυγής ζημίας είναι παρόμοια των αντιστοίχων αποτελεσμάτων της επίλυσης του αιτιοκρατικού υποδείγματος.

Στο σενάριο χαμηλής αβεβαιότητας για τις τιμές άνθρακα, φυσικού αερίου και μεγάλης αβεβαιότητας για τις τιμές δικαιωμάτων εκπομπών, η ενέργεια που εγχέεται στο σύστημα από μονάδες αερίων καυσίμων του υποδείγματος μεγιστοποίησης της πιθανότητας αποφυγής ζημίας μειώνεται ελαφρώς διαχρονικά. Η μείωση αυτή περιορίζεται λόγω της απαίτησης να καλύπτονται οι απαιτήσεις του συστήματος στην άνοδο του φορτίου (εφεδρεία συστήματος). Η παραγόμενη ενέργεια από αντλησιοταμιευτικούς σταθμούς αυξάνεται καθώς αυξάνεται η παραγόμενη ενέργεια από μονάδες ΑΠΕ. Η ενέργεια που παράγεται από πυρηνικούς σταθμούς μειώνεται διαχρονικά. Η ισχύς των σταθμών στερεών καυσίμων μειώνεται μεσοπρόθεσμα και μακροχρόνια γίνεται μηδενική λόγω της μεγάλης αβεβαιότητας για την εξέλιξη της τιμής αγοράς δικαιωμάτων εκπομπών. Για την αντιστάθμιση της μείωσης στην παραγόμενη ενέργεια λόγω της αποξήλωσης των σταθμών στερεών καυσίμων και πυρηνικών σταθμών, η εγκατεστημένη ισχύς των μονάδων ΑΠΕ και των αντλησιοταμιευτικών



Γράφημα 35: Παραγόμενη ενέργεια σε GWh ανά κατηγορίες σταθμών ηλεκτροπαραγωγής όπως προέκυψε από την επίλυση του υποδείγματος μεγιστοποίησης της πιθανότητας αποφυγής ζημίας για την αγορά που αναπαριστά τον ηλεκτρικό τομέα της Ισπανίας στον οποίο δραστηριοποιείται επιχείρηση υπό καθεστώς τέλειου ανταγωνισμού

μονάδων αυξάνεται διαχρονικά. Η εγκατεστημένη ισχύς των μονάδων αερίων καυσίμων μειώνεται ελαφρώς τόσο μεσοπρόθεσμα όσο και μακροχρόνια (Γράφημα 34).

Στο σενάριο χαμηλής αβεβαιότητας για τις τιμές άνθρακα, αγοράς δικαιωμάτων εκπομπών και μεγάλης αβεβαιότητας για τις τιμές φυσικού αερίου, η παραγόμενη ενέργεια από σταθμούς αερίων καυσίμων του υποδείγματος μεγιστοποίησης της πιθανότητας αποφυγής ζημίας, του οποίου η συνάρτηση χρησιμότητας που υποθέσαμε εμπίπτει στις κατηγορίες CARA και IRRA<sup>12</sup>, μειώνεται μεσοπρόθεσμα λόγω της μεγάλης αβεβαιότητας που παρουσιάζει το κόστος λειτουργίας των μονάδων αυτών (Γράφημα 35). Μακροπρόθεσμα ωστόσο η παραγόμενη ενέργεια των σταθμών αυτών αυξάνεται ώστε να καλύπτονται οι απαιτήσεις του συστήματος σε άνοδο του φορτίου (εφεδρεία συστήματος) (Γράφημα 35). Η παραγόμενη ενέργεια από σταθμούς στερεών καυσίμων μειώνεται διαχρονικά και σε μακροπρόθεσμο ορίζοντα γίνεται μηδενική λόγω της διαχρονικής αύξησης της τιμής αγοράς δικαιωμάτων εκπομπών (Γράφημα 35). Η παραγωγή ενέργειας από μονάδες ΑΠΕ αυξάνεται μεσοπρόθεσμα με μικρό ρυθμό και μακροχρόνια η αύξηση είναι έντονη ενώ μακροχρόνια αυξάνεται η παραγόμενη ενέργεια από πυρηνικούς σταθμούς, ώστε να καλυφθεί η μείωση της παραγόμενης ενέργειας από σταθμούς αερίων και στερεών καυσίμων (Γράφημα 35).

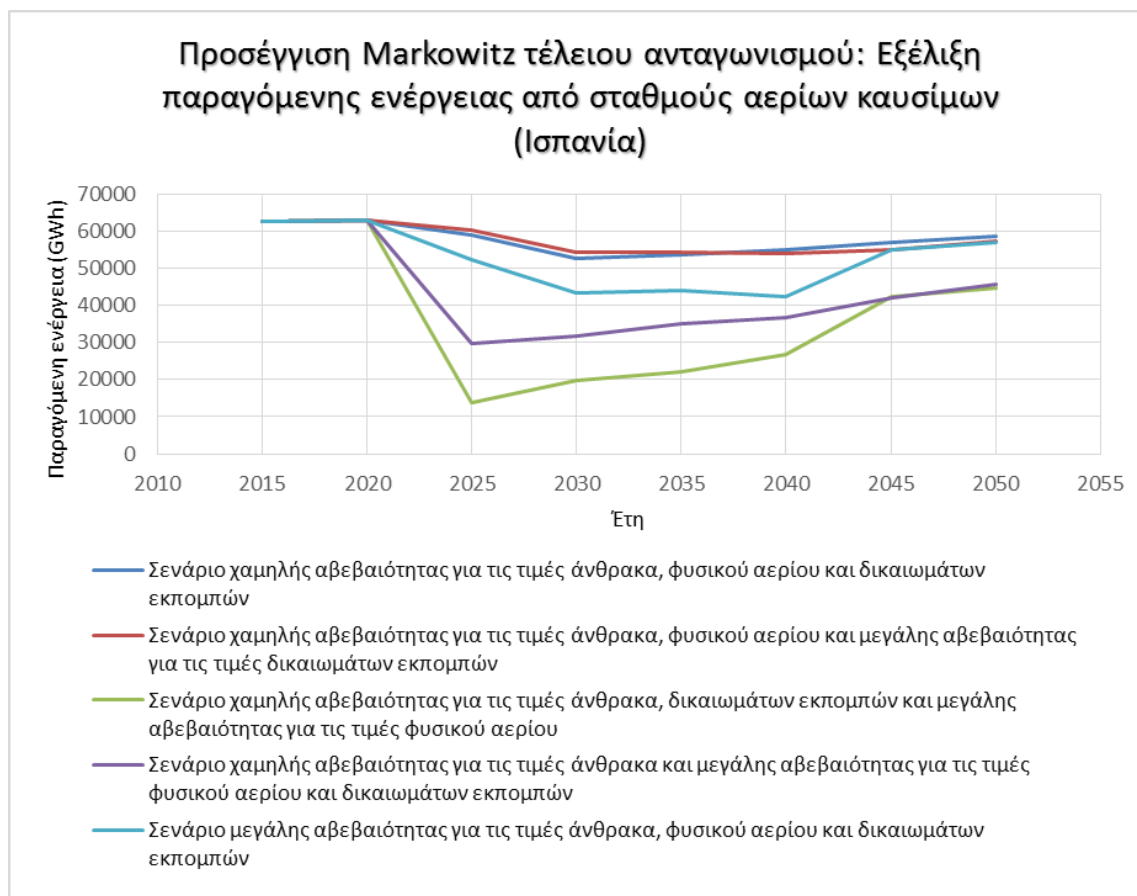
### 13.5.2.2 Υπόδειγμα εφαρμογής της προσέγγισης του Markowitz

Στο σενάριο χαμηλής αβεβαιότητας για τις τιμές άνθρακα, φυσικού αερίου και αγοράς δικαιωμάτων εκπομπών η εγκατεστημένη ισχύς των μονάδων ηλεκτροπαραγωγής καθώς και η παραγόμενη ενέργειά τους όπως προκύπτει από την επίλυση του υποδείγματος με χρήση της προσέγγισης του Markowitz είναι παρόμοια της αντίστοιχης όπως προέκυψε από την επίλυση του αιτιοκρατικού υποδείγματος.

---

<sup>12</sup> IRRA-Increasing Relative Risk Aversion και CARA- Constant Absolute Risk Aversion, όπως αναλύθηκε στην υποενότητα 6.4

Η παραγόμενη ενέργεια των σταθμών συνδυασμένου κύκλου του υποδείγματος με χρήση της προσέγγισης του Markowitz, του οποίου η συνάρτηση χρησιμότητας που προσομοιώνει τη συμπεριφορά της επιχείρησης εμπίπτει στις κατηγορίες DARA και CRRA<sup>13</sup>, μειώνεται διαχρονικά στο σενάριο χαμηλής αβεβαιότητας για τις τιμές άνθρακα, φυσικού αερίου και μεγάλης αβεβαιότητας για τις τιμές δικαιωμάτων εκπομπών



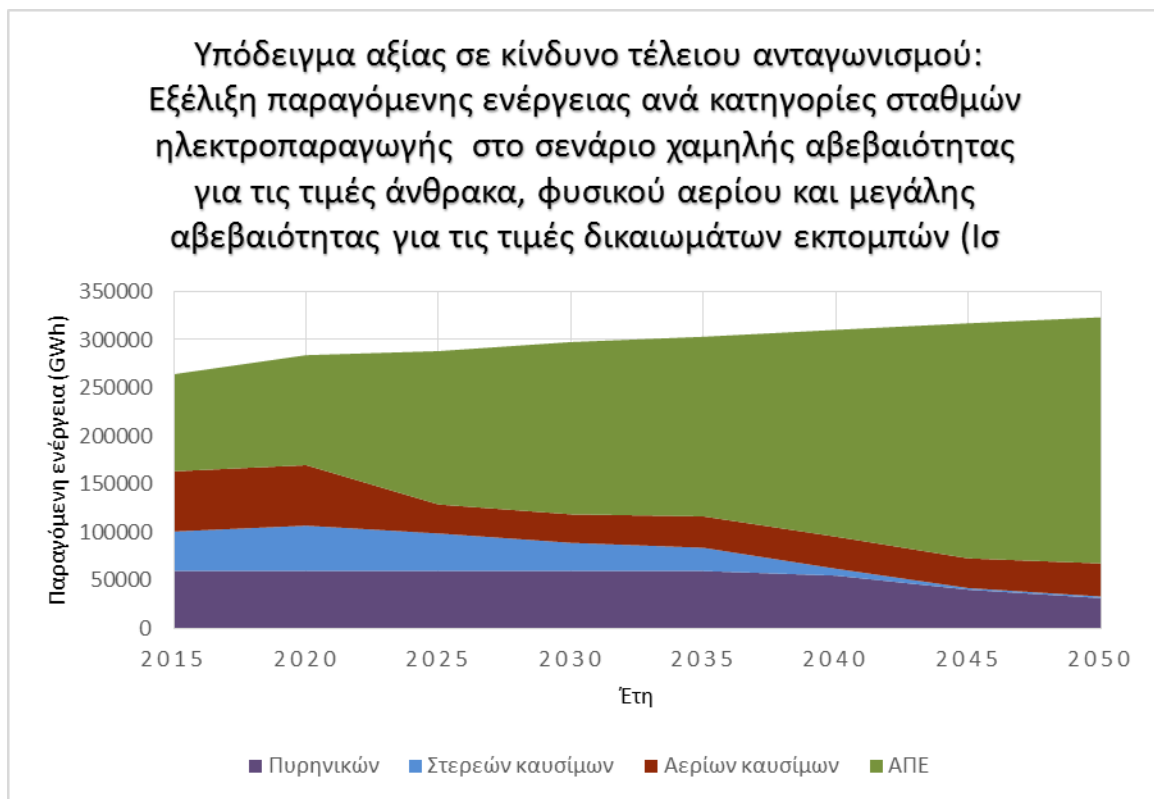
Γράφημα 36: Παραγόμενη ενέργεια σε GWh από σταθμούς αερίων καυσίμων όπως προέκυψε από την επίλυση του υποδείγματος με χρήση της προσέγγισης του Markowitz για την αγορά που αναπαριστά τον ηλεκτρικό τομέα της Ισπανίας

(Γράφημα 36). Η μείωση αυτή δεν είναι μεγαλύτερη διότι απαιτούμε να καλύπτονται οι περιορισμοί κυκλικής λειτουργίας των μονάδων ηλεκτροπαραγωγής καθώς και οι περιορισμοί συνολικής εφεδρείας του συστήματος. Λόγω της μεγάλης αβεβαιότητας ως προς την τιμή αγοράς δικαιωμάτων εκπομπών η παραγόμενη ενέργεια από σταθμούς στερεών καυσίμων μειώνεται διαχρονικά. Η παραγόμενη ενέργεια από πυρηνικούς

<sup>13</sup> CRRA-Constant Relative Risk Aversion και DARA-Decreasing Absolute Risk Aversion, όπως αναλύθηκε στην υποενότητα 6.4

σταθμούς μεσοπρόθεσμα και μακροπρόθεσμα αυξάνεται, όπως επίσης και η παραγωγή από μονάδες ΑΠΕ ώστε να παράγουν την υπολειπόμενη ενέργεια από τη μείωση της παραγωγής αερίων και στερεών καυσίμων. Δεδομένου ότι η πλειονότητα των μονάδων αυτών είναι διακοπτόμενες, αυξάνεται η ενέργεια που εγχέεται στο σύστημα από μονάδες αντλησιοταμίευσης.

Στο σενάριο χαμηλής αβεβαιότητας για τις τιμές άνθρακα, δικαιωμάτων εκπομπών και μεγάλης αβεβαιότητας για τις τιμές φυσικού αερίου του υποδείγματος με χρήση της προσέγγισης του Markowitz η παραγόμενη ενέργεια από σταθμούς αερίων καυσίμων μειώνεται με μεγάλο ρυθμό μεσοπρόθεσμα λόγω της μεγάλης αβεβαιότητας ως προς το κόστος λειτουργίας των μονάδων αυτών (Γράφημα 36) και για την κάλυψη της ζήτησης αυξάνεται η παραγωγή των πυρηνικών σταθμών και των μονάδων ΑΠΕ. Μακροχρόνια, η παραγόμενη ενέργεια από σταθμούς αερίων καυσίμων αυξάνεται ώστε να καλύπτονται οι απαιτήσεις του συστήματος σε αύξησης του φορτίου.



Γράφημα 37: Παραγόμενη ενέργεια σε GWh ανά τύπο σταθμού όπως προέκυψε από την επίλυση του υποδείγματος με χρήση της αξίας σε κίνδυνο στο οποίο προσομοιώνεται αγορά που αναπαριστά τον ηλεκτρικό τομέα της Ισπανίας στον οποίο δραστηριοποιείται επιχείρηση υπό καθεστώς τέλειου ανταγωνισμού

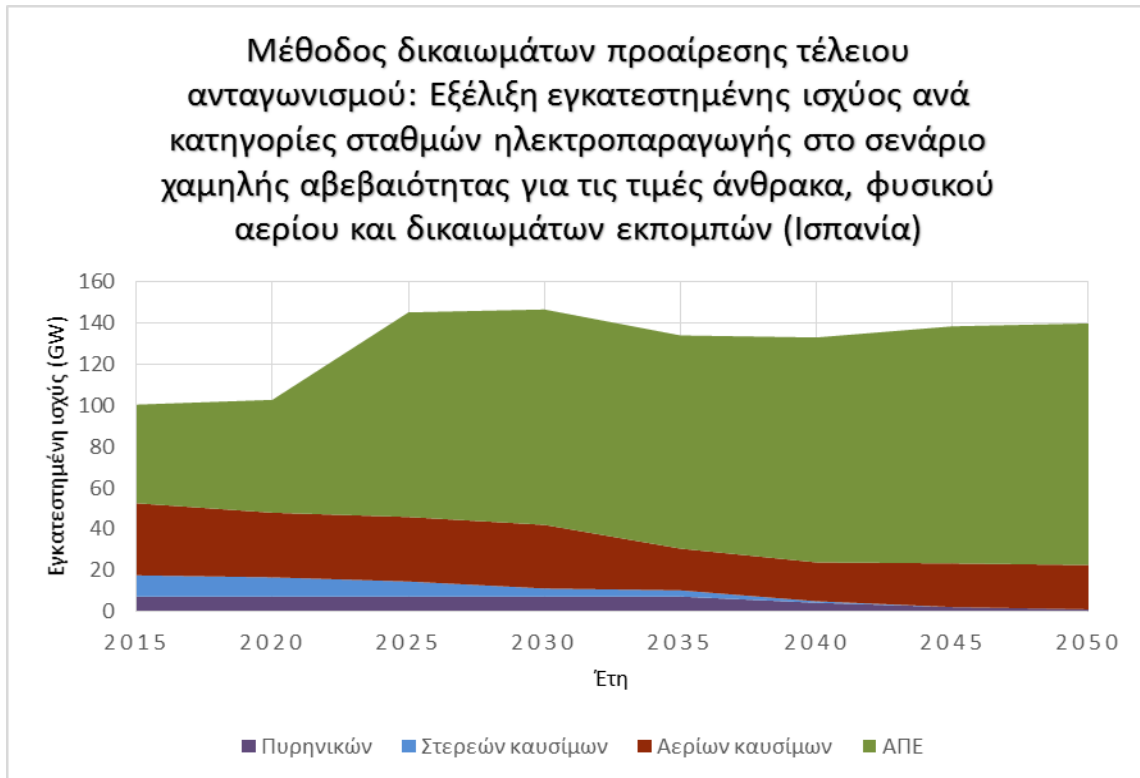
### 13.5.2.3 Υπόδειγμα αξίας σε κίνδυνο

Η εγκατεστημένη ισχύς και η παραγόμενη ενέργεια του υποδείγματος αξίας σε κίνδυνο στο σενάριο χαμηλής αβεβαιότητας για τις τιμές άνθρακα, φυσικού αερίου και δικαιωμάτων εκπομπών είναι παρόμοια των ενεργειακών αποτελεσμάτων του αιτιοκρατικού υποδείγματος.

Η παραγόμενη ενέργεια από μονάδες αερίων καυσίμων του υποδείγματος αξίας σε κίνδυνο στο σενάριο χαμηλής αβεβαιότητας για τις τιμές άνθρακα, φυσικού αερίου και μεγάλης αβεβαιότητας για τις τιμές δικαιωμάτων εκπομπών αυξάνεται ελαφρώς μεσοπρόθεσμα και μειώνεται ελαφρώς μακροχρόνια (Γράφημα 37). Στο υπόδειγμα αυτό προσομοιώνεται η συμπεριφορά της επιχείρησης η οποία χαρακτηρίζεται από αποστροφή προς τον κίνδυνο λαμβάνοντας υπόψιν το κέρδος – όφελος που θα έχει από τις επιλογές της. Ως αποτέλεσμα, στο σενάριο αυτό η παραγόμενη ενέργεια των σταθμών στερεών καυσίμων μειώνεται μεσοπρόθεσμα και μηδενίζεται μακροπρόθεσμα. Η παραγόμενη ενέργεια από μονάδες CCS φυσικού αερίου και από πυρηνικούς σταθμούς αυξάνεται ελαφρώς διαχρονικά.

