



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ
ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΠΟΦΑΣΕΩΝ

**ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΚΑΙ ΠΡΟΒΛΕΨΗ ΤΙΜΩΝ
ΑΓΟΡΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ
ΜΕΘΟΔΩΝ ΜΑΘΗΣΗΣ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Δημήτριος Α. Κρόμπας

Επιβλέπων: Ιωάννης Ψαρράς
Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Οκτώβριος 2012



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ ΚΑΙ
ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΠΟΦΑΣΕΩΝ

**ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΚΑΙ ΠΡΟΒΛΕΨΗ ΤΙΜΩΝ
ΑΓΟΡΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ
ΜΕΘΟΔΩΝ ΜΑΘΗΣΗΣ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Δημήτριος Α. Κρόμπας

Επιβλέπων: Ιωάννης Ψαρράς

Καθηγητής ΕΜΠ

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 19^η Οκτωβρίου 2012.

.....

Ιωάννης Ψαρράς

Καθηγητής ΕΜΠ

.....

Δημήτριος Ασκούνης

Επίκουρος Καθηγητής
ΕΜΠ

.....

Βασίλειος Ασημακόπουλος

Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Οκτώβριος 2012

.....
Κρόμπας Δημήτριος

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

Copyright © Κρόμπας Δημήτριος.

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.

Ευχαριστίες

Καταρχάς θέλω να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή της διπλωματικής μου κο. Ιωάννη Ψαρρά, για την καθοδήγησή του και τη βοήθεια του σε κάθε φάση της δημιουργίας της. Επίσης, θέλω να ευχαριστήσω τον κο. Σωτήρη Παπαδέλη, η συνεισφορά του οποίου ήταν ιδιαίτερα σημαντική για την επιτυχή ολοκλήρωση της εργασίας αυτής. Θέλω να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου στους γονείς μου για την διαρκή τους υποστήριξη, που επέτρεψε την επιτυχή διεκπεραίωση των σπουδών μου. Τέλος, θέλω να ευχαριστήσω τους φίλους και συναδέλφους μου για τα όμορφα φοιτητικά χρόνια που περάσαμε μαζί.

Κρόμπας Α. Δημήτριος

Αθήνα, 19^η Οκτωβρίου 2012

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει ως αντικείμενο τη μοντελοποίηση της τιμής μιας αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας και την εφαρμογή μεθόδων μάθησης για πρόβλεψη της τιμής της αγοράς. Αρχικά αναλύεται η σημασία που έχει αυτοί που χαράσσουν πολιτική να βασίζονται σε μια σαφή κατανόηση του πώς παίρνονται οι επενδυτικές αποφάσεις από τους επενδυτές. Παρουσιάζεται ένα πλαίσιο μοντελοποίησης των μεταβάσεων σε ενεργειακά συστήματα βασισμένο στην ανάπτυξη Agent-Based μοντέλων (ABMs). Γίνεται παρουσίαση της σημασίας των προσδοκιών και η σύνδεσή τους με τις επενδυτικές αποφάσεις και εισαγωγή στην adaptive learning προσέγγιση όσον αφορά το σχεδιασμό μοντέλων προσδοκιών. Στη συνέχεια παρουσιάζονται δύο μέθοδοι μάθησης με χρήση αναδρομικών ελαχίστων τετραγώνων. Ακολουθεί η παρουσίαση και υλοποίηση ενός μοντέλου παραγωγής τιμών για την spot αγορά ηλεκτρικής ενέργειας της Νορβηγίας, αφού έχει γίνει αναλυτική παρουσίαση της δομής και οργάνωσης της Σκανδιναβικής αγοράς. Και τέλος γίνεται χρήση των μεθόδων μάθησης με χρήση αναδρομικών ελαχίστων τετραγώνων για πρόβλεψη τιμών μιας αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας και αντιπαραβολή με τα αποτελέσματα που παράγει μία μέθοδος πρόβλεψης χρονοσειρών, όπως το μοντέλο γραμμικής τάσης .

Λέξεις Κλειδιά

Μοντελοποίηση τιμής αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας, Σκανδιναβική αγορά ενέργειας, ορθολογικές προσδοκίες , προσαρμοστική μάθηση, μάθηση αναδρομικών ελαχίστων τετραγώνων, πρόβλεψη τιμών αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας, μοντέλο γραμμικής τάσης.