### 13.5.2.4 Υπόδειγμα αξιολόγησης με τη μέθοδο των δικαιωμάτων προαίρεσης

Στο υπόδειγμα αξιολόγησης των επενδύσεων με τη μέθοδο των δικαιωμάτων προαίρεσης η εγκατεστημένη ισχύς και η παραγόμενη ενέργεια από σταθμούς αερίων καυσίμων και πυρηνικούς σταθμούς διαφοροποιείται στο σενάριο χαμηλής αβεβαιότητας για τις τιμές άνθρακα, φυσικού αερίου και αγοράς δικαιωμάτων εκπομπών συγκριτικά με τα αποτελέσματα των υπολοίπων υποδειγμάτων στο σενάριο αυτό καθώς και με τα αποτελέσματα του αιτιοκρατικού υποδείγματος. Η εγκατεστημένη ισχύς των σταθμών αερίων και στερεών καυσίμων μειώνεται διαχρονικά λόγω της αβεβαιότητας ως προς το κόστος λειτουργίας τους. Για την παραγωγή της υπολειπόμενης ενέργειας αξιοποιούνται μονάδες ΑΠΕ, η εγκατεστημένη ισχύς των οποίων αυξάνεται με έντονο ρυθμό ήδη από το μεσοπρόθεσμο διάστημα ενώ η ισχύς των πυρηνικών σταθμών μακροπρόθεσμα παραμένει σταθερή.



Γράφημα 38: Εγκατεστημένη ισχύς σε GW ανά τύπο σταθμού όπως προέκυψε από την επίλυση του υποδείγματος αξιολόγησης των επενδύσεων με τη μέθοδο των δικαιωμάτων προαίρεσης στο σενάριο χαμηλής αβεβαιότητας για τις τιμές άνθρακα, φυσικού αερίου και αγοράς δικαιωμάτων εκπομπών για την αγορά που αναπαριστά τον ηλεκτρικό τομέα της Ισπανίας στον οποίο δραστηριοποιείται επιχείρηση υπό καθεστώς τέλειου ανταγωνισμού

### 13.5.3 Σενάριο πολύ μεγάλης αβεβαιότητας

Στην υποενότητα αυτή θεωρείται πολύ μεγάλη αβεβαιότητα ως προς την εξέλιξη των πιθανοτικών μεγεθών. Για κάθε μέθοδο αξιολόγησης της αβεβαιότητας θα συγκριθούν τα αποτελέσματα αυτού του σεναρίου με το σενάριο μεγάλης αβεβαιότητας όπως παρουσιάστηκε στην υποενότητα 13.5.2.

#### 13.5.3.1 Υπόδειγμα μεγιστοποίησης της πιθανότητας αποφυγής ζημίας

Στο υπόδειγμα μεγιστοποίησης της πιθανότητας αποφυγής ζημίας προσομοιώνεται η συμπεριφορά της επιχείρησης η οποία εκδηλώνει έντονη αποστροφή προς τον κίνδυνο αποφεύγοντας τις επιλογές εκείνες με αβέβαιη εξέλιξη στο μέλλον. Δεδομένου ότι η

επιχείρηση αδιαφορεί ως προς το μέγεθος του κέρδους – οφέλους από τις επιλογές που θα λάβει, επιλέγει μονάδες μικρού κεφαλαιουχικού κόστους και μεγάλου μέσου κόστους έναντι μονάδων μεγαλύτερου κεφαλαιουχικού κόστους και μικρότερου μέσου κόστους. Για το λόγο αυτό παρατηρείται αύξηση της εγκατεστημένης ισχύος μονάδων αεριοστρόβιλων όπως επίσης και αύξηση της ισχύος για επενδύσεις επέκτασης – ανακαίνισης ήδη εγκατεστημένων μονάδων (Πίνακας 13-26). Επιπλέον, λόγω της αβεβαιότητας στο κόστος λειτουργίας των μονάδων αυτών παρατηρείται μείωση της εγκατεστημένης ισχύος των μονάδων στερεών καυσίμων καθώς και μείωση της εγκατεστημένης ισχύος των μονάδων συνδυασμένου κύκλου.

Πίνακας 13-26: Διαχρονική ισχύς επενδύσεων επέκτασης – ανακαίνισης ήδη εγκατεστημένων μονάδων (σε GW) όπως προέκυψε από την επίλυση του υποδείγματος μεγιστοποίησης της πιθανότητας αποφυγής ζημίας στο σενάριο μεγάλης αβεβαιότητας όπως παρουσιάστηκε στην υποενότητα 13.5.2 και πολύ μεγάλης αβεβαιότητας για την αγορά που αναπαριστά τον ηλεκτρικό τομέα της Ισπανίας

Μονάδες	Σενάριο μεγάλης αβεβαιότητας υποενότητας 13.5.2	Σενάριο πολύ μεγάλης αβεβαιότητας
ΑΠΕ	2,47	4,79
Αερίων καυσίμων	3,79	14,41
Στερεών καυσίμων	2,09	4,09
Πυρηνικών	2,15	2,15
Αεριοστρόβιλων	0	0,01

### 13.5.3.2 Υπόδειγμα με χρήση της προσέγγισης του Markowitz

Στο υπόδειγμα με χρήση της προσέγγισης του Markowitz η επιχείρηση εκδηλώνει την αποστροφή προς τον κίνδυνο αποφεύγοντας τις επιλογές εκείνες με αβέβαιη εξέλιξη στο μέλλον επιδιώκοντας παράλληλα μεγιστοποίησης του κέρδους – οφέλους της. Η εγκατεστημένη ισχύς των μονάδων στερεών καυσίμων και των μονάδων συνδυασμένου κύκλου μειώνεται διαχρονικά λόγω της μεγάλης αβεβαιότητας ως προς το κόστος λειτουργίας τους. Επιπλέον, λόγω της αυξημένης αβεβαιότητας για την εξέλιξη των τιμών των στοχαστικών μεγεθών αυξάνεται η ισχύς επένδυσης για επέκταση ήδη εγκατεστημένων μονάδων (Πίνακας 13-27) συγκριτικά με την ισχύ όπως έχει προκύψει στο σενάριο μεγάλης αβεβαιότητας το οποίο παρουσιάστηκε στην υποενότητα 13.5.2.



Πίνακας 13-27: Διαχρονική ισχύς επενδύσεων επέκτασης – ανακαίνισης ήδη εγκατεστημένων μονάδων (σε GW) όπως προέκυψε από την επίλυση του υποδείγματος με χρήση της προσέγγισης του Markowitz στο σενάριο μεγάλης αβεβαιότητας όπως παρουσιάστηκε στην υποενότητα 13.5.2 και πολύ μεγάλης αβεβαιότητας για την αγορά που αναπαριστά τον ηλεκτρικό τομέα της Ισπανίας

Μονάδες	Σενάριο μεγάλης αβεβαιότητας υποενότητας 13.5.2	Σενάριο πολύ μεγάλης αβεβαιότητας
<b>ΑΠΕ</b>	2,40	2,89
<b>Αερίων καυσίμων</b>	8,59	10,16
<b>Στερεών καυσίμων</b>	2,09	3,89
<b>Πυρηνικών</b>	2,15	2,15
<b>Αεριοστρόβιλων</b>	0	0,01

### 13.5.3.3 Υπόδειγμα αξιολόγησης με τη μέθοδο των δικαιωμάτων προαίρεσης

Στο υπόδειγμα αξιολόγησης των επενδύσεων με τη μέθοδο των δικαιωμάτων προαίρεσης η επιχείρηση αξιολογεί κάθε μία επένδυση μεμονωμένα. Δεδομένης της αβέβαιης εξέλιξης των πιθανοτικών μεγεθών, η ισχύς επένδυσης για κατασκευή αεριοστρόβιλων (Πίνακας 13-29) και για επέκταση ήδη εγκατεστημένων μονάδων (Πίνακας 13-28) αυξάνεται συγκριτικά με την ισχύ όπως είχε προκύψει στο σενάριο μεγάλης αβεβαιότητας όπως παρουσιάστηκε στην υποενότητα 13.5.2.

Πίνακας 13-28: Διαχρονική ισχύς επενδύσεων επέκτασης – ανακαίνισης ήδη εγκατεστημένων μονάδων (σε GW) όπως προέκυψε από την επίλυση του υποδείγματος δικαιωμάτων προαίρεσης στο σενάριο μεγάλης αβεβαιότητας που παρουσιάστηκε στην υποενότητα 13.5.2 και πολύ μεγάλης αβεβαιότητας για την αγορά που αναπαριστά τον ηλεκτρικό τομέα της Ισπανίας

Μονάδες	Σενάριο μεγάλης αβεβαιότητας υποενότητας 13.5.2	Σενάριο πολύ μεγάλης αβεβαιότητας
<b>ΑΠΕ</b>	1,26	2,66
<b>Αερίων καυσίμων</b>	1,66	1,65
<b>Στερεών καυσίμων</b>	2,09	3,75
<b>Πυρηνικών</b>	1,07	0
<b>Αεριοστρόβιλων</b>	0,18	0,75

Πίνακας 13-29: Εγκατεστημένη ισχύς αεριοστρόβιλων (σε GW) όπως προέκυψε από την επίλυση του υποδείγματος δικαιωμάτων προαίρεσης στο σενάριο μεγάλης αβεβαιότητας που παρουσιάστηκε στην υποενότητα 13.5.2 και πολύ μεγάλης αβεβαιότητας για την αγορά που αναπαριστά τον ηλεκτρικό τομέα της Ισπανίας

Σενάριο	2025	2030	2035	2040	2045	2050
<b>Μεγάλης αβεβαιότητας υποενότητας 13.5.2</b>	2,15	1,71	4,94	15,91	24,95	39,54
<b>Πολύ μεγάλης αβεβαιότητας</b>	6,13	13,59	33,84	34,02	33,80	33,54

#### 13.5.4 Υπόδειγμα δύο σταδίων

Στο υπόδειγμα δύο σταδίων η εγκατεστημένη ισχύς των σταθμών αερίων και στερεών καυσίμων είναι αρκετά μικρότερη από την ισχύ των σταθμών αυτών στο υπόδειγμα μεγιστοποίησης της πιθανότητας αποφυγής ζημίας και στο υπόδειγμα με χρήση της προσέγγισης του Markowitz (Πίνακας 13-30). Στο μεσοπρόθεσμο διάστημα λόγω της μεγάλης αβεβαιότητας ως προς την εξέλιξη των πιθανοτικών μεγεθών δεν κρίνεται επικερδής η επένδυση σε σταθμούς μεγάλης εντάσεως κεφαλαίου. Στο διάστημα αυτό γίνονται περικοπές φορτίου λόγω της μη επαρκούς ισχύος για την κάλυψη της ζητούμενης ενέργειας. Μακροχρόνια, μέρος της αβεβαιότητας θεωρείται ότι θα έχει αρθεί και συνεπώς η επιχείρηση θα μπορεί να λάβει διορθωτικές αποφάσεις.

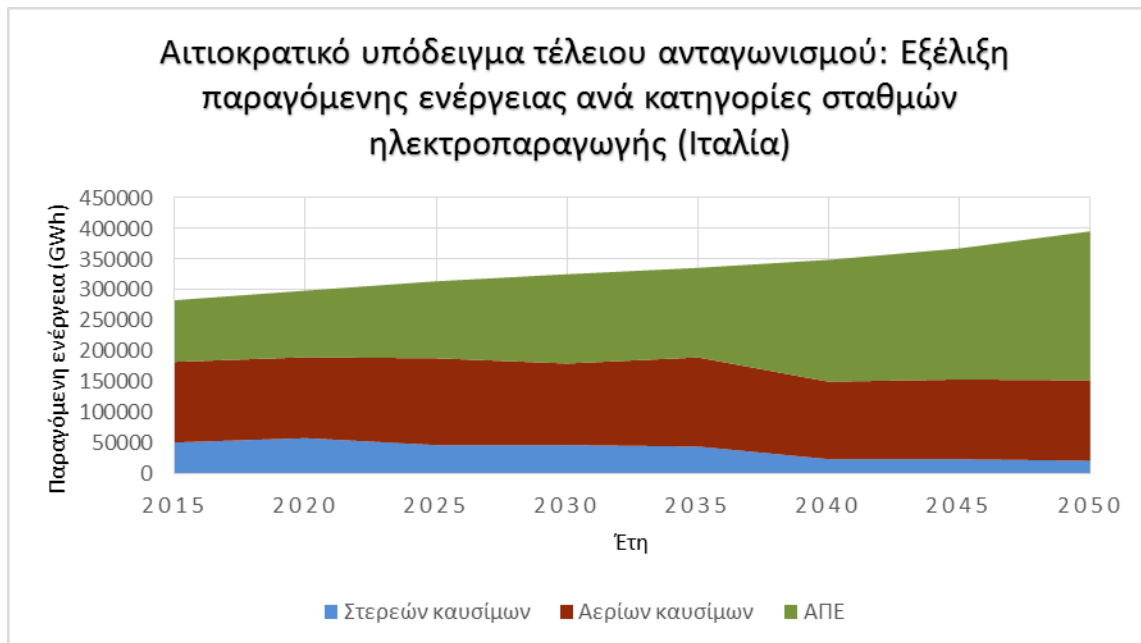
Πίνακας 13-30: Διαχρονική ισχύς επενδύσεων επέκτασης – ανακαίνισης ήδη εγκατεστημένων μονάδων όπως προέκυψε από την επίλυση του υποδείγματος δύο σταδίων και των υπολοίπων υποδειγμάτων στο σενάριο πολύ μεγάλης αβεβαιότητας για την αγορά που αναπαριστά τον ηλεκτρικό τομέα της Ισπανίας (σε GW)

Μονάδες	Μεγιστοποίηση πιθανότητας αποφυγής ζημίας	Προσέγγιση Markowitz	Δικαιώματα προαίρεσης	Δύο σταδίων
<b>ΑΠΕ</b>	4,79	2,89	2,66	5,03
<b>Αερίων καυσίμων</b>	14,41	10,16	1,65	15,18
<b>Στερεών καυσίμων</b>	4,09	3,89	3,75	4,19
<b>Πυρηνικών</b>	2,15	2,15	0	0
<b>Αεριοστρόβιλοι</b>	0,01	0,01	0,75	0

## 13.6 Αποτελέσματα επίλυσης υποδείγματος που αναπαριστά τον ηλεκτρικό τομέα της Ιταλίας

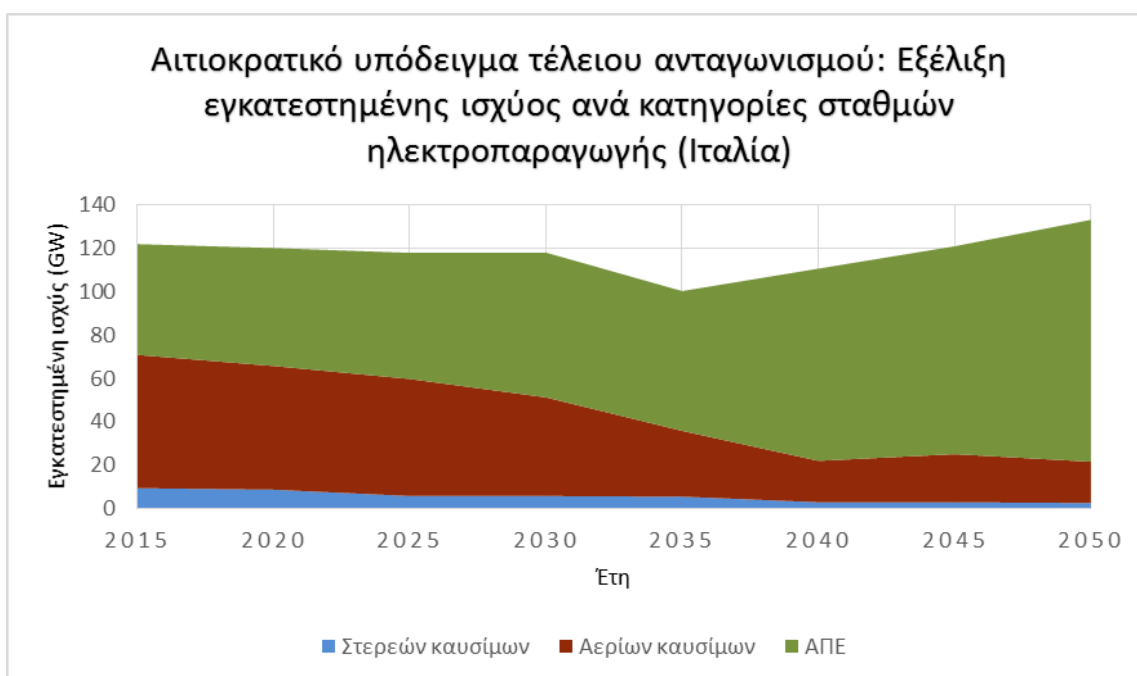
### 13.6.1 Αιτιοκρατικό υπόδειγμα

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται τα αποτελέσματα τόσο σε επίπεδο εγκατεστημένης ισχύος όσο και σε ενεργειακό επίπεδο όπως προέκυψαν από την επίλυση του αιτιοκρατικού υποδείγματος προσομοίωσης του ηλεκτρικού τομέα της Ιταλίας. Η ηλεκτροπαραγωγή της Ιταλίας μεσοπρόθεσμα στηρίζεται σε μεγάλο βαθμό σε σταθμούς αερίων καυσίμων (Γράφημα 39). Επιπλέον μεγάλο μέρος της ηλεκτροπαραγωγής της προέρχεται από μονάδες ΑΠΕ, η παραγωγή των οποίων διαχρονικά αυξάνεται με έντονο ρυθμό. Η παραγόμενη ενέργεια από σταθμούς αερίων καυσίμων μειώνεται μακροχρόνια. Ωστόσο, μειώνεται με μικρό ρυθμό διότι για την καλύτερη λειτουργία του συστήματος το σύστημα αναπαρίσταται με αρκετή λεπτομέρεια όπως έχουμε ήδη εξηγήσει στο κεφάλαιο 4 και πιο συγκεκριμένα απαιτείται να καλύπτονται οι περιορισμοί κυκλικής λειτουργίας ηλεκτροπαραγωγικών μονάδων και συνολικής εφεδρείας του συστήματος. Η παραγόμενη ενέργεια από σταθμούς στερεών καυσίμων μειώνεται διαχρονικά λόγω της αύξησης της τιμής αγοράς εκπομπών CO<sub>2</sub>.