Abstract

This thesis concentrates on modeling the price of an electricity market and implementing learning methods for market price forecasting. Initially the importance of policy makers to rely on a clear understanding of how investment decisions are taken by investors is analyzed. A framework for the development of simulation models of transitions in energy systems based on an Agent-Based Modeling (ABM) approach is presented. We exhibit the importance of expectations and their connection with investment decisions and present the adaptive learning approach for expectations design. Then, two methods of learning using recursive least squares are presented. Then after a detailed presentation of the structure and organization of the Nordic market, a presentation and implementation of a model production prices for electricity spot market in Norway is made. Finally we use recursive least squares learning methods for the prediction of the price for an electricity market and make a comparison with the results produced by a time series prediction method such as the Holt exponential smoothing method.

Key words

Modeling price of electricity market, Nordic pool market, rational expectations, adaptive learning, recursive least squares learning, price of electricity market forecasting, Holt exponential smoothing.

Πίνακας περιεχομένων

| | |
|---|-----------|
| ΕΙΣΑΓΩΓΗ..... | 15 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: Η ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΑΠΟ ΤΗ ΜΕΡΙΑ ΤΩΝ ΔΥΝΗΤΙΚΩΝ ΕΠΕΝΔΥΤΩΝ..... | 17 |
| 1.1 <i>Ιστορική αναδρομή</i> | 17 |
| 1.2 <i>Αξιολόγηση στόχων</i> | 19 |
| 1.3 <i>Ο ρόλος του σχεδιασμού πολιτικής</i> | 21 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΟΓΑΝΩΣΗ ΣΚΑΝΔΙΝΑΒΙΚΗΣ ΑΓΟΡΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ..... | 23 |
| 2.1 <i>Οργάνωση της αγοράς</i> | 23 |
| 2.2 <i>Περιορισμοί δυναμικότητας μεταφοράς</i> | 27 |
| 2.3 <i>Ανταγωνισμός-είσοδος στην αγορά</i> | 28 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΠΛΑΙΣΙΟ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗΣ ΑΓΟΡΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ..... | 31 |
| 3.1 <i>Απαιτήσεις για τη μοντελοποίηση της διαχείρισης ενεργειακών μεταβάσεων</i> | 31 |
| 3.1.1 <i>Απαιτήσεις για την προσομοίωση ενεργειακών μεταβάσεων</i> | 32 |
| 3.1.2 <i>Απαιτήσεις για το πλαίσιο μοντελοποίησης</i> | 34 |
| 3.1.3 <i>Απαιτήσεις για τις προσομοιώσεις</i> | 35 |
| 3.2 <i>Πλαίσιο μοντελοποίησης για την προσομοίωση μεταβάσεων ενεργειακών συστημάτων</i> | 38 |
| 3.2.1 <i>Αναπαράσταση του συστήματος (system representation)</i> | 39 |
| 3.2.2 <i>Εξωγενή σενάρια (Exogenous scenarios)</i> | 44 |
| 3.2.3 <i>Παρεμβάσεις (interventions)</i> | 46 |
| 3.2.4 <i>Εξέλιξη του συστήματος (system evolution)</i> | 48 |
| 3.2.5 <i>Εκτίμηση του αντίκτυπου (impact assessment)</i> | 48 |
| 3.3 <i>Η αναγκαιότητα ενός νέου μοντέλου</i> | 50 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΟΡΘΟΛΟΓΙΣΤΙΚΕΣ ΠΡΟΣΔΟΚΙΕΣ ΚΑΙ ΜΑΘΗΣΗ..... | 57 |
| 4.1 <i>Η αναγκαιότητα δημιουργίας προσδοκιών</i> | 57 |
| 4.2 <i>Ιστορική αναδρομή</i> | 58 |
| 4.3 <i>Η βασική ιδέα των Rational Expectations</i> | 60 |
| 4.3.1 <i>Πολλαπλά σημεία ισορροπίας</i> | 62 |
| 4.4 <i>Μάθηση (learning)</i> | 64 |
| 4.4.1 <i>Η μάθηση ως μια δυναμική προσέγγιση σχηματισμού προσδοκιών</i> | 64 |
| 4.4.2 <i>Αναδρομική αναπροσαρμογή συντελεστών με την μέθοδο ελαχίστων τετραγώνων (Recursive least squares updating of coefficients)</i> | 67 |