Γράφημα 39: Παραγόμενη ενέργεια σε GWh ανά τύπο σταθμού όπως προέκυψε από την επίλυση του αιτιοκρατικού υποδείγματος αγοράς που αναπαριστά τον ηλεκτρικό τομέα της Ιταλίας στον οποίο δραστηριοποιείται επιχείρηση υπό καθεστώς τέλειου ανταγωνισμού

Η εγκατεστημένη ισχύς των σταθμών αερίων καυσίμων διαχρονικά μειώνεται με μικρό ρυθμό. Η εγκατεστημένη ισχύς των σταθμών στερεών καυσίμων μειώνονται διαχρονικά, ενώ η ισχύς των μονάδων ΑΠΕ αυξάνεται με μικρό ρυθμό μεσοπρόθεσμα και με μεγαλύτερο μακροπρόθεσμα. Η αύξηση αυτή, ωστόσο, περιορίζεται από τις περιορισμένες δυνατότητες ανάπτυξης των επιλογών αποθήκευσης ενέργειας και συγκεκριμένα των αντλησιοταμιευτικών σταθμών. Ακόμη, η Ιταλία ύστερα από το ατύχημα στον πυρηνικό σταθμό της Φουκουσίμα ψήφισε νόμο ο οποίος απαγορεύει την κατασκευή πυρηνικών σταθμών προς αποφυγή πιθανού ατυχήματος. Επιπλέον, δεν υπάρχουν ήδη εγκατεστημένες και δεν γίνονται επενδύσεις σε μονάδες CCS άνθρακα ή CCS φυσικού αερίου. Παραθέτουμε στη συνέχεια τα αποτελέσματα μεταξύ διαφορετικών θεωρήσεων για την εξέλιξη των τιμών των πιθανοτικών μεγεθών.



Γράφημα 40: Εγκατεστημένη ισχύς σε GW ανά τύπο σταθμού όπως προέκυψε από την επίλυση του αιτιοκρατικού υποδείγματος αγοράς που αναπαριστά τον ηλεκτρικό τομέα της Ιταλίας στον οποίο δραστηριοποιείται επιχείρηση υπό καθεστώς τέλει ανταγωνισμού

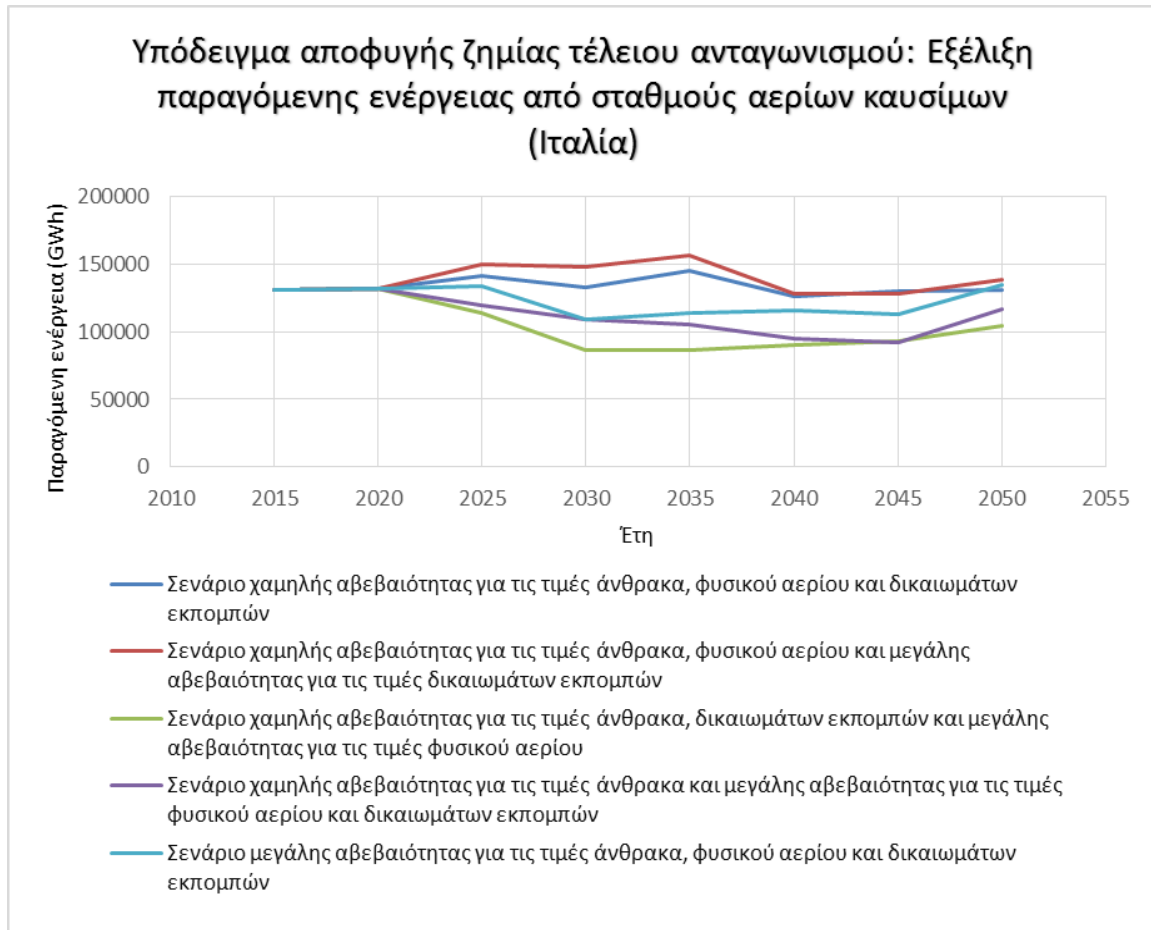
### 13.6.2 Σενάρια μοντελοποίησης της αβεβαιότητας

Στη συνέχεια αναλύονται τα αποτελέσματα της επίλυσης των υποδειγμάτων αξιολόγησης του κινδύνου με διάφορες μεθόδους όπως αναλύθηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια σε διάφορα σενάρια εξέλιξης των τιμών των πιθανοτικών μεγεθών. Τα

σενάρια αυτά περιλαμβάνουν μικρή ή μεγάλη αβεβαιότητα ως προς την εξέλιξη των τιμών του άνθρακα, του φυσικού αερίου και αγοράς των δικαιωμάτων εκπομπών CO<sub>2</sub>.

### 13.6.2.1 Υπόδειγμα μεγιστοποίησης της πιθανότητας αποφυγής ζημίας

Στην υποενότητα αυτή παρουσιάζονται τα αποτελέσματα τόσο σε ενεργειακό επίπεδο όσο και σε επίπεδο εγκατεστημένης ισχύος από την επίλυση του υποδείγματος με



Γράφημα 41: Παραγόμενη ενέργεια σε GWh από σταθμούς αερίων καυσίμων όπως προέκυψε από την επίλυση του υποδείγματος μεγιστοποίησης της πιθανότητας αποφυγής ζημίας για την αγορά που αναπαριστά τον ηλεκτρικό τομέα της Ιταλίας

αντικειμενική συνάρτηση την μεγιστοποίηση πιθανότητας αποφυγής ζημίας μιας επιχείρησης που λειτουργεί στην αγορά της Ιταλίας υπό καθεστώς τέλειου ανταγωνισμού. Στο σενάριο χαμηλής αβεβαιότητας για τις τιμές άνθρακα, φυσικού αερίου και δικαιωμάτων εκπομπών η παραγόμενη ενέργεια και η εγκατεστημένη ισχύς των σταθμών όλων των υποδειγμάτων είναι ανάλογες του αιτιοκρατικού υποδείγματος

δεδομένης της μικρής αβεβαιότητας ως προς την εξέλιξη των τιμών των πιθανοτικών μεγεθών.

Στο υπόδειγμα μεγιστοποίησης της πιθανότητας αποφυγής ζημίας η επιχείρηση εκδηλώνει έντονη αποστροφή προς τον κίνδυνο. Η συνάρτηση χρησιμότητας που έχει υποτεθεί στο υπόδειγμα αυτό ώστε να προσομοιάζει τη συμπεριφορά της επιχείρησης εμπίπτει στην κατηγορία IRRA, δηλαδή αυξανόμενης σχετικής αποστροφής προς τον κίνδυνο και στην κατηγορία CARA<sup>14</sup>, δηλαδή σταθερής αποστροφής προς τον κίνδυνο σε ποσότητες. Ως αποτέλεσμα, στο σενάριο χαμηλής αβεβαιότητας για τις τιμές άνθρακα, φυσικού αερίου και μεγάλης αβεβαιότητας για τις τιμές δικαιωμάτων εκπομπών, η παραγόμενη ενέργεια από σταθμούς στερεών καυσίμων μειώνεται ελαφρώς μεσοπρόθεσμα και εντονότερα μακροπρόθεσμα λόγω της μεγάλης αβεβαιότητας ως προς το κόστος αγοράς δικαιωμάτων εκπομπών και αυξάνεται η παραγόμενη ενέργεια από μονάδες ΑΠΕ διαχρονικά με έντονο ρυθμό ώστε να καλύψει τη μείωση αυτή. Η παραγόμενη ενέργεια από μονάδες αερίων καυσίμων μειώνεται ελαφρώς στο μεσοπρόθεσμο διάστημα και αυξάνεται στο μακροπρόθεσμο (Γράφημα 41), ώστε να καλύπτονται οι απαιτήσεις του συστήματος σε άνοδο του φορτίου.

Στο σενάριο χαμηλής αβεβαιότητας για τις τιμές άνθρακα, αγοράς δικαιωμάτων εκπομπών και μεγάλης αβεβαιότητας για τις τιμές φυσικού αερίου η παραγωγή από μονάδες αερίων καυσίμων μειώνεται αρκετά στο μεσοπρόθεσμο διάστημα λόγω της μεγάλης αβεβαιότητας για το κόστος αγοράς του καυσίμου και στο μακροπρόθεσμο διάστημα αυξάνεται ελαφρώς (Γράφημα 41) λόγω της απαίτησης να καλύπτονται οι περιορισμοί συνολικής εφεδρείας του συστήματος. Για την επιπλέον παραγωγή αξιοποιούνται μονάδες ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Η αύξηση της παραγόμενης ενέργειας από μονάδες ΑΠΕ, ωστόσο, περιορίζεται λόγω των περιορισμένων δυνατοτήτων περεταίρω ανάπτυξης δυναμικότητας αντλησιοταμιευτικών σταθμών.

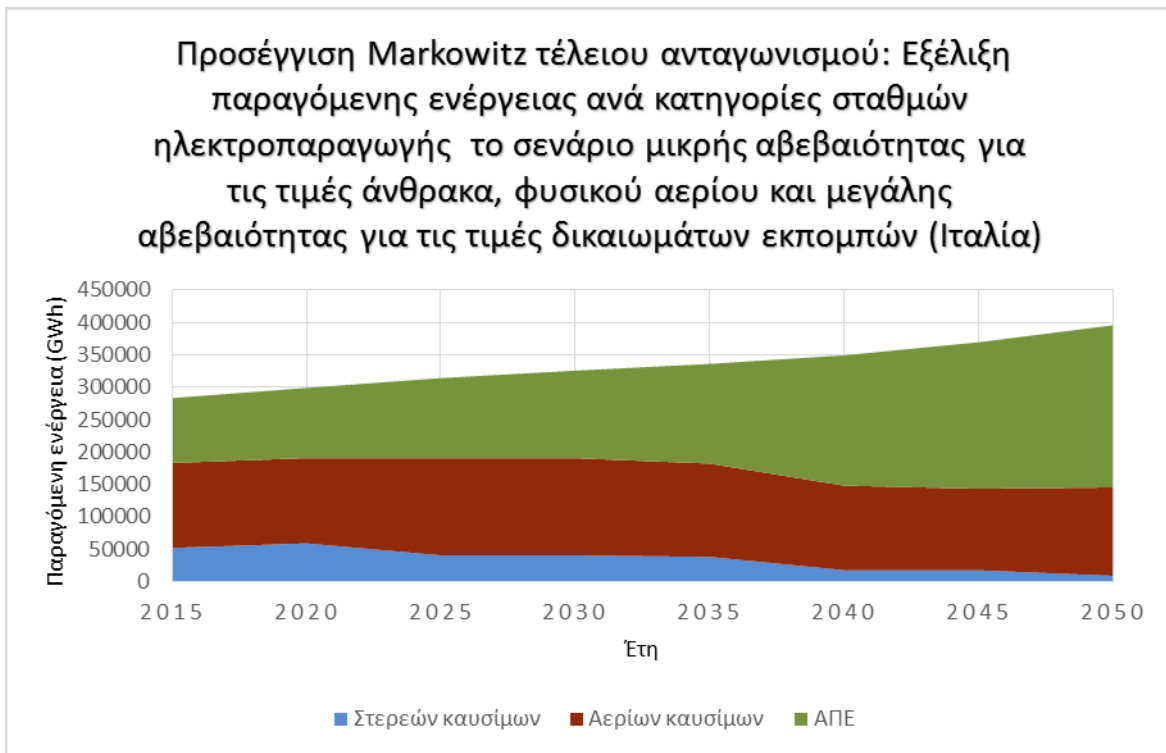
Στο σενάριο χαμηλής αβεβαιότητας για τις τιμές άνθρακα και μεγάλης αβεβαιότητας για τις τιμές φυσικού αερίου και δικαιωμάτων εκπομπών, η παραγόμενη ενέργεια από σταθμούς στερεών καυσίμων μειώνεται συγκριτικά με το σενάριο χαμηλής αβεβαιότητας για τις τιμές άνθρακα, φυσικού αερίου και δικαιωμάτων εκπομπών () λόγω της αβεβαιότητας για το κόστος αγοράς δικαιωμάτων εκπομπών. Η παραγόμενη ενέργεια από σταθμούς αερίων καυσίμων μειώνεται, ωστόσο η μείωση αυτή περιορίζεται από την απαίτηση να καλύπτονται οι περιορισμοί κυκλικής λειτουργίας ηλεκτροπαραγωγικών μονάδων και συνολικής εφεδρείας του συστήματος (Γράφημα 41).

<sup>14</sup> IRRA-Increasing Relative Risk Aversion και CARA- Constant Absolute Risk Aversion, όπως αναλύθηκε στην υποενότητα 6.4

Επιπλέον, αυξάνεται η παραγόμενη ενέργεια από σταθμούς ΑΠΕ οι οποίοι στην πλειονότητά τους είναι διακοπτόμενοι και αυξάνεται η ενέργεια που εγχέεται στο σύστημα από αντλησιοταμιευτικούς σταθμούς.

### 13.6.2.2 Υπόδειγμα εφαρμογής της προσέγγισης του Markowitz

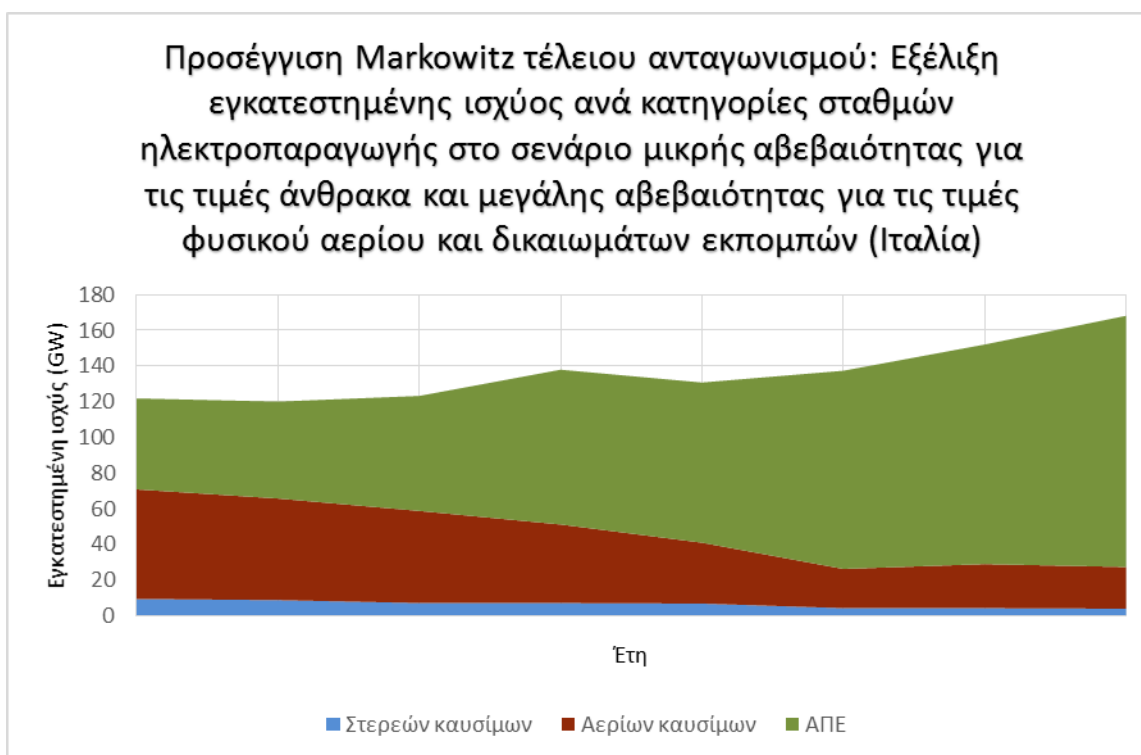
Στο σενάριο χαμηλής αβεβαιότητας για τις τιμές άνθρακα, φυσικού αερίου και αγοράς δικαιωμάτων εκπομπών η εγκατεστημένη ισχύς των μονάδων ηλεκτροπαραγωγής καθώς και η παραγόμενη ενέργειά τους όπως προκύπτει από την επίλυση του υποδείγματος με χρήση της προσέγγισης του Markowitz είναι παρόμοια της αντίστοιχης όπως προέκυψε από την επίλυση του αιτιοκρατικού υποδείγματος διότι η αβεβαιότητα για την μελλοντική εξέλιξη των πιθανοτικών μεγεθών είναι μικρή.