| | |
|---|------------|
| 4.4.3 Αναδρομικά ελάχιστα τετράγωνα με απώλεια μνήμης (recursive least squares with forgetting)..... | 71 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΑΝΑΠΑΡΑΣΤΑΣΗ ΤΙΜΗΣ ΑΓΟΡΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ | 75 |
| 5.1 Περιγραφή του μοντέλου | 75 |
| 5.1.1 Επιλογή κατανομής..... | 77 |
| 5.1.2 Είσοδος νέων επενδύσεων..... | 78 |
| 5.2 Μοντέλο παραγωγής τιμών ηλεκτρικής ενέργειας για την Νορβηγική αγορά | 79 |
| 5.2.1 Μοντελοποίηση ζήτησης | 80 |
| 5.2.2 Μοντελοποίηση βραχυπρόθεσμης αβεβαιότητας | 81 |
| 5.2.3 Μοντελοποίηση ενεργοποίησης νέων επενδύσεων..... | 82 |
| 5.2.4 Μοντελοποίηση παραγωγής..... | 82 |
| 5.2.5 Μοντελοποίηση τιμής αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας | 85 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΠΡΟΒΛΕΨΗ ΕΞΕΛΙΞΗΣ ΤΙΜΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΜΕ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΜΕΘΟΔΩΝ ΜΑΘΗΣΗΣ | 89 |
| 6.1 Πρόβλεψη τιμών με χρήση αναδρομικών ελαχίστων τετραγώνων | 89 |
| 6.1.1 Αποτελέσματα υλοποίησης θεωρώντας σαν εξωγενή μεταβλητή το συντελεστή φορτίου LF..... | 90 |
| 6.1.2 Αποτελέσματα υλοποίησης θεωρώντας σαν εξωγενείς μεταβλητές τόσο το φορτίο όσο και την παραγωγή..... | 92 |
| 6.2 Πρόβλεψη τιμών με το μοντέλο γραμμικής τάσης..... | 95 |
| 6.2.1 Μοντέλο Γραμμικής Τάσης (Holt Exponential Smoothing) | 95 |
| 6.2.2 Πρόβλεψη τιμών με χρήση του μοντέλου γραμμικής τάσης | 98 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ | 101 |
| 7.1 Συμβολή της διπλωματικής εργασίας..... | 101 |
| 7.2 Μελλοντικές επεκτάσεις | 101 |
| ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ | 103 |
| ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ..... | 109 |

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η μοντελοποίηση της τιμής μιας αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας και η εφαρμογή μεθόδων μάθησης για πρόβλεψη της τιμής της αγοράς. Για την μοντελοποίηση επιλέχθηκε η spot αγορά ηλεκτρικής ενέργειας της Νορβηγίας και για την πρόβλεψη των τιμών επιλέχθηκαν μέθοδοι μάθησης με χρήση αναδρομικών ελαχίστων τετραγώνων.

Στο 1^ο κεφάλαιο αναλύουμε πως αξιολογείται η χάραξη παρεμβατικών πολιτικών στην αγορά ηλεκτρικής ενέργειας λαμβάνοντας σαν γνώμονα τη σκοπιά του επενδυτή, και τη σημασία που έχει αυτοί που χαράσσουν πολιτική να βασίζονται σε μια σαφή κατανόηση του πως παίρνονται οι επενδυτικές αποφάσεις από τους επενδυτές.

Στο 2^ο κεφάλαιο παρουσιάζουμε αναλυτικά τη δομή και την οργάνωση της Σκανδιναβικής αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας στην οποία συμμετέχει η Νορβηγία, καθώς στοιχεία από τη συγκεκριμένη αγορά και από την αγορά της Νορβηγίας θα χρησιμοποιηθούν στο 5^ο κεφάλαιο για την μοντελοποίηση της τιμής της spot αγοράς.

Στο 3^ο κεφάλαιο αναπτύσσουμε ένα πλαίσιο για την ανάπτυξη μοντέλων προσομοίωσης των μεταβάσεων σε ενεργειακά συστήματα. Αρχικά παρουσιάζονται οι απαιτήσεις που υπάρχουν για ένα πλαίσιο μοντελοποίησης των συστημάτων αυτών και στη συνέχεια παρουσιάζεται ένα πλαίσιο μοντελοποίησης βασισμένο στην ανάπτυξη Agent-Based μοντέλων (ABMs).

Στο 4^ο κεφάλαιο παρουσιάζεται η σημασία των προσδοκιών (expectations) και η αναγκαιότητα δημιουργίας προσδοκιών από έναν πράκτορα (agent) ώστε να λάβει επενδυτικές αποφάσεις. Γίνεται ανάλυση της ιδέας των rational expectations και των αδυναμιών της και εισαγωγή στην adaptive learning προσέγγιση όσον αφορά το σχεδιασμό μοντέλων προσδοκιών. Στη συνέχεια παρουσιάζονται δύο μέθοδοι μάθησης με χρήση αναδρομικών ελαχίστων τετραγώνων.

Στο 5^ο κεφάλαιο παρουσιάζεται ένα μοντέλο αναπαράστασης της τιμής της spot αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας. Γίνεται αναλυτική περιγραφή των παραμέτρων του

μοντέλου και στη συνέχεια το μοντέλο αυτό υλοποιείται για την παραγωγή τιμών ηλεκτρικής ενέργειας για τη Νορβηγική αγορά.

Στο 6^ο κεφάλαιο γίνεται χρήση των μεθόδων μάθησης με χρήση αναδρομικών ελαχίστων τετραγώνων που παρουσιάστηκαν στο 4^ο κεφάλαιο για πρόβλεψη τιμών μιας αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας. Σαν πραγματικά δεδομένα της αγοράς θεωρούμε τις τιμές που δημιουργήσαμε με το μοντέλο παραγωγής τιμών που περιγράφεται στο 5^ο κεφάλαιο. Επίσης στο τέλος χρησιμοποιούμε μία τυπική μέθοδο πρόβλεψης χρονοσειρών, όπως το μοντέλο γραμμικής τάσης και στη συνέχεια συγκρίνουμε τα αποτελέσματα.

Στο 7^ο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα συμπεράσματα της παρούσας διπλωματικής εργασίας, καθώς και μελλοντικές προεκτάσεις της.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: Η ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΑΠΟ ΤΗ ΜΕΡΙΑ ΤΩΝ ΔΥΝΗΤΙΚΩΝ ΕΠΕΝΔΥΤΩΝ

Στο παρόν κεφάλαιο αναλύουμε πώς αξιολογείται η χάραξη παρεμβατικών πολιτικών στην αγορά ηλεκτρικής ενέργειας λαμβάνοντας σαν γνώμονα τη σκοπιά του επενδυτή. Γίνεται μία ιστορική αναδρομή στην εξέλιξη της πολιτικής που ακολούθησαν οι αγορές ηλεκτρικής ενέργειας στο χρόνο, και αναφέρονται οι λόγοι οι οποίοι οδήγησαν σε αυτή την εξέλιξη. Ακολουθεί μία αξιολόγηση των στόχων των παρεμβατικών πολιτικών και παρατηρείται, από τη σκοπιά του επενδυτή, μία σύνδεση με το επενδυτικό κόστος, τον εισοδηματικό κίνδυνο και κατά συνέπεια με τις διακυμάνσεις των τιμών της ηλεκτρικής ενέργειας. Στη συνέχεια βλέπουμε ότι οι πολιτικές πρέπει να σχεδιάζονται αξιολογώντας τον κίνδυνο της επένδυσης και όχι μόνο έχοντας σαν γνώμονα το κόστος της επένδυσης, καθώς το κόστος είναι μόνο ένα μέρος της εξίσωσης. Όσοι χαράσσουν πολιτική δεν μπορούν να καθορίσουν ποια τεχνολογία πρέπει να χρησιμοποιηθεί, μπορούν μόνο να παρέχουν κίνητρα έτσι ώστε να ενθαρρύνουν τους επενδυτές στο να υιοθετήσουν μία επένδυση. Για να είναι τα κίνητρα αυτά ικανά έτσι ώστε να οδηγήσουν στην υιοθέτηση μίας επένδυσης από τους επενδυτές, θα πρέπει να βασίζονται σε μια σαφή κατανόηση του πώς παίρνονται οι επενδυτικές αποφάσεις. Γι αυτό το λόγο κρίνεται εξαιρετικά σκόπιμο να μελετήσουμε από την πλευρά του επενδυτή ποια στοιχεία λαμβάνει υπόψη για την πραγματοποίηση, ή μη, μιας επένδυσης.

1.1 Ιστορική αναδρομή

Η χάραξη παρεμβατικών πολιτικών παρατηρείται από την αρχή της δημιουργίας των αγορών ηλεκτρικής ενέργειας. Οι λόγοι που οδηγούν στην αναγκαιότητα των παρεμβάσεων αυτών είναι οι ακόλουθοι:

- Πιθανή αδυναμία της αγοράς (μονοπωλιακή αγορά, αρνητικές επιπτώσεις στο περιβάλλον, απουσία καινοτομίας).
- Κοινωνικοί λόγοι/λόγοι ηθικού δικαίου.