Γράφημα 42: Παραγόμενη ενέργεια σε GWh ανά τύπο σταθμού όπως προέκυψε από την επίλυση του υποδείγματος με χρήση της προσέγγισης Markowitz στο σενάριο χαμηλής αβεβαιότητας για τις τιμές άνθρακα, φυσικού αερίου και μεγάλης αβεβαιότητας για τις τιμές δικαιωμάτων εκπομπών για την αγορά που αναπαριστά τον ηλεκτρικό τομέα της Ιταλίας στον οποίο δραστηριοποιείται επιχείρηση υπό καθεστώς τέλειου ανταγωνισμού

Η παραγόμενη ενέργεια από μονάδες στερεών καυσίμων του υποδείγματος με χρήση της προσέγγισης του Markowitz στο σενάριο χαμηλής αβεβαιότητας για τις τιμές

άνθρακα, φυσικού αερίου και μεγάλης αβεβαιότητας για τις τιμές δικαιωμάτων εκπομπών μειώνεται διαχρονικά, δεδομένου ότι στο παρόν υπόδειγμα η συνάρτηση χρησιμότητας που προσομοιώνει τις προτιμήσεις της επιχείρησης είναι της μορφής CRRA, δηλαδή σταθερής σχετικής αποστροφής στον κίνδυνο και DARA<sup>15</sup>, δηλαδή φθίνουσας αποστροφής προς τον κίνδυνο σε ποσότητες. Για την κάλυψη της ενέργειας αυτής αυξάνεται διαχρονικά με έντονο ρυθμό η παραγόμενη ενέργεια από μονάδες ΑΠΕ. Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας των σταθμών αερίων καυσίμων μειώνεται ελαφρώς τόσο μεσοπρόθεσμα όσο και μακροπρόθεσμα. Η μείωση αυτή δεν είναι μεγαλύτερη δεδομένης της απαίτησης να καλύπτονται οι περιορισμοί κυκλικής λειτουργίας ηλεκτροπαραγωγικών μονάδων και συνολικής εφεδρείας του συστήματος.



Γράφημα 43: Εγκατεστημένη ισχύς σε GW ανά τύπο σταθμού όπως προέκυψε από την επίλυση του υποδείγματος με χρήση της προσέγγισης Markowitz στο σενάριο χαμηλής αβεβαιότητας για τις τιμές άνθρακα και μεγάλης αβεβαιότητας για τις τιμές φυσικού αερίου και αγοράς δικαιωμάτων εκπομπών για την αγορά που αναπαριστά τον ηλεκτρικό τομέα της Ιταλίας στον οποίο δραστηριοποιείται επιχείρηση υπό καθεστώς τέλειου ανταγωνισμού

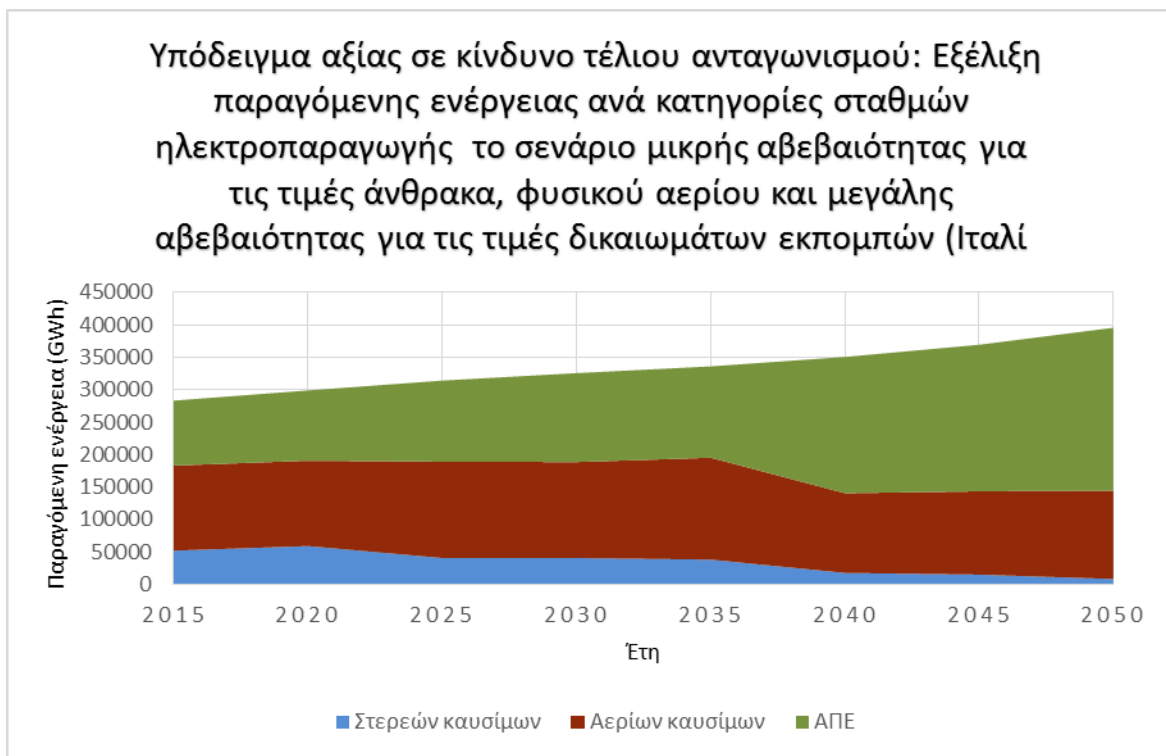
<sup>15</sup> CRRA-Constant Relative Risk Aversion και DARA-Decreasing Absolute Risk Aversion, όπως αναλύθηκε στην υποενότητα 6.4



Η εγκατεστημένη ισχύς των σταθμών στερεών καυσίμων στο σενάριο χαμηλής αβεβαιότητας για τις τιμές άνθρακα και μεγάλης αβεβαιότητας για τις τιμές φυσικού αερίου και αγοράς δικαιωμάτων εκπομπών μειώνεται με έντονο ρυθμό διαχρονικά λόγω της μεγάλης αβεβαιότητας για το κόστος αγοράς δικαιωμάτων εκπομπών. Η εγκατεστημένη ισχύς των μονάδων αερίων καυσίμων μειώνεται ελαφρώς. Η εγκατεστημένη ισχύς τόσο των μονάδων ΑΠΕ όσο και των αντλησιοταμιευτικών σταθμών αυξάνεται διαχρονικά.

### 13.6.2.3 Υπόδειγμα αξίας σε κίνδυνο

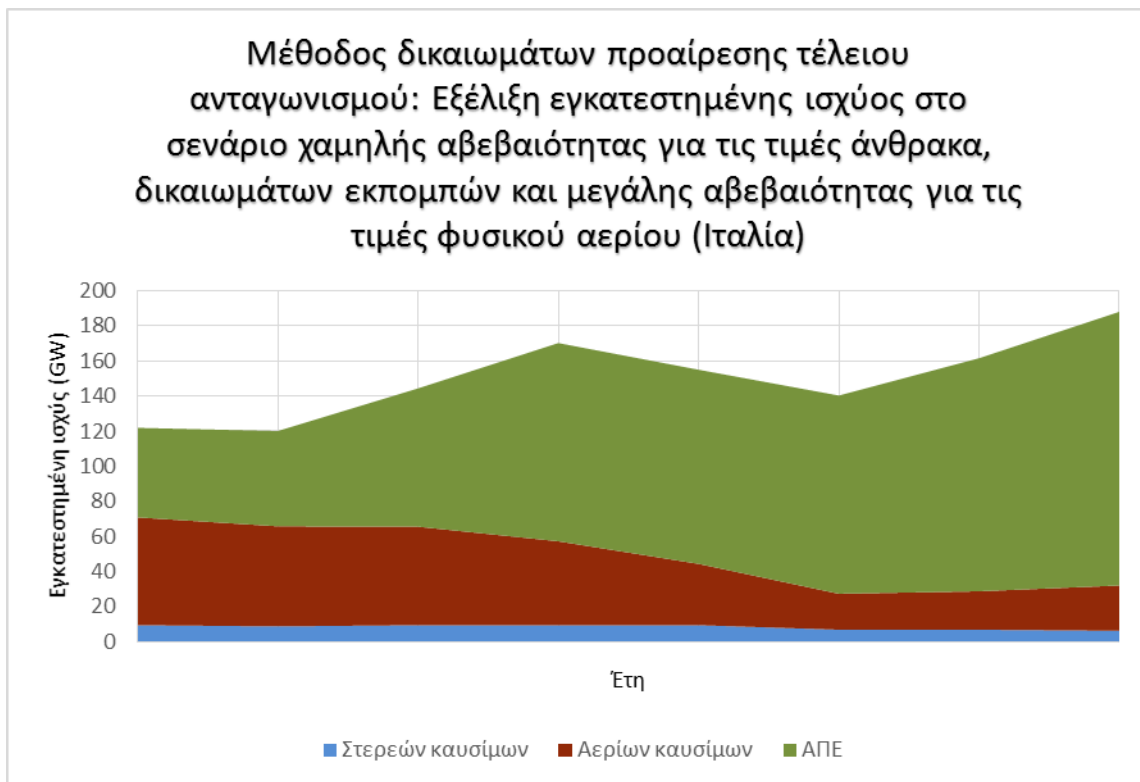
Η εγκατεστημένη ισχύς και η παραγόμενη ενέργεια του υποδείγματος αξίας σε κίνδυνο στο σενάριο χαμηλής αβεβαιότητας για τις τιμές άνθρακα, φυσικού αερίου και δικαιωμάτων εκπομπών είναι παρόμοια των ενεργειακών αποτελεσμάτων του αιτιοκρατικού υποδείγματος.



Γράφημα 44: Παραγόμενη ενέργεια σε GWh ανά τύπο σταθμού όπως προέκυψε από την επίλυση του υποδείγματος με χρήση της αξίας σε κίνδυνο στο σενάριο χαμηλής αβεβαιότητας για τις τιμές άνθρακα, φυσικού αερίου και μεγάλης αβεβαιότητας για τις τιμές δικαιωμάτων εκπομπών για την αγορά που αναπαριστά τον ηλεκτρικό τομέα της Ιταλίας στον οποίο δραστηριοποιείται επιχείρηση υπό καθεστώς τέλει ανταγωνισμού

Στο σενάριο χαμηλής αβεβαιότητας για τις τιμές άνθρακα, φυσικού αερίου και μεγάλης αβεβαιότητας για τις τιμές δικαιωμάτων εκπομπών, η παραγόμενη ενέργεια των σταθμών στερεών καυσίμων μειώνεται με μεγάλο ρυθμό διότι το κόστος αγοράς δικαιωμάτων εκπομπών είναι αρκετά αβέβαιο. Δεδομένης της μείωσης της παραγωγής των σταθμών στερεών καυσίμων, αξιοποιούνται μονάδες ΑΠΕ, των οποίων η παραγωγή ενέργειας αυξάνεται με μικρό ρυθμό μεσοπρόθεσμα και με εντονότερο ρυθμό στο μακροχρόνιο ορίζοντα. Η παραγόμενη ενέργεια των σταθμών αερίων καυσίμων μειώνεται διαχρονικά πολύ λίγο ώστε να καλύπτονται οι απαιτήσεις του συστήματος σε άνοδο φορτίου (εφεδρεία συστήματος).

#### 13.6.2.4 Υπόδειγμα αξιολόγησης με τη μέθοδο των δικαιωμάτων προαίρεσης



Γράφημα 45: Εγκατεστημένη ισχύς σε GW ανά τύπο σταθμού όπως προέκυψε από την επίλυση του υποδείγματος αξιολόγησης των επενδύσεων με τη μέθοδο των δικαιωμάτων προαίρεσης στο σενάριο χαμηλής αβεβαιότητας για τις τιμές άνθρακα και αγοράς δικαιωμάτων εκπομπών και μεγάλης αβεβαιότητας για τις τιμές φυσικού αερίου για την αγορά που αναπαριστά τον ηλεκτρικό τομέα της Ιταλίας στον οποίο δραστηριοποιείται επιχείρηση υπό καθεστώς τέλειου ανταγωνισμού

Στο υπόδειγμα αξιολόγησης των επενδύσεων με τη μέθοδο των δικαιωμάτων προαίρεσης κάθε σταθμός αξιολογείται ξεχωριστά και η απόφαση για την λειτουργία του λαμβάνεται για κάθε σταθμό μεμονωμένα. Η εγκατεστημένη ισχύς των σταθμών αερίων καυσίμων μειώνεται με έντονο ρυθμό στο σενάριο χαμηλής αβεβαιότητας για τις τιμές άνθρακα, δικαιωμάτων εκπομπών και μεγάλης αβεβαιότητας για τις τιμές φυσικού αερίου διότι η αβεβαιότητα για το κόστος αγοράς καυσίμου και κατ' επέκταση για το κόστος λειτουργίας είναι μεγάλη. Στο ίδιο σενάριο η εγκατεστημένη ισχύς των μονάδων ΑΠΕ αυξάνεται διαχρονικά με μεγάλο ρυθμό, ενώ η εγκατεστημένη ισχύς των μονάδων στερεών καυσίμων αυξάνεται ελαφρώς. Η ενέργεια που εγχέεται στο σύστημα από αντλησιοταμιευτικούς σταθμούς αυξάνεται ιδιαιτέρως στο σενάριο αυτό, δεδομένης της μεγάλης αύξησης της παραγόμενης ενέργειας από μονάδες ΑΠΕ.

### 13.6.3 Σενάριο πολύ μεγάλης αβεβαιότητας

Στην υποενότητα αυτή θεωρείται πολύ μεγάλη αβεβαιότητα ως προς την εξέλιξη των τιμών των πιθανοτικών μεγεθών. Ακολουθώντας παρουσιάζονται τα αποτελέσματα τόσο σε ενεργειακό επίπεδο όσο και σε επίπεδο εγκατεστημένης ισχύος των διαφόρων μονάδων ηλεκτροπαραγωγής όπως προέκυψαν από την επίλυση του σεναρίου αυτού και στη συνέχεια συγκρίνονται με τα αντίστοιχα της επίλυσης του σεναρίου ως παρουσιάστηκε στην υποενότητα 13.6.2.

#### 13.6.3.1 Υπόδειγμα μεγιστοποίησης της πιθανότητας αποφυγής ζημίας

Στο υπόδειγμα μεγιστοποίησης της πιθανότητας αποφυγής ζημίας η επιχείρηση εκδηλώνει την έντονη αποστροφή προς τον κίνδυνο αποφεύγοντας τις επιλογές εκείνες με αβέβαιη εξέλιξη στο μέλλον. Επιπλέον, η επιχείρηση αδιαφορεί ως προς το μέγεθος του κέρδους – οφέλους που θα έχει από τις επιλογές που θα λάβει. Για τον λόγο αυτό η επιχείρηση προτιμά να επενδύσει σε μονάδες μικρής εντάσεως κεφαλαίου και μεγαλύτερου μέσου κόστους και να αποφύγει μονάδες μεγαλύτερου κεφαλαιουχικού κόστους αλλά μικρότερου μέσου κόστους λειτουργίας. Ως αποτέλεσμα η εγκατεστημένη ισχύς των μονάδων αεριοστρόβιλων αυξάνεται συγκριτικά με την ισχύ όπως είχε προκύψει στο σενάριο μεγάλης αβεβαιότητας το οποίο παρουσιάστηκε στην υποενότητα 13.6.2. Επιπλέον, η εγκατεστημένη ισχύς των μονάδων στερεών καυσίμων και των μονάδων αερίων καυσίμων μειώνεται διαχρονικά λόγω της μεγάλης αβεβαιότητας ως προς το κόστος λειτουργίας τους. Η εγκατεστημένη ισχύς των μονάδων ΑΠΕ αυξάνεται τόσο στο μεσοπρόθεσμο όσο και στο μακροπρόθεσμο ορίζοντα.

Πίνακας 13-31: Διαχρονική ισχύς επενδύσεων επέκτασης – ανακαίνισης ήδη εγκατεστημένων μονάδων (σε GW) όπως προέκυψε από την επίλυση του υποδείγματος μεγιστοποίησης της πιθανότητας αποφυγής ζημίας στο σενάριο μεγάλης αβεβαιότητας όπως παρουσιάστηκε στην υποενότητα 13.6.2 και πολύ μεγάλης αβεβαιότητας για την αγορά που αναπαριστά τον ηλεκτρικό τομέα της Ιταλίας

Μονάδες	Σενάριο μεγάλης αβεβαιότητας υποενότητας 13.6.2	Σενάριο πολύ μεγάλης αβεβαιότητας
ΑΠΕ	0,44	0,62
Αερίων καυσίμων	0,76	0,81
Στερεών καυσίμων	0	0,29
Αεριοστρόβιλων	0,32	0,34

Πίνακας 13-32: Εγκατεστημένη ισχύς αεριοστρόβιλων (σε GW) όπως προέκυψε από την επίλυση του υποδείγματος μεγιστοποίησης της πιθανότητας αποφυγής ζημίας στο σενάριο μεγάλης αβεβαιότητας που παρουσιάστηκε στην υποενότητα 13.6.2 και πολύ μεγάλης αβεβαιότητας για την αγορά που αναπαριστά τον ηλεκτρικό τομέα της Ιταλίας

Σενάριο	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Μεγάλης αβεβαιότητας υποενότητας 13.6.2	9,83	6,77	5,01	2,64	1,32	0,41
Πολύ μεγάλης αβεβαιότητας	19,66	11,22	6,72	2	1,71	0,90

### 13.6.3.2 Υπόδειγμα με χρήση της προσέγγισης του Markowitz

Στο υπόδειγμα με χρήση της προσέγγισης του Markowitz η επιχείρηση εκδηλώνει αποστροφή προς τον κίνδυνο επιδιώκοντας παράλληλα μεγιστοποίησης του κέρδους – οφέλους της. Η εγκατεστημένη ισχύς των μονάδων στερεών καυσίμων και των μονάδων συνδυασμένου κύκλου μειώνεται τόσο μεσοπρόθεσμα όσο και σε μακροχρόνιο ορίζοντα. Η εγκατεστημένη ισχύς των μονάδων ΑΠΕ αυξάνεται διαχρονικά με έντονο ρυθμό. Ακόμη, λόγω της μεγάλης αβεβαιότητας ως προς τη μελλοντική εξέλιξη των τιμών των πιθανοτικών μεγεθών η επιχείρηση αυξάνει την ισχύ επένδυσης για επέκταση – ανακαίνιση ήδη εγκατεστημένων μονάδων (Πίνακας 13-33) όπως επίσης και την εγκατεστημένη ισχύ των μονάδων αεριοστρόβιλων (Πίνακας 13-34) συγκριτικά με την ισχύ όπως είχε προκύψει στο σενάριο μεγάλης αβεβαιότητας όπως παρουσιάστηκε στην υποενότητα 13.6.2.

Πίνακας 13-33: Διαχρονική ισχύς επενδύσεων επέκτασης – ανακαίνισης ήδη εγκατεστημένων μονάδων (σε GW) όπως προέκυψε από την επίλυση του υποδείγματος με χρήση της προσέγγισης του Markowitz στο σενάριο μεγάλης αβεβαιότητας όπως παρουσιάστηκε στην υποενότητα 13.6.2 και πολύ μεγάλης αβεβαιότητας για την αγορά που αναπαριστά τον ηλεκτρικό τομέα της Ιταλίας

Μονάδες	Σενάριο μεγάλης αβεβαιότητας υποενότητας 13.6.2	Σενάριο πολύ μεγάλης αβεβαιότητας
ΑΠΕ	0,35	0,62
Αερίων καυσίμων	0,72	0,76
Στερεών καυσίμων	0	0,13
Αεριοστρόβιλων	0,07	0,33

Πίνακας 13-34: Εγκατεστημένη ισχύς αεριοστρόβιλων (σε GW) όπως προέκυψε από την επίλυση του υποδείγματος με χρήση της προσέγγισης του Markowitz στο σενάριο μεγάλης αβεβαιότητας που παρουσιάστηκε στην υποενότητα 13.6.2 και πολύ μεγάλης αβεβαιότητας για την αγορά που αναπαριστά τον ηλεκτρικό τομέα της Ιταλίας

Σενάριο	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Μεγάλης αβεβαιότητας υποενότητας 13.6.2	9,83	9,83	9,83	9,83	9,83	9,83
Πολύ μεγάλης αβεβαιότητας	5,81	5,81	5,81	5,81	5,81	5,81

### 13.6.3.3 Υπόδειγμα αξιολόγησης με τη μέθοδο των δικαιωμάτων προαίρεσης

Στο υπόδειγμα αξιολόγησης των επενδύσεων με τη μέθοδο των δικαιωμάτων προαίρεσης κάθε επένδυση αξιολογείται ξεχωριστά. Η εγκατεστημένη ισχύς των μονάδων στερεών καυσίμων καθώς και η εγκατεστημένη ισχύς των μονάδων συνδυασμένου κύκλου μειώνεται διότι οι μονάδες αυτές αντιμετωπίζουν μεγάλη αβεβαιότητα ως προς το κόστος λειτουργίας τους. Απεναντίας αυξάνεται η ισχύς επένδυσης για κατασκευή αεριοστρόβιλων (Πίνακας 13-35). Δεδομένης της μεγάλης αβεβαιότητας η επιχείρηση αποφεύγει την κατασκευή μονάδων μεγάλου κεφαλαιουχικού κόστους αλλά ανακαινίζει ήδη υπάρχουσες μονάδες, συνεπώς αυξάνεται η ισχύς. Στον ακόλουθο πίνακα (Πίνακας 13-36) παρουσιάζεται η αύξηση της ισχύος επένδυσης για επέκταση ήδη εγκατεστημένων μονάδων συγκριτικά με την ισχύ όπως είχε προκύψει στο σενάριο μεγάλης αβεβαιότητας όπως παρουσιάστηκε στην υποενότητα 13.6.2.

Πίνακας 13-35: Διαχρονική ισχύς επενδύσεων επέκτασης – ανακαίνισης ήδη εγκατεστημένων μονάδων (σε GW) όπως προέκυψε από την επίλυση του υποδείγματος δικαιωμάτων προαίρεσης στο σενάριο μεγάλης αβεβαιότητας που παρουσιάστηκε στην υποενότητα 13.6.2 και πολύ μεγάλης αβεβαιότητας για την αγορά που αναπαριστά τον ηλεκτρικό τομέα της Ιταλίας

Μονάδες	Σενάριο μεγάλης αβεβαιότητας υποενότητας 13.6.2	Σενάριο πολύ μεγάλης αβεβαιότητας
ΑΠΕ	0,50	1,00
Αερίων καυσίμων	6,29	6,37
Στερεών καυσίμων	0	0,29
Αεριοστρόβιλοι	0,43	3,07

Πίνακας 13-36: Εγκατεστημένη ισχύς αεριοστρόβιλων (σε GW) όπως προέκυψε από την επίλυση του υποδείγματος δικαιωμάτων προαίρεσης στο σενάριο μεγάλης αβεβαιότητας που παρουσιάστηκε στην υποενότητα 13.6.2 και πολύ μεγάλης αβεβαιότητας για την αγορά που αναπαριστά τον ηλεκτρικό τομέα της Ιταλίας

Σενάριο	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Μεγάλης αβεβαιότητας υποενότητας 13.6.2	10,1	6,01	3,82	1,13	15,33	21,55
Πολύ μεγάλης αβεβαιότητας	23,30	36,31	43,29	59,74	66,79	66,88

#### 13.6.4 Υπόδειγμα δύο σταδίων

Η εγκατεστημένη ισχύς των μονάδων στερεών και αερίων καυσίμων του υποδείγματος δύο σταδίων στο μεσοπρόθεσμο ορίζοντα είναι μικρότερη συγκριτικά με την εγκατεστημένη ισχύς των μονάδων αυτών στα προαναφερθέντα υποδείγματα. Μεσοπρόθεσμα η αβεβαιότητα για την εξέλιξη των τιμών των πιθανοτικών μεγεθών είναι πολύ μεγάλη και για τον λόγο αυτό ο αποφασίζων δεν επενδύσει στις μονάδες αυτές. Δεδομένης της πολύ μεγάλης αβεβαιότητας η επιχείρηση δεν επιλέγει να επενδύσει σε μονάδες μεγάλου κεφαλαιουχικού κόστους διότι δεν είναι βέβαιη η ανάκτηση του κόστους αυτού. Απεναντίας, επεκτείνει – ανακαινίζει ήδη εγκατεστημένες μονάδες. Η διαφοροποίηση της ισχύος ανακαίνισης του υποδείγματος αυτού σε σχέση με την αντίστοιχη όπως προκύπτει από την επίλυση του υποδείγματος μεγιστοποίησης

της πιθανότητας αποφυγής ζημίας, της προσέγγισης Markowitz και του υποδείγματος με τη μέθοδο των δικαιωμάτων προαίρεσης παρουσιάζεται στον ακόλουθο πίνακα (Πίνακας 13-37). Σε μακροπρόθεσμο ορίζοντα, ωστόσο, θεωρείται ότι μέρος της αβεβαιότητας θα έχει αρθεί και ο αποφασίζων θα μπορεί να λάβει διορθωτικές αποφάσεις. Επιπλέον, στο υπόδειγμα αυτό μεσοπρόθεσμα αν και οι επενδύσεις σε μονάδες αερίων και στερεών καυσίμων μειώνονται και οι επενδύσεις σε μονάδες ΑΠΕ αυξάνονται, η αύξηση της εγκατεστημένης ισχύος των μονάδων ΑΠΕ δεν επαρκεί για την κάλυψη της ζήτησης και γίνονται περικοπές φορτίου.

Πίνακας 13-37: Διαχρονική ισχύς επενδύσεων επέκτασης – ανακαίνισης ήδη εγκατεστημένων μονάδων όπως προέκυψε από την επίλυση του υποδείγματος δύο σταδίων και των υπολοίπων υποδειγμάτων στο σενάριο πολύ μεγάλης αβεβαιότητας για την αγορά που αναπαριστά τον ηλεκτρικό τομέα της Ιταλίας (σε GW)

Μονάδες	Μεγιστοποίηση πιθανότητας αποφυγής ζημίας	Προσέγγιση Markowitz	Δικαιώματα προαίρεσης	Δύο σταδίων
ΑΠΕ	1,00	0,62	1,00	0,95
Αερίων καυσίμων	6,47	0,76	6,37	7,45
Στερεών καυσίμων	0,29	0,13	0,29	0,31
Αεριοστρόβιλοι	3,07	0,33	3,07	2,93





## Κεφάλαιο 14

### 14 Σύνοψη – Συμπεράσματα

---

Η ενότητα αυτή παρουσιάζει τα συμπεράσματα της έρευνας στο πλαίσιο της διδακτορικής διατριβής, η οποία ανέπτυξε διάφορες μεθόδους ενσωμάτωσης της αβεβαιότητας σε μοντέλο αναπαράστασης της μακροχρόνιας επέκτασης και λειτουργίας της ηλεκτροπαραγωγής, στο πλαίσιο ανταγωνισμού μεταξύ επιχειρήσεων ηλεκτροπαραγωγής.

Η μεγάλη πλειοψηφία των σχετικών μοντέλων που χρησιμοποιούνται σε πραγματικές μελέτες είναι αιτιοκρατικά και η αβεβαιότητα σχετικά με τα εξωγενή μεγέθη που επηρεάζουν τις επενδύσεις διερευνώνται μέσω επίλυσης πολλών σεναρίων και ανάλυσης ευαισθησίας. Στη βιβλιογραφία μπορεί κανείς να βρει στοχαστικές επιλύσεις μοντέλων ηλεκτροπαραγωγής, τα οποία όμως σχεδόν όλα χρησιμοποιούν την πιθανοτικά αναμενόμενη τιμή τους κόστους ή του κέρδους ως αντικειμενική συνάρτηση για τη λήψη των επενδυτικών αποφάσεων. Οι προσεγγίσεις αυτές, τόσο η αιτιοκρατική όσο και αυτή που βασίζεται στην αναμενόμενη τιμή, μορφοποιήθηκαν στην πιο γενική τους μορφή στο πλαίσιο της διατριβής, κωδικοποιήθηκαν σε γλώσσα GAMS και επιλύθηκαν για μεγάλου μεγέθους αναπαραστάσεις της ηλεκτροπαραγωγής των Ευρωπαϊκών χωρών. Διαπιστώθηκε ότι η στοχαστική προσέγγιση που βασίζει τις αποφάσεις στην αναμενόμενη τιμή δεν προσθέτει σημαντική πληροφορία συγκριτικά με το αιτιοκρατικό μοντέλο και τις αναλύσεις ευαισθησίας.

Στην υπόλοιπη διατριβή εξάγεται αβίαστα το συμπέρασμα ότι υπό συνθήκες μεγάλης αποστροφής στον κίνδυνο, η προσομοίωση των επενδυτικών αποφάσεων διαφέρει σημαντικά από τα αποτελέσματα της στοχαστικής προσέγγισης με βάση τις αναμενόμενες τιμές. Αυτό το συμπέρασμα είναι θεωρητικά αναμενόμενο, όμως στο πλαίσιο της διατριβής αφενός αποδείχθηκε μαθηματικά, αφετέρου μετρήθηκε ως προς

την έκταση των διαφορών στις επενδυτικές αποφάσεις μέσω πολλών εφαρμογών των στοχαστικών μοντέλων της διατριβής.

Η αποστροφή στον κίνδυνο είναι το κύριο χαρακτηριστικό της σημερινής συγκυρίας της αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας στην Ευρώπη και σε άλλες χώρες. Παράγοντες όπως οι επιπτώσεις των πολιτικών για την κλιματική αλλαγή, η ταχεία διείσδυση των ΑΠΕ στην αγορά και η απελευθέρωση των αγορών συντείνουν στην ενίσχυση της έντασης αποστροφής του κινδύνου η οποία είναι ήδη εμφανής από την τρέχουσα πρακτική των επιχειρήσεων ηλεκτροπαραγωγής.

Στο πλαίσιο της διατριβής δείχνεται τόσο μαθηματικά όσο και εμπειρικά από τις επιλύσεις των στοχαστικών μοντέλων, ότι όσο η αποστροφή στον κίνδυνο μεγαλώνει τόσο οι επιχειρήσεις είτε αποφεύγουν κάθε επένδυση σε νέες μονάδες είτε επενδύουν κατά προτεραιότητα σε μονάδες μικρής εντάσεων κεφαλαίου ή μικρού μεγέθους. Στο πλαίσιο τη διατριβής δείχνεται επίσης ότι όσο μεγαλώνει η αποστροφή στον κίνδυνο και η αβεβαιότητα τόσο οι επιχειρήσεις έχουν τάση να συμπράττουν και έτσι να αυξάνουν την ολιγοπωλιακή δύναμή τους στην αγορά.

Τα συμπεράσματα αυτά προκύπτουν σαφώς από τη διατριβή και επιβεβαιώνονται από τη σημερινή πραγματικότητα στην Ευρώπη, όπου παρατηρείται έντονη επενδυτική απραξία καθώς και τάση εξαγορών και συγχωνεύσεων των επιχειρήσεων ηλεκτροπαραγωγής.

Στο πλαίσιο αυτών των εξελίξεων η ρύθμιση των αγορών βρίσκεται ενόψει του εξής διλήματος: να εφαρμόσει αυστηρές ποινές στις επιχειρήσεις σχετικά με την επάρκειά τους στην ασφαλή εξυπηρέτηση του φορτίου και άρα να τις υποχρεώσει να επενδύσουν ή να τις ενισχύσει οικονομικά μέσω επιδότησης (μηχανισμοί αμοιβής ισχύος) εφόσον επενδύουν. Η στοχαστική εφαρμογή που βασίζεται στα δικαιώματα προαίρεσης, όπως αναπτύχθηκε στη διατριβή, θεμελιώνει τόσο μαθηματική όσο και εμπειρικά την πραγματική υπόσταση αυτού του διλήματος. Η ανάλυση της διατριβής δείχνει ότι όσο αυξάνεται το πρόστιμο μη επάρκειας ώστε οι επιχειρήσεις αποστρεφόμενες τον κίνδυνο να μην επιλέγουν επενδυτική απραξία τόσο περισσότερο οι επιχειρήσεις θα συνενώνονται μεταξύ τους πράγμα που επιφέρει δυσμενή επίπτωση στους καταναλωτές λόγω της ολιγοπωλιακής δύναμης. Από την άλλη, αν δοθεί επιδότηση για νέες επενδύσεις θα υφίσταται επιπλέον κόστος για τον καταναλωτή από την αναποτελεσματικότητα που προκύπτει λόγω της διοικητικής παρέμβασης στην αγορά, σύμφωνα με το πρόβλημα της «αντιπροσώπησης» (Principal-agent problem). Η ανάλυση της διατριβής δείχνει ότι το πρόβλημα ανακύπτει μόνο στο πλαίσιο ολιγοπωλίου όπου οι συμμετέχοντες αντιμετωπίζουν μεγάλη αβεβαιότητα και έχουν έντονη αποστροφή στον κίνδυνο.

Η στρέβλωση της επενδυτικής πρακτικής από την θεωρητικά ορθολογική σε εκείνη που βασίζεται σε μονάδες μικρής εντάσεων κεφαλαίου προκύπτει σαφώς από το στοχαστικό μοντέλο της διατριβής όπου οι επιχειρήσεις επιδιώκουν την μεγιστοποίηση της πιθανότητας αποφυγής οικονομίας ζημίας αντί της επιδίωξης μεγιστοποίησης του κέρδους την οποία τόσο τα αιτιοκρατικά μοντέλα όσο και τα μοντέλα αναμενόμενης τιμής ακολουθούν. Το μοντέλο αποφυγής ζημίας μορφοποιείται και επιλύεται εμπειρικά για πρώτη φορά στο πλαίσιο του τομέα της ηλεκτρικής οικονομίας. Ο μετασχηματισμός του στοχαστικού μοντέλου στο ισοδύναμο αιτιοκρατικό παρέχει δυνατότητα ακριβούς μαθηματικής κατανόησης (και όχι με προσομοιώσεις τύπου Monte Carlo) της επενδυτικής στρέβλωσης καθώς και του κόστους (διαφεύγον κέρδος) της έντονης αποστροφής στον κίνδυνο. Στην πράξη πολύ συχνά οι επιχειρήσεις και ιδίως οι μεγάλοι μεγέθους ακολουθούν αυτήν την πρακτική αποφυγής ζημίας η οποία εκφράζεται με διάφορες μορφές (π.χ. αποφυγή μείωσης μεριδίου αγοράς). Τα αποτελέσματα από αυτό το μοντέλο επιβεβαιώθηκαν και από την προσέγγιση του στοχαστικού μοντέλου όπου οι επενδύσεις λαμβάνονται με βάση δικαιώματα προαίρεσης. Η διατριβή δείχνει ότι δύο πολύ διαφορετικές μεταξύ τους προσεγγίσεις οδηγούν σε πολύ παρόμοια αποτελέσματα παρά τις θεμελιώδεις διαφορές τους από μαθηματικής σκοπιάς, εφόσον βέβαια εφαρμοσθούν σε επίπεδο συνολικού συστήματος ηλεκτροπαραγωγής. Το συμπέρασμα αυτό είναι πολύ σημαντικό για την περαιτέρω έρευνα, γιατί το μοντέλο με τα δικαιώματα προαίρεσης είναι πολύ ευκολότερο να εφαρμοσθεί σε μεγάλου μεγέθους εμπειρικά μοντέλα, και επομένως η προσέγγιση αυτή μπορεί με ασφάλεια να ακολουθηθεί γιατί έχει ιδιότητες συμβατές με τις πρακτικές αποφυγής ζημίας.

Για να εξαχθούν αυτά τα συμπεράσματα ιδίως σχετικά με τις επιπτώσεις στην δομή της αγοράς ήταν απαραίτητο να μορφοποιηθεί στοχαστικό μοντέλο αγοράς με ολιγοπωλιακή δομή τύπου Cournot, και επιπλέον να ευρίσκει το μοντέλο ενδογενώς τον βέλτιστο αριθμό συμμετρικών επιχειρήσεων ανάλογα με την αγορά, την αβεβαιότητα και την ένταση αποστροφής στον κίνδυνο. Η μορφοποίηση αυτή καθώς και η εμπειρική της εφαρμογή σε στοχαστικό μοντέλο είναι σαφώς πρωτότυπη σε σχέση με τη βιβλιογραφία. Η μορφοποίηση του ολιγοπωλιακού ανταγωνισμού στο στοχαστικό μοντέλο αποδείχθηκε εξαιρετικά χρήσιμη ώστε να εξαχθούν τα συμπεράσματα σχετικά με την τάση συγκέντρωσης της αγοράς λόγω εντονότερης αβεβαιότητας. Το αναμενόμενο αυτό συμπέρασμα επιβεβαιώθηκε τόσο μαθηματικά όσο και εμπειρικά.

Η αξιολόγηση του κινδύνου με χρήση της προσέγγισης του Markowitz προσομοιώνει διαφορετική συμπεριφορά της επιχείρησης ως προς την αβεβαιότητα συγκριτικά με το υπόδειγμα που βασίζεται στην αναμενόμενη τιμή. Εξάλλου σε αυτό έγκειται η μεγάλη συνεισφορά του Markowitz ο οποίος εισήγαγε τον παράγοντα της τυπικής απόκλισης επιπλέον της αναμενόμενης τιμής. Στη διατριβή επιβεβαιώθηκε εμπειρικά το

αναμενόμενο συμπέρασμα ότι όσο αυξάνει η σημαντικότητα της τυπικής απόκλισης σε σχέση με το αναμενόμενο κέρδος οι επενδυτικές αποφάσεις αποκλίνουν περισσότερο από εκείνες που προκύπτουν με βάση μόνο την αναμενόμενη τιμή. Στη διατριβή προκύπτει επίσης ότι εφαρμόζοντας την προσέγγιση Markowitz σε ολιγοπωλιακή αγορά οι επιχειρήσεις τείνουν να συγχωνεύονται όσο αποφασίζουν επενδύσεις δίδοντας μεγαλύτερο βάρος στην τυπική απόκλιση. Δηλαδή και με το απλό μοντέλο Markowitz η διατριβή επιβεβαιώνει το γενικό συμπέρασμα που εξήχθη και με τις πιο πολύπλοκες στοχαστικές μεθόδους, δηλαδή την αρνητική επίδραση της αύξησης του κινδύνου στη δομή της αγοράς.