- Γεωπολιτικοί λόγοι, καθώς και λόγοι εξασφάλισης επαρκούς προσφοράς ενέργειας για κάλυψη της ζήτησης.

Όπως είναι φανερό, σημαντικοί λόγοι καθορίζουν την αναγκαιότητα πολιτικής παρέμβασης στην αγορά ηλεκτρικής ενέργειας, οι προτεραιότητες της οποίας προσαρμόζονται με το πέρασμα του χρόνου δημιουργώντας διαφορετικούς μηχανισμούς υλοποίησης.

Αρχικά υιοθετήθηκε η ιδέα ότι τα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας αποτελούν “φυσικό μονοπώλιο”, η οποία διαδραμάτισε πρωταρχικό ρόλο στη ρύθμιση και την πολιτική στα αρχικά στάδια ανάπτυξης του κλάδου. Η άποψη ότι η κρατική ιδιοκτησία των εν λόγω μονοπωλίων ήταν προς το δημόσιο συμφέρον, στήριξε την κρατικοποίηση της βιομηχανίας ηλεκτρικής ενέργειας που πραγματοποιήθηκε σε πολλές χώρες από τη δεκαετία του 1950. Η κρατική ιδιοκτησία και το ρυθμιζόμενο καθεστώς μονοπωλίου συνέβαλαν στη χρηματοδότηση των μεγάλων επενδύσεων που απαιτούνταν για την ανάπτυξη οικονομιών κλίμακας, που επέτρεπαν την προγραμματισμένη επέκταση της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας που προοριζόταν για την οικονομική ανάπτυξη έτσι ώστε να παρέχεται αξιόπιστη και οικονομικά προσιτή εξυπηρέτηση στους καταναλωτές.

Ωστόσο στα τέλη της δεκαετίας του 1980 η προσέγγιση στο μονοπώλιο άλλαξε, από την κρατική ιδιοκτησία σε διευκόλυνση των ανταγωνιστικών αγορών. Αυτό συνέβη σε μεγάλο βαθμό για ιδεολογικούς λόγους, αλλά και αντικατοπτρίζοντας, καθώς τα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας ωρίμασαν, μια μετατόπιση της έμφασης από την επέκταση των συστημάτων στη βελτίωση της απόδοσης μέσω του ανταγωνισμού. Αλλαγές στην πολιτική σημειώθηκαν επίσης και ως αντίδραση στην αστάθεια των τιμών των καυσίμων και των περιβαλλοντικών προβλημάτων.

Ωστόσο από τα τέλη της δεκαετίας του 1990 υπήρξε δεδομένη συναίνεση για την ανάγκη αντιμετώπισης των εν λόγω προβλημάτων μέσω της λειτουργίας ιδιωτικών αγορών.

Στις μέρες μας, κυρίως η αύξηση της ανησυχίας για την κλιματική αλλαγή, έχει οδηγήσει σε αναθεώρηση των στόχων της πολιτικής. Η αναθεώρηση των στόχων

αυτών οδήγησε σε νέες πολιτικές, όπως η προώθηση της ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές.[1]

1.2 Αξιολόγηση στόχων

Η πραγματοποίηση των στόχων της κυβερνητικής πολιτικής στον τομέα της ηλεκτρικής ενέργειας απαιτεί επενδύσεις σε τεχνολογίες οι οποίες διαφέρουν από εκείνες που θα επιλεγόντουσαν από τις δυνάμεις της αγοράς. Στόχοι όπως η ασφάλεια του εφοδιασμού, η μείωση των εκπομπών CO₂ ή η μείωση της μεταβλητότητας των τιμών ενδέχεται να ευνοήσουν επιλογές όπως η πυρηνική ενέργεια, ο άνθρακας με δέσμευση του CO₂, ή οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Ωστόσο, σε πολλές χώρες η αγορά θα εξακολουθήσει να ευνοεί καύσιμα όπως το φυσικό αέριο για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