Η αξιολόγηση του κινδύνου με τη μέθοδο της Αξίας σε Κίνδυνο έχει το χαρακτηριστικό πως η αξιολόγηση γίνεται επί ενός μέρους της κατανομής και συγκεκριμένα της (αρνητικής) ουράς και όχι επί του συνόλου αυτής. Όπως δείχνεται στη διατριβή, αν οι κατανομές πιθανοτήτων είναι Gaussian ή κοντά σε αυτές, οι ιδιότητες του στοχαστικού μοντέλου πλησιάζουν πολύ τα αποτελέσματα της προσέγγισης του Markowitz. Επιβεβαιώνονται τα γενικά συμπεράσματα ως προς τη δομή της αγοράς και με αυτήν την στοχαστική μέθοδο.

Η στοχαστική μοντελοποίηση της απόφασης σε δύο ή περισσότερα στάδια είναι ενδιαφέρουσα γιατί οι επενδυτικές αποφάσεις στο πρώτο στάδιο (ή σε μερικά από τα πρώτα στάδια) μπορούν να λαμβάνονται έτσι ώστε να μην «μετανοιώσει» η επιχείρηση (no regret decision making), δηλαδή με βάση την αποφυγή ζημίας, ενώ οι μεταγενέστερες αποφάσεις επένδυσης μπορούν να λαμβάνονται αναλαμβάνοντας μεγαλύτερο κίνδυνο αφού στο μεταξύ έχει αρθεί μέρος της αβεβαιότητας. Η διατριβή δείχνει ότι η προσέγγιση αυτή οδηγεί σε παρόμοια επενδυτική πρακτική στα πρώτα στάδια με αυτήν που προκύπτει από τις άλλες μεθόδους όταν εφαρμοσθεί πολύ έντονη αποστροφή στον κίνδυνο. Η δυσκολία μοντελοποίησης με αυτήν την μέθοδο είναι ότι θα πρέπει κάπως αυθαίρετα να γίνει η υπόθεση σχετικά με το πότε και σε ποιο βαθμό θα αρθεί μέρος της αβεβαιότητας.

Η μεθοδολογία αξιολόγησης των επενδύσεων με τη μέθοδο των δικαιωμάτων προαίρεσης αξιολογεί κάθε μία μονάδα ξεχωριστά και η επένδυση ή μη στη συγκεκριμένη μονάδα εξαρτάται από τη βιωσιμότητα και το αναμενόμενο κέρδος αυτής. Συνεπώς, σε αυτή την προσέγγιση η επιχείρηση κρίνοντας την κάθε μονάδα είναι δυνατόν να αναβάλλει συνεχώς την πραγματοποίηση επενδύσεων με αποτέλεσμα σε κάποια περίοδο να μην μπορεί να καλυφθεί η ζήτηση. Για την αποφυγή της παραπάνω συμπεριφοράς και την αναπαράσταση του ρόλου του ρυθμιστή της αγοράς έχουμε εισάγει συνάρτηση «προστίμου» μη ικανοποίησης της ζήτησης. Σε αυτήν την μεθοδολογική προσέγγιση προκύπτει ότι σε καθεστώς λειτουργίας αγοράς τέλειου ανταγωνισμού, τα αποτελέσματα συμπίπτουν με τα αποτελέσματα του αιτιοκρατικού

υποδείγματος και η κάθε επιχείρηση πραγματοποιεί εκείνες τις επενδύσεις από τις οποίες η επιχείρηση δεν θα έχει απώλειες. Προκύπτει δηλαδή ότι για την κάλυψη της ζήτησης ο ρυθμιστής θα πρέπει να συμβάλλει στο σταθερό κόστος των μονάδων οι οποίες χρειάζονται για την εύρυθμη λειτουργία του συστήματος αλλά δεν καταφέρνουν να ανακτούν το πλήρες κόστος κεφαλαίου τους από την αγορά. Αντίθετα σε περιβάλλον ατελούς ανταγωνισμού μεταξύ των επιχειρήσεων προκύπτει ότι ο «φόβος» του προστίμου είναι μπορεί να οδηγήσει την επιχείρηση σε επενδύσεις καλύπτοντας επαρκώς τη ζήτηση, όμως ταυτόχρονα θα προκύπτει συγκέντρωση στην αγορά που οδηγεί σε κίνδυνο αύξησης τιμών.

Το βασικό συμπέρασμα που προκύπτει από την επίλυση των υποδειγμάτων όλων των διαφορετικών συμπεριφορών-αξιολογήσεων έναντι του κινδύνου που μελετήθηκαν είναι το ακόλουθο. Όταν η επιχείρηση λειτουργεί σε αγορά με καθεστώς τέλειου ανταγωνισμού τότε οι τιμές ηλεκτρισμού αντικατοπτρίζουν το μεταβλητό κόστος της επιχείρησης, δηλαδή δεν υπάρχει ολιγοπωλιακή ισχύς από καμία επιχείρηση στην αγορά. Όμως οι επιχειρήσεις προκύπτει ότι έχουν μεγάλη δυσκολία στην πραγματοποίηση επενδύσεων κυρίως εξαιτίας των πολλών και μεγάλων αβεβαιοτήτων που αντιμετωπίζουν. Επιπλέον, οι επενδύσεις που πραγματοποιούν αφορούν σταθμούς οι οποίοι παρουσιάζουν μεγάλη βεβαιότητα σχετικά με την ανάκτηση του κεφαλαιουχικού τους κόστους. Αντίθετα δεν επενδύουν σε σταθμούς με μικρή βεβαιότητα ανάκτησης του κεφαλαίου τους. Σε αυτή την περίπτωση, ο ρυθμιστής της αγοράς θα πρέπει να επέμβει ώστε να εξασφαλίσει την σωστή λειτουργία της αγοράς μέσω μηχανισμών υποβοήθησης ανάκτησης του κεφαλαιουχικού κόστους σταθμών που απαιτούνται για την εύρυθμη λειτουργία του συστήματος. Όταν όμως η επιχείρηση λειτουργεί σε αγορά η οποία λειτουργεί υπό καθεστώς ολιγοπωλιακού ανταγωνισμού τότε η τιμή πώλησης ηλεκτρισμού είναι αυξημένη σε σχέση με το μεταβλητό της κόστος. Αυτό έχει ως συνέπεια την δυνατότητα της επιχείρησης να ανακτήσει μεγαλύτερο μέρος του κεφαλαιουχικού κόστους που έχει υποστεί με μεγαλύτερη ευκολία. Όμως σε κατάσταση έντονης αβεβαιότητας οι επιχειρήσεις θα προτιμήσουν την επενδυτική απραξία ή την ελάχιστη δυνατή επένδυση και μάλιστα σε μονάδες μικρής εντάσεως κεφαλαίου και υψηλού κόστους λειτουργίας. Ο ρυθμιστής δεν έχει πλέον άλλη επιλογή παρά να επιβάλλει επενδυτικές αποφάσεις για παράδειγμα μέσω προστίμων ανάλογα με την έλλειψη επάρκειας. Όμως η πρακτική αυτή οδηγεί σε συγχώνευση των επιχειρήσεων οπότε και σε αυτήν την περίπτωση, ο ρυθμιστής πάλι πρέπει να επεμβαίνει στην αγορά ώστε να εξασφαλίσει ότι οι επιχειρήσεις που λειτουργούν στην αγορά δεν ασκούν πλήρων την ολιγοπωλιακή τους ισχύ.

Στην συνέχεια παρουσιάζουμε ειδικότερα συμπεράσματα που προέκυψαν σχετικά με τις επενδυτικές επιλογές με βάση την εμπειρική επίλυση των στοχαστικών μοντέλων της διατριβής.

Εάν ο αποφασίζων θεωρεί μικρή αβεβαιότητα σχετικά με την εξέλιξη των τιμών των πιθανοτικών μεγεθών όπως στο σενάριο χαμηλής αβεβαιότητας για τις τιμές άνθρακα, φυσικού αερίου και δικαιωμάτων εκπομπών τα αποτελέσματα είναι παρεμφερή, ανεξάρτητα της συμπεριφοράς του απέναντι στον κίνδυνο.

Εάν ο αποφασίζων θεωρεί πως η εξέλιξη της τιμής αγοράς δικαιωμάτων εκπομπών CO<sub>2</sub> έχει μεγάλη αβεβαιότητα (σενάριο χαμηλής αβεβαιότητας για τις τιμές άνθρακα, φυσικού αερίου και μεγάλης αβεβαιότητας για τις τιμές δικαιωμάτων εκπομπών) οι επιλογές για τη λειτουργία και τις επενδύσεις εξαρτώνται από τις προτιμήσεις του ως προς τον κίνδυνο. Εάν ο αποφασίζων χαρακτηρίζεται από αύξουσα αποστροφή προς τον κίνδυνο (μέθοδος αποφυγής ζημίας), επιλέγει να επενδύσει σε μονάδες με πιο «βέβαια» κέρδη, δηλαδή σε μονάδες ΑΠΕ και πυρηνικούς σταθμούς (σε όσες χώρες έχει την δυνατότητα), ενώ αποξηλώνει σταθμούς στερεών καυσίμων και οι σταθμοί αερίων καυσίμων μειώνονται κατά το δυνατόν, με την προϋπόθεση να καλύπτονται οι απαιτήσεις του συστήματος για εφεδρεία και την κυκλική λειτουργία των μονάδων. Αντίστοιχες αποφάσεις λαμβάνει για τη λειτουργία των σταθμών αυτών. Εάν ο αποφασίζων χαρακτηρίζεται από φθίνουσα αποστροφή προς τον κίνδυνο (υπόδειγμα με χρήση της προσέγγισης του Markowitz και αξίας σε κίνδυνο), μειώνει την εγκατεστημένη ισχύ των σταθμών στερεών καυσίμων αλλά όχι με τόσο έντονο ρυθμό όπως όταν αυτός χαρακτηρίζεται από αύξουσα αποστροφή προς τον κίνδυνο. Για τον λόγο αυτό δεν χρειάζεται να επενδύσει στην κατασκευή τόσο μεγάλης ισχύος μονάδων ΑΠΕ και πυρηνικών σταθμών. Αντίστοιχες είναι οι αποφάσεις που λαμβάνει για τη λειτουργία των σταθμών αυτών. Εάν έχει θεωρήσει πως θα λάβει τις αποφάσεις για τις επενδύσεις μακροχρόνια αφού έχει αρθεί η αβεβαιότητα ως προς τις τιμές των πιθανοτικών μεγεθών (μέθοδος δύο σταδίων), ο αποφασίζων μειώνει μεσοπρόθεσμα την εγκατεστημένη ισχύ των σταθμών στερεών καυσίμων με ακόμη μεγαλύτερο ρυθμό από όταν χαρακτηρίζεται από φθίνουσα αποστροφή προς τον κίνδυνο, δεδομένου ότι αντιμετωπίζει μεγάλη αβεβαιότητα στο διάστημα αυτό και έχει τη δυνατότητα να λάβει εάν χρειαστεί διορθωτικές αποφάσεις στη συνέχεια ανάλογα τις τιμές των στοχαστικών παραμέτρων λάβουν μη επιθυμητές τιμές. Συνεπώς, μειώνει την εγκατεστημένη ισχύ των σταθμών αερίων καυσίμων μεσοπρόθεσμα και αυξάνει λίγο την ισχύ των πυρηνικών σταθμών και των μονάδων ΑΠΕ. Εάν ο αποφασίζων αξιολογεί κάθε επένδυση ξεχωριστά με τη μέθοδο των δικαιωμάτων προαίρεσης τότε μειώνει ελαφρώς την ισχύ των μονάδων στερεών καυσίμων. Ωστόσο δεν αυξάνει την ισχύ των πιο βέβαιων μονάδων όπως στις άλλες περιπτώσεις, καθώς δεν είναι απαραίτητη η κάλυψη της ζήτησης και

συνεπώς η αύξηση είναι τόση όση δικαιολογείται από το κέρδος-αξία που παρουσιάζει κάθε μονάδα.

Στην περίπτωση που ο αποφασίζων θεωρεί πως τόσο η τιμή του φυσικού αερίου όσο και η τιμή αγοράς δικαιωμάτων εκπομπών CO<sub>2</sub> (σενάριο χαμηλής αβεβαιότητας για τις τιμές άνθρακα και μεγάλης αβεβαιότητας για τις τιμές φυσικού αερίου και δικαιωμάτων εκπομπών) παρουσιάζουν μεγάλη αβεβαιότητα και η συμπεριφορά του προς τον κίνδυνο χαρακτηρίζεται από αύξουσα αποστροφή προς αυτόν (μέθοδος αποφυγής ζημίας) τότε επιλέγει να αποξηλώσει και να μειώσει αρκετά την παραγωγή των μονάδων αερίων καυσίμων και λιγότερο των μονάδων στερεών καυσίμων, των μονάδων δηλαδή που παρουσιάζουν περισσότερη αβεβαιότητα. Το κενό που προκύπτει από την μείωση της παραγωγής των αερίων και στερεών καυσίμων στην συνολική παραγόμενη ενέργεια αντικαθίσταται από πυρηνικούς σταθμούς, μονάδες ΑΠΕ και αντλησιοταμιευτικούς σταθμούς. Όταν οι προτιμήσεις του χαρακτηρίζονται από φθίνουσα αποστροφή προς τον κίνδυνο (υπόδειγμα με χρήση της προσέγγισης του Markowitz και αξίας σε κίνδυνο), η μείωση της ισχύος και της παραγόμενης ενέργειας είναι μικρότερη και κατά συνέπεια είναι μικρότερη και η αύξηση της ισχύος και της παραγόμενης ενέργειας από τους πιο βέβαιους σταθμούς συγκριτικά με την περίπτωση που χαρακτηρίζεται από αύξουσα αποστροφή προς τον κίνδυνο. Τέλος, τη μικρότερη μείωση επιλέγει όταν αξιολογεί τις μονάδες ξεχωριστά (μέθοδος δικαιωμάτων προαίρεσης) όπως επίσης στην περίπτωση αυτή επιλέγει τη μικρότερη αύξηση της ισχύος και παραγωγής των μονάδων ΑΠΕ και πυρηνικών σταθμών. Στην περίπτωση αυτή δύναται η εγκατεστημένη ισχύς των σταθμών να μην επαρκεί για να καλύψει τη ζήτηση, οπότε οι αεριοστρόβιλοι είναι η εναπομένουσα λύση με αποτέλεσμα αύξηση τους κόστους. Μειώνει περισσότερο την ισχύ και την παραγωγή από μονάδες αερίου αεριοστρόβιλων όταν θεωρεί πως έχει τη δυνατότητα λήψης διορθωτικών αποφάσεων στη συνέχεια (μέθοδος δύο σταδίων).

Στην περίπτωση που ο αποφασίζων θεωρεί μεγάλη αβεβαιότητα ως προς την εξέλιξη όλων των πιθανοτικών παραμέτρων του προβλήματος (σενάριο μεγάλης αβεβαιότητας για τις τιμές άνθρακα, φυσικού αερίου και δικαιωμάτων εκπομπών) οι αποφάσεις για τη λειτουργία και τις επενδύσεις εξαρτώνται από τις προτιμήσεις του ως προς τον κίνδυνο ως εξής. Όταν οι προτιμήσεις του χαρακτηρίζονται από αύξουσα αποστροφή προς τον κίνδυνο (μέθοδος αποφυγής ζημίας) τότε επιλέγει να αποξηλώσει και να μειώσει την παραγωγή αρκετά των μονάδων που παρουσιάζουν περισσότερη αβεβαιότητα, δηλαδή των μονάδων στερεών και αερίων καυσίμων. Μειώνει τους σταθμούς στερεών καυσίμων σε μεγαλύτερο βαθμό και των αερίων σε μικρότερο βαθμό δεδομένου ότι χρειάζεται να καλύπτουν τις απαιτήσεις του συστήματος στην άνοδο ή κάθοδο του φορτίου. Ταυτόχρονα αυξάνει την ισχύ και την παραγόμενη ενέργεια από σταθμούς ΑΠΕ και πυρηνικούς ώστε να μπορεί να καλυφθεί η ζητούμενη ενέργεια. Εάν οι προτιμήσεις του

αποφασίζοντα χαρακτηρίζονται από φθίνουσα αποστροφή προς τον κίνδυνο (υπόδειγμα με χρήση της προσέγγισης του Markowitz και αξίας σε κίνδυνο) οι αποφάσεις που λαμβάνει αφορούν τη μείωση της ισχύος των μονάδων με τη μεγαλύτερη αβεβαιότητα, δηλαδή των μονάδων στερεών και αερίων καυσίμων, και την αύξηση της ισχύος των μονάδων που δεν παρουσιάζουν αβεβαιότητα, δηλαδή των πυρηνικών σταθμών, των αντλησιοταμιευτικών μονάδων και των μονάδων ΑΠΕ. Η μείωση της ισχύος των μονάδων με τη μεγαλύτερη αβεβαιότητα, δηλαδή των μονάδων στερεών και αερίων καυσίμων, και η αύξηση της ισχύος των μονάδων που δεν παρουσιάζουν αβεβαιότητα, δηλαδή των πυρηνικών σταθμών, των αντλησιοταμιευτικών μονάδων και των μονάδων ΑΠΕ, είναι μεγαλύτερη όταν ο αποφασίζων θεωρεί πως έχει τη δυνατότητα να πραγματοποιήσει διορθωτικές κινήσεις κατά στάδια (μέθοδος δύο σταδίων) και μικρότερη όταν αξιολογεί κάθε μονάδα ξεχωριστά (μέθοδος δικαιωμάτων προαίρεσης). Όπως αναλύθηκε και προηγουμένως, στην περίπτωση που θεωρεί μεγάλη αβεβαιότητα ως προς την εξέλιξη πολλών παραμέτρων είναι πιθανό να μην επενδύσει σε νέες μονάδες οι οποίες δεν προκύπτουν συμφέρουσες και να μην λειτουργήσει όλες τις μονάδες που διαθέτει με αποτέλεσμα να μην καλυφθεί η ζητούμενη ενέργεια.

Σύμφωνα με τα όσα αναφέρθηκαν, η μεθοδολογία που προσομοιώνει καλύτερα την συμπεριφορά μιας επιχείρησης είναι η μέθοδος των δικαιωμάτων προαίρεσης όταν χρησιμοποιείται κάποια συνάρτηση χρησιμότητας ώστε να ενσωματωθούν οι προτιμήσεις της επιχείρησης αναφορικά με τον κίνδυνο. Η συνάρτηση χρησιμότητας αυτή δύναται να προσομοιώνει είτε αυξανόμενη αποστροφή προς τον κίνδυνο, όπως στη μεθοδολογία μεγιστοποίησης της πιθανότητας αποφυγής ζημίας, είτε φθίνουσα αποστροφή προς τον κίνδυνο, όπως στη μεθοδολογία με χρήση της προσέγγισης του Markowitz και της αξίας σε κίνδυνο. Η προσέγγιση αυτή μπορεί να επιλύεται αποτελεσματικά και σε μοντέλα πολύ μεγάλου μεγέθους, και προτείνεται από τη διατριβή για εμπειρική εφαρμογή. Είναι χρήσιμη η μορφοποίηση ολιγοπωλιακού ανταγωνισμού στο μοντέλο αυτό, γιατί αλλιώς τα οφέλη από τη στοχαστικότητα για εξαγωγή συμπερασμάτων περιορίζονται σημαντικά.



### *Δημοσιεύσεις σε διεθνή επιστημονικά περιοδικά*

- Capros P., De Vita A., Fragkos P., Kouvaritakis N., Paroussos L., Fragkiadakis K., **Tasios N.**, Siskos P., "The impact of hydrocarbon resources and GDP growth assumptions for the evolution of the EU energy system for the medium and long term", Energy Strategy Reviews, Volume 6, January 2015, Pages 64–79.
- **Tasios N.**, Capros P., Apostolaki E., De Vita A., (2013), "Analysing the bio-energy supply system in the context of the 20-20-20 targets and the 2050 decarbonisation targets in the EU", Biofuels, Bioproducts & Biorefining, Wiley Online Library
- Capros P., **Tasios N.**, De Vita A., Mantzos L., Paroussos L., (2012), "Transformations of the energy system in the context of the decarbonisation of the EU economy in the time horizon to 2050" Energy Strategy Reviews, Volume 1, Issue 2, pages 85-96
- Capros P., **Tasios N.**, De Vita A., Mantzos L., Paroussos L., (2012), "Model-based analysis of decarbonising the EU economy in the time horizon to 2050" Energy Strategy Reviews, Volume 1, Issue 2, pages 76-84
- Capros P., **Tasios N.**, De Vita A., Mantzos L., Paroussos L., (2012), "EU Energy Sector Perspectives for 2030 Beyond the 20-20-20 Objective", Review of Business and Economic Literature, Vol. 57 Issue 2
- Capros P., Mantzos L., Paroussos L., **Tasios N.**, Klaassen G., Van Ierland T., (2011), "Analysis of the EU policy package on climate change and renewables", Energy Policy, Volume 39, Issue 3
- Capros, P.; Mantzos, L.; Papandreou, V.; **Tasios, N.**; Klaassen, G., (2009), "Model - based evaluation of European carbon capture and storage - policy options", European Review of Energy Markets, Volume 3: Issue 2, ISSN 1782-1029

### *Δημοσιεύσεις σε πρακτικά συνεδρίων*

- Capros P., Zampara M., **Tasios N.**, Papadopoulos D., Kost C., Hartmann N., Senkpiel C., Schlegl T. (2015) " Model based analysis of the EU power system based on RES – a case study for Greece and Germany " presented at the 12th International Conference on the European Energy Market (EEM), 28-30 May 2015
- **Tasios N.**, Capros P., Zampara M., (2014) "Model-based analysis of possible capacity mechanisms until 2030 in the European internal electricity market" presented at the 11th International Conference on the European Energy Market (EEM), Krakow, Poland, 28-30 May 2014
- Capros P., **Tasios N.**, Marinakis A., (2012), "Very high penetration of renewable energy sources to the European electricity system in the context of model-based analysis of an energy roadmap towards a low carbon EU economy by 2050", IEEE Xplore Digital Library, Digital Object Identifier: 10.1109/EEM.2012.6254669
- Capros, P.; Mantzos, L.; Papandreou, V.; **Tasios, N.**; Klaassen, G., (2008), "Energy

systems analysis of CCS development in Europe" IEEE CONFERENCE EEM 2008

### *Κεφάλαια σε επιστημονικά βιβλία*

- Helmreich, S. and Keller, H. (Eds.) with contributions from various authors (2011). *FREIGHTVISION – “Sustainable European Freight Transport 2050”*. 1st Edition January 2011, ISBN: 978-3-642-13370-1 , Springer

### *Άλλες μελέτες/ τεχνικές εκθέσεις*

- Capros P., De Vita A., **Tasios N.**, Papadopoulos D., Siskos P., Apostolaki E., Zampara M., Paroussos L., Fragiadakis K., Kouvaritakis N., et al., (IIASA -GAINS model: L. Høglund-Isaksson, W. Winiwarter, P. Purohit, IIASA -GLOBIOM model: H. Bottcher, S. Frank, P. Havlok, M. Gusti, EuroCARE: H. P. Witzke), (2013), "EU ENERGY, TRANSPORT AND GHG EMISSIONS - TRENDS TO 2050", European Commission, Directorate-General for Energy, Directorate-General for Climate Action and Directorate-General for Mobility and Transport, Publications Office of the European Union, Luxembourg, ISBN: 978-92-79-33728-4.
- Capros P., De Vita A., **Tasios N.**, Chanioti X., Kouvaritakis N., Fragkos P., (2011), "Energy Roadmap 2050 - Impact assessment and scenario analysis", European Commission-Directorate General for Energy
- Capros, P., **Tasios, N.**, Chanioti, X., Kouvariakts, N. (2011). "Towards a low carbon economy" in Economic, Social and Environmental Impacts of Climate Change in Greece. pp. 433-490. Bank of Greece
- Capros, P., Zampara, M., Paroussos, L., **Tasios, N.** (2011). "Cost-benefit assessment of the climate policy in Greece" in Economic, Social and Environmental Impacts of Climate Change in Greece. pp. 503-512. Bank of Greece
- Capros, P., Mantzos, L., **Tasios, N.**, Chanioti, X., De Vita, A., Paroussos, L., Kouvaritakis, N., Fragkos, P., (2011). "Long-term energy outlook: The challenges for the energy sector in Greece until 2050. Foundation for Economic and Industrial Research
- Capros P., Mantzos L., **Tasios N.**, De Vita A., Kouvaritakis N., (2010),"Trends to 2030-update 2009", European Commission-Directorate General for Energy in collaboration with Climate Action DG and Mobility and Transport DG, August 2010. Office for official publications of the European Communities, Luxembourg, ISBN 978-92-79-16191-9
- Capros P., Mantzos L., Papandreou V., **Tasios N.**, (2008),"Trends to 2030-update 2007", European Commission-Directorate General for Energy and Transport, Office for official publications of the European Communities, Luxembourg, ISBN 978-92-79-07620-6





## 15 Βιβλιογραφία

---

- Agnew, M., Schrattenholzer, L., & Voß, A. (1979). *A Model for Energy Supply System Alternatives and their General Environmental Impact*. Laxenburg: IIASA.
- Allais, M., & Hagan, O. (1979). *Expected utility and the Allais paradox*. Dordrecht: Reidel.
- Ammann, M., & Reich, C. (2001). VaR for Nonlinear Financial Instruments-Linear Approximation or full Monte Carlo? *Financial Markets and Portfolio Management*, 15(3), 363-378.
- Andersson, F., Mausser, H., Rosen, D., & Uryasev, S. (2001). Credit risk optimization with Conditional Value-at-Risk criterion. *Mathematical Programming, Series B*, 89, 273-291.
- Arrow, K. J., & Fisher, A. C. (1974). Environmental Preservation, Uncertainty, and Irreversibility. *the Quarterly Journal of Economics*, 312-319.
- Artzner, P., Delbaen, F., Eber, J., & Heath, D. (1997). Thinking coherently. *Risk*, 10, 68-71.
- Artzner, P., Delbaen, F., Eber, J., & Heath, D. (1999). Coherent Measures of Risk. *Mathematical Finance*, 9(3), 203-228.
- Bakirtzis, G. A., Biskas, P. N., & Chatziathanasiou, V. (2012). Generation Expansion Planning by MILP considering mid-term scheduling decisions. *Electric Power Systems Research*, 86, 98–112.
- Baldursson, F. M. (1998). Irreversible investment under uncertainty in oligopoly. *Journal of Economic Dynamics and Control*, 627-644.
- Baldursson, F. M., & Karatzas, I. (1997). Irreversible investment and industry equilibrium. *Finance and Stochastics*, 69-89.
- Bams, D., & Wielhouwer, J. L. (2001). Empirical Issues In Value-At-Risk. *Astin Bulletin*, 31(2), 299-315.
- Barforoushi, T., Moghaddam, M., Javidi, M., & Sheikh-El-Eslami, M. (2010). Evaluation of Regulatory Impacts on Dynamic Behavior of Investments in Electricity Markets: A New Hybrid DP/GAME Framework. *IEEE Transactions on Power Systems*, 1978-1986.
- Beale, E. M. (1955). On Minimizing a Convex Function Subject to Linear Inequalities. *Journal of the Royal Statistical Society, Series B: Methodological*, 17, 173-184.

- 
- Beder, T. S. (1995). VAR: Seductive but dangerous. *Financial Analysts Journal*, 51(5), 12-24.
- Beltratti, A., Consiglio, A., & Zenios, S. A. (1999). Scenario modeling for the management of international bond portfolios. *Annals of Operations Research*, 85, 227-247.
- Berger, J. O. (2006). The Case for Objective Bayesian Analysis. *Bayesian Analysis*, 3, 385-402.
- Best, M. J., & Ding, B. (1995). On the continuity of the minimum in parametric quadratic programs. *Journal of Optimization Theory and Applications*, 86, 245-250.
- Best, M. J., & Grauer, R. R. (1991). Sensitivity analysis for mean-variance portfolio problems. *Management Science*, 37, 980-989.
- Best, P. (1998). *Implementing Value at Risk*. New Jersey, U.S.A.: John Wiley and Sons.
- Binswanger, H. P. (1980). Attitudes Toward Risk, Experimental Measurement in Rural India. *American Journal of Agricultural Economics*, 62, 395-407.
- Birge, J., & Louveaux, F. (1997). Basic Properties and Theory. Στο P. Glynn, & S. Robinson (Επιμ.), *Introduction to Stochastic Programming* (σσ. 83-136). New York, U.S.A.: Springer.
- Black, F., & Scholes, M. (1973). The Pricing of Options and Corporate Liabilities. *Journal of Political Economy*, 81(3), 637-654.
- Bollerslev, T., Engle, R. F., & Nelson, D. B. (1994). ARCH models. Στο *The Handbook of Econometrics 4* (σσ. 2959-3038). Amsterdam, the Netherlands: Elsevier.
- Botterud, A., Ilic, M., & Wangensteen, I. (2005). Optimal investments in power generation under centralized and decentralized decision making. *IEEE Transactions on Power Systems*, 254-263.
- Brennan, M. J., & Schwartz, E. S. (1985). Evaluating Natural Resource Investments. *The Journal of Business*, 135-157.
- Brennan, M., & Trigeorgis, L. (2000). Real Options: Development and New Contributions. Στο M. Brennan, & L. Trigeorgis (Επιμ.), *Project Flexibility, Agency and Competition*. Oxford University Press.
- Broadie, M. (1993). Computing efficient frontiers using estimated parameters. *Annals of Operations Research*, 45, 21-58.

- Bucay, N., & Rosen, D. (1999). Credit Risk of an International Bond Portfolio: a Case Study. *ALGO Research Quarterly*, 2(1), 9-29.
- Capros, P., Tasios, N., Vita, A. D., Mantzos, L., & Paroussos, L. (2012). Model-based analysis of decarbonising the EU economy in the time horizon to 2050. *Energy strategy reviews*, 1, 76-84.
- Capros, P., Tasios, N., Vita, A. D., Mantzos, L., & Paroussos, L. (2012). Transformation of the energy system in the context of the decarbonisation of the EU economy. *Energy Strategy Reviews*, 2, 85-96.
- Carino, D. R., Kent, T., Myers, D. H., Stacy, C., Sylvanus, M., Turner, A. L., . . . Ziemba, W. T. (1994). The Russell–Yasuda Kasai model: An asset/liability model for a Japanese insurance company using multistage stochastic programming. *Interfaces*, 24, 29–49.
- Chang, F.-R. (2004). *Stochastic optimization in continuous time*. Cambridge, the UK: Cambridge University Press.
- Chen, A. H., Jen, F. C., & Zions, S. (1972). The optimal portfolio revision policy. *Journal of Business*, 44, 51–61.
- Cheng, L., Subrahmanian, E., & Westerberg, A. (2003). Design and Planning under Uncertainty: issues on problem formulation and solution. *Computers and Chemical Engineering*, 27, 781-801.
- Chopra, V. K., & Ziemba, W. T. (1993). The effects of errors in means, variances, and covariances on optimal portfolio choice. *The Journal of Portfolio Management*, 20, 6–11.
- Chuang, A., Wu, F., & Varaiya, P. (2001). A game-theoretic model for generation expansion planning: problem formulation and numerical comparisons. *IEEE Transactions on Power Systems*, 885-891.
- Consigli, G., & Dempster, M. A. (1997). Solving dynamic portfolio problems using stochastic programming. *ZAMM - Journal of Applied Mathematics and Mechanics*, 77, S535–S536.
- Copeland, T. E., Weston, J. F., & Shastri, K. (2005). *Financial Theory and Corporate Policy* (4η εκδ.). Addison-Wesley Publishing Company.
- Corkalo, S. (2011). Comparison of Value at Risk Approaches on a Stock Portfolio. *Croatian Operational Research Review (CRORR)*, 2, 81-90.

- 
- Csaba, F. (2008). Handling CVaR objectives and constraints in two-stage stochastic. *European Journal of Operational Research*, 191(3), 888-911.
- Dantzig, G. (1955). Linear programming under uncertainty. *Management Science*, 1, 197-206.
- Dantzig, G. B., & Infanger, G. B. (1993). Multi-stage stochastic linear programs for portfolio optimization. *Annals of Operations Research*, 45, 59–76.
- Day, C., Hobbs, B., & Pang, J.-S. (2002). Oligopolistic competition in power networks: A conjectured supply function approach. *IEEE Transactions on Power Systems*, 17, 597–607.
- DeGroot, M. H., & Schervish, M. J. (2002). *Probability and Statistics* (3η εκδ.). Reading, MA: Addison-Wesley.
- Dempster, M. A. (1988). On stochastic programming: II. Dynamic problems under risk. *Stochastics*, 25, 15–42.
- Dixit, A., & Pindyck, R. (1994). *Investment under Uncertainty*. Princeton, New Jersey: Princeton University Press.
- Duffie, D., & Pan, J. (1997). An Overview of Value-at-Risk. *Journal of Derivatives*, 4, 7–49.
- Embrechts, P., Kluppelberg, C., & Mikosh, T. (1997). *Extremal Events in Finance and Insurance*. New York: Springer-Verlag.
- Etheridge, A. (2002). *A Course in Financial Calculus*. Cambridge, the UK: Cambridge University Press.
- European Commission. (1997). *Directive 96/92/EC of the European Parliament and of the Council from 19 December 1996 concerning common rules for the internal market in electricity*.
- Fama, E. F. (1968). Risk, Return And Equilibrium: Some Clarifying Comments. *The Journal of Finance*, 23(1), 29-40.
- Fama, E. F. (1970). Multiperiod consumption-investment decisions. *American Economic Review*, 60, 163–174.
- Ferris, M. C., & Munson, T. (1998). *Complementarity problems in GAMS and the PATH solver*. Cambridge, England: Computation in Economics, Finance and Engineering: Economic systems.
- Ferris, M. C., & Munson, T. (2010). *PATH 4.6*. GAMS Corporation 2010.



- Fichtner, W. (1999). *Strategische Optionen der Energieversorger zur CO<sub>2</sub>-Minderung: ein Energie-und Stoffflussmodell zur Entscheidungsunterstützung*. Berlin: Erich Schmidt Verlag.
- Finon, D. (1974). Optimization model for the energy sector. *Energy Policy*, 6, 136–151.
- Fishbone, L., & Abilock, H. (1981). MARKAL: A linear programming model for energy systems analysis: Technical description of the BNL version. *International Journal of Energy Research*, 5, 353–375.
- Fisher, I. (1907). *The Rate of Interest: Its Nature, Determination and Relation to Economic Phenomena*. New York: Macmillan Co.
- Gabriel, S. A., Zhuang, J., & Kiet, S. (2005). A large-scale linear complementarity model of the North American natural gas market. *Energy Economics*, 27(4), 639–665.
- Gahungu, J., & Smeers, Y. (2012). A Real Options Model for Electricity Capacity Expansion. *EUI Working Papers*, 55.
- Girsanov, I. V. (1960). On Transforming a Certain Class of Stochastic Processes by Absolutely Continuous Substitution of Measures. *Theory of Probability and Its Applications*, 5(3), 285–301.
- Glover, F., & Jones, C. K. (1988). A stochastic generalized network model and large-scale mean-variance algorithm for portfolio selection. *Journal of Information & Optimization Sciences*, 9, 299–316.
- Goldstein, M. (2006). Subjective Bayesian Analysis: Principles and Practice. *Bayesian Analysis*, 3, 403–420.
- Gondzio, J., & Kouwenberg, R. (2001). High Performance Computing for Asset Liability Management. *Operations Research*, 49(6), 879-891.
- Grenadier, S. R. (2002). Option Exercise Games: An Application to the Equilibrium Investment Strategies of Firms. *Review of Financial Studies*, 691-721.
- Haftendorn, C., Holz, F., & Hirschhausen, C. (2012). The end of cheap coal? A techno-economic analysis until 2030 using the COALMOD-World model. *Fuel*, 102, 305–325.
- Hahn, H., Meyer-Nieberg, S., & Pickl, S. (2009). Electric load forecasting methods: Tools for decision making. *European Journal of Operational Research*, 199, 902–907.
- Hanoch, G., & Levy, H. (1969). The efficiency analysis of choices involving risk. *The Review of Economic Studies*, 36, 335–346.

- 
- He, H., & Pearson, N. D. (1991). Consumption and portfolio policies with incomplete markets and short-sale constraints: The finite dimensional case. *Mathematical Finance*, 1, 1–10.
- He, H., & Pearson, N. D. (1991). Consumption and portfolio policies with incomplete markets and short-sale constraints: The infinite dimensional case. *Journal of Economic Theory*, 54, 259–304.
- Heitsch, H., & Roemisch, W. (2003). Scenario Reduction Algorithms. *Computational Optimization and Applications*, 24, 187–206.
- Henry, C. (1974). Investment decisions under uncertainty: The irreversibility effect. *American Economic Review*, 1006-1012.
- Hirshleifer, J., & Riley, J. G. (2002). *The analytics of Uncertainty and Infe rmation*. Cambridge, the United Kingdom: Cambridge University Press.
- Hobbs, B. (2001). Linear complementarity models of Nash–Cournot competition in bilateral and POOLCO power markets. *IEEE Transactions on Power Systems*, 16, 194–202.
- Holt, C., & Laury, S. (2002). Risk Aversion and Incentive Effects. *American Economic Review*, 92(5), 1644-1655.
- Horn, R. A., & Johnson, C. R. (1985). *Matrix Analysis*. Cambridge, the UK: Cambridge University Press.
- Hotelling, H. (1931). The economics of exhaustible resources. *The Journal of Political Economy*, 39, 137–175.
- Jewitt, I. (1987). Risk aversion and the choice between risky prospects: The preservation of comparative statistics results. *The Review of Economic Studies*, 54, 73–85.
- Jewitt, I. (1989). Choosing between risky prospects: The characterization of comparative statistics results, and location independent risk. *Management Science*, 35, 60–70.
- Jobson, J. D. (1991). Confidence regions for the mean-variance efficient set: An alternative approach to estimation risk. *Review of Quantitative Finance and Accounting*, 1, 235–257.
- Jorgenson, D. (1963). Capital Theory and Investment Behavior. *American Economic Review*, 247-259.
- Jorion, P. (1996). *Value at Risk: A New Benchmark for Measuring Derivatives Risk*. Chicago, IL: Irwin Professional Pub.

- Jouini, E., Napp, C., & Nocetti, D. (2013). Collective risk aversion. *Social Choice and Welfare*, 40, 411–437.
- Kahneman, D., & Tversky, A. (1979). Prospect Theory: An Analysis of Decision under Risk. *Econometrica*, 47(2), 263-291.
- Kall, P., & Mayer, J. (2005). *Stochastic Linear Programming: Models, Theory, and Computation*. Springer, International Series in Operations Research and Management Science.
- Kallberg, K. G., & Ziemba, W. T. (1983). Comparison of alternative utility functions in portfolio selection problems. *Management Science*, 29, 1257–1276.
- Kannan, S., Baskar, S., McCalley, J., & Murugan, P. (2009). Application of NSGA-II Algorithm to Generation Expansion Planning. *IEEE Transactions on Power Systems*, 454-461.
- Kannan, S., Slochanal, S. M., & Padhy, N. P. (2005). Application and comparison of meta-heuristic techniques to generation expansion planning problem. *IEEE Transactions on Power Systems*, 20, 466–475.
- Kannan, S., Slochanal, S. M., Subbaraj, P., & Padhy, N. P. (2004). Application of particle swarm optimization technique and its variants to generation expansion planning problem. *Electric Power Systems Research*, 70, 203–210.
- Kast, R., Luciano, E., & Peccati, L. (1998). VaR and Optimization. Trento: 2nd International Workshop on Preferences and Decisions, July 1-3 1998.
- Kazempour, S., Conejo, A., & Ruiz, C. (2011). Strategic generation investment using a complementarity approach. *IEEE Transactions on Power Systems*, 940-948.
- Kijima, M., & Ohnishi, M. (1993). Mean-risk analysis of risk aversion and wealth effects on optimal portfolios with multiple investment opportunities. *Annals of Operations Research*, 45, 147–163.
- King, A. J., & Jensen, D. L. (1992). Linear-quadratic efficient frontiers for portfolio optimization. *Applied Stochastic Models and Data Analysis*, 8, 195–207.
- Kolbin, V. V. (1977). *Stochastic programming*. Dordrecht, Holland and Boston, U.S.A.: R. Reidel Publishing Company.
- Kroese, D., Taimre, T., & Botev, Z. (2011). *Handbook of Monte Carlo Methods*. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.

- 
- Krokhmal, P., Palmquist, J., & Uryasev, S. (2002). Portfolio optimization with Conditional Value-at-Risk objective and constraints. *Journal of Risk*, 4, 11-27.
- Kroll, Y., Leshno, M., Levy, H., & Spector, Y. (1995). Increasing risk, decreasing absolute risk aversion and diversification. *Journal of Mathematical Economics*, 24, 537–556.
- Kroll, Y., Levy, H., & Markowitz, H. M. (1984). Mean-variance versus direct utility maximization. *Journal of Finance*, 39, 47–61.
- Laffont, J.-J. (1989). *The Economics of Uncertainty and Information*. Cambridge: The MIT Press.
- Leahy, J. V. (1993). Investment in Competitive Equilibrium: The Optimality of Myopic Behavior. *The Quarterly Journal of Economics*, 1105-1133.
- Leland, H. (1972). Theory of Firm Facing Uncertain Demand. *American Economic Review*, 278-291.
- Levy, H., & Markowitz, H. M. (1979). Approximating expected utility by a function of mean and variance. *American Economic Review*, 69, 308–317.
- Lewellen, W. G. (1977). Some observations on risk-adjusted discount rates. 32(4), 1331–1337.
- Lintner, J. (1965). The Valuation of Risk Assets and the Selection of Risky Investments in Stock Portfolios and Capital Budgets. *The Review of Economics and Statistics*, 47(1), 13-37.
- Litterman, R. (1997). Hot Spots and Hedges (I). *Risk*, 10(3), 42-45.
- Litterman, R. (1997). Hot Spots and Hedges (II). *Risk*, 10(5), 38-42.
- Lucas, A., & Klaasen, P. (1998). Extreme returns, downside risk, and optimal asset allocation. *Journal of Portfolio Management*, 25(1), 71-79.
- Lynch, S. M. (2007). *Introduction to Applied Bayesian Statistics and Estimation for Social Scientists*. New York: Springer.
- MacLean, L. C., & Weldon, K. (1996). Estimating multivariate random effects without replication. *Communications in Statistics - Theory and Methods*, 25, 1447–1469.
- Majd, S., & R., P. (1987). Time to Build, Option Value, and Investment Decisions. *Journal of Financial Economics*, 7-27.

- Majumdar, S., & Chattopadhyay, D. (1999). A model for integrated analysis of generation capacity expansion and financial planning. *IEEE Transactions on Power Systems*, *14*, 466–471.
- Malik, A. S., Cory, B. J., & Wijayatunga, P. D. (1999). Applications of probabilistic peak-shaving technique in generation planning. *IEEE Transactions on Power Systems*, *14*, 1543–1548.
- Markov, A. (1971). Extension of the limit theorems of probability theory to a sum of variables connected in a chain. Στο *Appendix B of: R. Howard. Dynamic Probabilistic Systems, volume 1: Markov Chains*. New Jersey, U.S.A.: John Wiley and Sons.
- Markowitz, H. M. (1952). Portfolio selection. *The Journal of Finance*, *7*(1), 77–91.
- Markowitz, H. M. (1959). *Portfolio Selection: Efficient Diversification of Investments*. New Jersey, U.S.A.: John Wiley and Sons.
- Mas-Colell, A., Whinston, M. D., & Green, J. R. (1995). *Microeconomic Theory*. Oxford: Oxford University Press.
- Mausser, H., & Rosen, D. (1998). Beyond VaR: From Measuring Risk to Managing Risk. *ALGO Research Quarterly*, *1*(2), 5-20.
- Mcdonald, R., & Siegel, D. (1986). The Value of Waiting to Invest. *The Quarterly Journal of Economics*, 707-728.
- Merton, R. C. (1971). Optimal consumption and portfolio rules in a continuous-time model. *Journal of Economic Theory*, *3*, 373–413.
- Merton, R. C. (1973). Theory of Rational Option Pricing. *The Bell Journal of Economics and Management Science*, *4*(1), 141-183.
- Messner, S. (1984). *User's Guide for the Matrix Generator of Message II: Model Description and Implementation Guide*. Laxenburg: IIASA.
- Messner, S., & Strugbegger, M. (2009). Model-based decision support in energy planning. *International Journal of Global Energy Issues*, *12*, 196–207.
- Meza, J. L., Yildirim, M. B., & Masud, A. S. (2007). A model for the multiperiod multiobjective power generation expansion planning. *IEEE Transactions on Power Systems*, *22*, 871–878.
- Meza, J. L., Yildirim, M. B., & Masud, A. S. (2009). A multiobjective evolutionary programming algorithm and its applications to power generation expansion planning.

- 
- IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Part A: Systems and Humans*, 39(5), 1086–1096.
- Mo, B., Hegge, J., & Wangensteen, I. (1991). Stochastic generation expansion planning by means of stochastic dynamic programming. *IEEE Transactions on Power Systems*, 6, 662–668.
- Moest, D., & Keles, D. (2010). A survey of stochastic approaches for liberalised electricity markets. *European Journal of Operational Research*, 543-556.
- Morgan, J. P. (1996). RiskMetrics, Technical Document, 4–th Edition. New York, NY: J. P. Morgan Inc.
- Mossin, J. (1966). Equilibrium in a Capital Asset Market. *Econometrica*, 34, 768–783.
- Mossin, J. (1968). Optimal multiperiod portfolio policies. *Journal of Business*, 41, 215–229.
- Möst, D. (2006). *Zur Wettbewerbsfähigkeit der Wasserkraft in liberalisierten Elektrizitätsmärkten – eine modellgestützte Analyse dargestellt am Beispiel des schweizerischen Energieversorgungssystems*. Karlsruhe: Universität Karlsruhe.
- Möst, D., & Keles, D. (2010). A survey of stochastic modelling approaches for liberalised electricity markets. *European Journal of Operational Research*, 207, 543–556.
- Mulvey, J. M. (1987). Nonlinear network models in finance. *Advances in Mathematical Programming and Financial Planning*, 1, 253.
- Mulvey, J. M., & Vladimirou, H. (1989). Stochastic network optimization models for investment planning. *Annals of Operations Research*, 20, 187–217.
- Murugan, P., Kannan, S., & Baskar, S. (2009). Application of NSGA-II algorithm to single-objective transmission constrained generation expansion planning. *IEEE Transactions on Power Systems*, 24, 1790–1797.
- Murugan, P., Kannan, S., & Baskar, S. (2009). Application of NSGA-II Algorithm to Single-Objective Transmission Constrained Generation Expansion Planning. *IEEE Transactions on Power Systems*, 1790-1797.
- Myers, S. C. (1977). Determinants of corporate borrowing. *Journal of Financial Economics*, 147-175.
- Nanduri, V., Das, T., & Rocha, P. (2009). Generation capacity expansion in energy markets using a two-level game-theoretic model. *IEEE Transactions on Power Systems*, 1165-1172.

- Nocetti, D., Jouini, E., & Napp, C. (2008). Properties of the social discount rate in a benthamite framework with heterogeneous degrees of impatience. *Management Science*, 54, 1822–1826.
- Park, J., Park, Y., Won, J., & Lee, K. (2000). An improved genetic algorithm for generation expansion planning. *IEEE Transactions on Powersystems*, 916-922.
- Park, Y. M., Won, J. R., Park, J. B., & Kim, D. G. (1999). Generation expansion planning based on an advanced evolutionary programming. *IEEE Transactions on Power Systems*, 14, 299–305.
- Pereira, A., & Saraiva, J. (2009). A decision support tool for generation expansion planning in competitive markets using System Dynamics models. *2009 IEEE Bucharest PowerTech* (σσ. 1-7). Bucharest: IEEE.
- Perold, A. F. (1984). Large-scale portfolio optimization. *Management Science*, 30, 1143–1160.
- Pham, H., Rheinlander, T., & Schweizer, M. (1998). Mean-variance hedging for continuous processes: New results and examples. *Finance and Stochastics*, 2, 173–198.
- Pindyck, R. (1988). Irreversible Investment, Capacity Choice and the Value of the firm. *American Economic Review*, 969-985.
- Pindyck, R. (1991). Irreversibility, Uncertainty and Investment. *Journal of Economic Literature*, 1110-1152.
- Pindyck, R. S. (1980). Uncertainty and Exhaustible Resource Markets. *Journal of Political Economy*, 1203-1225.
- Pogue, G. A. (1970). An extension of the Markowitz portfolio selection model to include variable transactions' costs, short sales, leverage policies and taxes. *Journal of Finance*, 25, 1005–1027.
- Pratt, J. W. (1964). Risk Aversion in the Small and in the Large. *Econometrica*, 32(1/2 ), 122-136.
- Prekopa, A. (2003). Probabilistic programming. Στο *Stochastic Programming, Handbooks in Operations Research and Management Science 10* (A. Ruszczyński, A. Shapiro εκδ., σσ. 267-351). Amsterdam: Elsevier.
- Press, S. J. (2003). *Subjective and Objective Bayesian Statistics*. New York: John Wiley & Sons.

- 
- Pritsker, M. (1997). Evaluating Value at Risk Methodologies. *Journal of Financial Services Research*, 12(2/3), 201–242.
- Ramos, A., Perez-Arriaga, I. J., & Bogas, J. (1989). A nonlinear programming approach to optimal static generation expansion planning. *IEEE Transactions on Power Systems*, 4, 1140–1146.
- Remme, U. (2006). *Zukünftige Rolle erneuerbarer Energien in Deutschland: Sensitivitätsanalysen mit einem linearen Optimierungsmodell*. Stuttgart: Universität Stuttgart.
- Rockafellar, R. T. (1970). *Convex Analysis*. New Jersey, U.S.A.: Princeton University Press.
- Rockafellar, R. T., & Uryasev, S. P. (2000). Optimization of Conditional Value-at-Risk. *Journal of Risk*, 2, 21-42.
- Rockafellar, R. T., & Uryasev, S. P. (2002). Conditional value-at-risk for general loss distributions. *Journal of Banking and Finance*, 26, 1443–1471.
- Roh, J. H., Shahidehpour, M., & Fu, Y. (2007). Security-constrained resource planning in electricity markets. *IEEE Transactions on Power Systems*, 812-820.
- Samuelson, P. A. (1969). Lifetime portfolio selection by dynamic stochastic programming. *The Review of Economic Studies*, 51, 239–246.
- Sandmo, A. (1971). On the Theory of the Competitive Firm Under Price Uncertainty. *American Economic Review*, 65-73.
- Sarykalin, S., Serraino, G., & Uryasev, S. (2008). Value-at-Risk vs. Conditional Value-at-Risk in Risk Management and Optimization.
- Sharpe, W. F. (1963). A Simplified Model for Portfolio Analysis. *Management Science*, 9(2), 277-293.
- Sharpe, W. F. (1964). Capital Asset Prices: A Theory of Market Equilibrium under Conditions of Risk. *The Journal of Finance*, 19(3), 425-442.
- Sirikum, J., Techanitisawad, A., & Kachitvichyanukul, V. (2007). A New Efficient GA-Benders' Decomposition Method: For Power Generation Expansion Planning With Emission Controls. *IEEE Transactions on Power Systems*, 1092-1100.
- Slade, M. E. (1994). What does an Oligopoly Maximize? *The Journal of Industrial Economics*, 45-61.



- Smeers, Y. (1997). Computable equilibrium models and the restructuring of the European previous term electricity next term and gas markets. *Energy Journal*, 18, 1–31.
- Smith, V., & Walker, J. (1993). Rewards, Experience and Decision Costs in First Price Auctions. *Economic Inquiry*, 31(2), 237-244.
- Stambaugh, F. (1996). Risk and Value-at-Risk. *European Management Journal*, 14(6), 612–621.
- Starrmann, F. (2001). *Entwicklung der Kraft-Wärme-Kopplung in liberalisierten Elektrizitätsmärkten*. München: Oldenbourg Industrieverlag.
- Steinbach, M. C. (2001). Markowitz Revisited: Mean-Variance Models in Financial Portfolio Analysis. *Society for Industrial and Applied Mathematics*, 43(1), 31–85.
- Teixeira Firmo, H., & Loureiro Legey, L. (2002). Generation expansion planning: an iterative genetic algorithm approach. *IEEE Transactions on Power Systems*, 901-906.
- Tekiner, H., Coit, D. W., & Felder, F. A. (2010). Multi-period multi-objective electricity generation expansion planning problem with Monte-Carlo simulation. *Electric Power Systems Research*, 80, 1394–1405.
- Terpezan-Tabara, O. A. (2008). The Importance of Value at Risk Method in the Management of Banking Risk. Bucharest, Romania: 4th International Conference of ASECU: “Development Cooperation and Competitiveness”, 22-24 May 2008.
- Theil, H. (1983). Econometric Models and Welfare Maximization. *Weltwirtschaftliches Archiv*, 72:60.
- Tobin, J. (1965). The theory of portfolio selection. Στο F. H. Hahn, & F. P. Brechling (Επιμ.), *The Theory of Interest Rates* (σσ. 3–51). London: Macmillan.
- Tobin, J. (1969). A General Equilibrium Approach to Monetary Theory. *Journal of Money, Credit and Banking*, 15-29.
- Tohidi, Y., Aminifar, F., & Fotuhi-Firuzabad, M. (2013). Generation expansion and retirement planning based on the stochastic programming. *Electric Power Systems Research*, 104, 138–145.
- Topaloglou, N. (2004). *A stochastic programming framework for international portfolio management*. University of Cyprus: Ph.D. dissertation (advisors: H. Vladimirov and S. Zenios), School of Economics and Management.

- 
- Topaloglou, N., Vladimirov, H., & Zenios, S. (2008). A dynamic stochastic programming model for international portfolio management. *European Journal of Operational Research*, 185(3), 1501–1524.
- Topaloglou, N., Vladimirov, H., & Zenios, S. A. (2002). CVaR models with selective hedging for international asset allocation. *Journal of Banking & Finance*, 26(7), 1535–1561.
- Van der Voort, E., Donni, E., Thonet, C., Bois D'Enghien, E., Dechamps, C., & Guilmot, J. (1984). *Energy Supply Modelling Package, EFOM-12C Mark I, Mathematical Description*. Louvain-La-Neuve.
- Ventosa, M., Baillo, A., Ramos, A., & Rivier, M. (2005). Electricity market modeling trends. *Energy Policy*, 33, 897–913.
- von Neumann, J., & Morgenstern, O. (1944). *Theory of Games and Economic Behavior* (3rd εκδ.). New Jersey, U.S.A.: Princeton University Press.
- Wallace, S., & Fleten, S. (2003). Stochastic Programming Models in Energy. Στο A. Ruszczyński, & A. Shapiro (Επιμ.), *Handbooks in OR and MS, Vol. 10* (Τόμ. 10, σσ. 637-676). Pennsylvania, U.S.A.: Elsevier Science.
- Wang, J., Shahidehpour, M., Li, Z., & Botterud, A. (2009). Strategic generation capacity expansion planning with incomplete information. *IEEE Transactions on Power Systems*, 1002-1010.
- Wei, S.-z., & Ye, Z.-x. (2007). Multi-period optimization portfolio with bankruptcy control in stochastic market. *Applied Mathematics and Computation*, 186(1), 414–425.
- Wood, A. J., & Wollenberg, B. F. (1984). *Power Generation, Operation and Control* (2nd εκδ.). New Jersey, U.S.A.: John Wiley and Sons.