Αυτοί που χαράσσουν πολιτική δεν μπορούν να υπαγορεύσουν ποιες τεχνολογίες του κλάδου της ηλεκτρικής ενέργειας θα πρέπει να χρησιμοποιηθούν. Οι κυβερνήσεις μπορούν να καθορίζουν το πλαίσιο και την παροχή κινήτρων, αλλά οι ιδιωτικές εταιρείες, όχι οι κυβερνήσεις, λαμβάνουν τις επενδυτικές αποφάσεις. Ως εκ τούτου, η αποτελεσματικότητα των κινήτρων στη διαμόρφωση των επενδύσεων καθορίζει αν οι στόχοι της ενεργειακής πολιτικής θα επιτευχθούν. Παραδείγματα πολιτικών που επιδιώκουν να διαμορφώσουν τις επενδύσεις περιλαμβάνουν την ενέργεια από ανανεώσιμες πηγές (*Renewables Obligation*) και την δημιουργία Ευρωπαϊκού συστήματος εμπορίας εκπομπών (*European Emissions Trading Scheme*). Η αποτελεσματικότητα των πολιτικών αυτών θα εξαρτηθεί κατά μεγάλο μέρος από τους όρους που δημιουργούν για επενδύσεις.

Οι πολιτικές αποφάσεις για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας συχνά διαμορφώνονται με εκτιμήσεις του ανά μονάδα κόστους παραγωγής (π.χ. €/ MWh), επίσης γνωστό ως μοναδιαίο κόστος, ή προβλεπόμενο μέσο κόστος. Αυτά χρησιμοποιούνται για να παρέχουν μία εκτίμηση στα απαιτούμενα επίπεδα στήριξης (αν υπάρχουν) για να ενθαρρύνουν την εφαρμογή των διαφόρων τεχνολογιών. Μπορούν επίσης να βοηθήσουν να καθοριστεί το κόστος για την εκπλήρωση στόχων δημόσιας πολιτικής, όπως η μείωση των εκπομπών CO₂, και κατά πόσο είναι λογική μια τέτοιου είδους στήριξη. Ενώ οι εκτιμήσεις κόστους μπορούν να βοηθήσουν να

καθοριστεί εάν η στήριξη είναι αναγκαία, το κόστος δεν είναι πάντα καλός οδηγός για τον καθορισμό του τρόπου παρέμβασης. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι οι ιδιωτικές εταιρείες που υλοποιούν τέτοιες επενδύσεις, λαμβάνουν υπόψη μια σειρά παραγόντων που δεν συμπεριλαμβάνονται σωστά ή ακόμα και καθόλου στα δεδομένα του μέσου κόστους. Οι επενδύσεις υπαγορεύονται από τις αναμενόμενες αποδόσεις, οι οποίες αξιολογούνται από μια σειρά από κινδύνους που αφορούν τόσο το κόστος όσο και τα έσοδα. Οι εισοδηματικοί κίνδυνοι δεν συμπεριλαμβάνονται στις εκτιμήσεις κόστους, ούτε αξιολογούνται στους κινδύνους που σχετίζονται με το κόστος.

Μια σημαντική κατηγορία εισοδηματικών κινδύνων προκύπτει από τις διακυμάνσεις των τιμών της ηλεκτρικής ενέργειας. Αυτοί οι κίνδυνοι δεν επιβαρύνουν το ίδιο όλους τους τύπους σταθμών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Για διάφορους λόγους ορισμένες επιλογές (συνήθως οι εγκαταστάσεις ορυκτών καυσίμων) έχουν μεγάλο βαθμό ελέγχου επί των τιμών και την ικανότητα να περνούν τις υψηλές τιμές των καυσίμων στους καταναλωτές. Άλλες (όπως η πυρηνική ενέργεια, οι ανανεώσιμες πηγές και οι υδροηλεκτρικές μονάδες), έχουν μικρό ή καθόλου έλεγχο επί των τιμών και μπορεί να αντιμετωπίσουν προβλήματα κατά τη διάρκεια μιας παρατεταμένης περιόδου χαμηλών τιμών. Αν οι τιμές είναι ευμετάβλητες, ο εισοδηματικός κίνδυνος μπορεί να είναι υψηλός για την τελευταία κατηγορία τεχνολογιών, και μπορεί να αποθαρρύνει την πιθανότητα επενδύσεων ανεξάρτητα από το κόστος τους. Ο εισοδηματικός κίνδυνος μπορεί επίσης να εμφανιστεί στην αγοράς λόγω των αδειών CO₂ ή εξαιτίας των πράσινων πιστοποιητικών ηλεκτρικής ενέργειας.

Εκτός από την αξιολόγηση του κινδύνου και της απόδοσης, οι επενδυτικές αποφάσεις θα επηρεαστούν επίσης από μια σειρά από στρατηγικές εκτιμήσεις. Για παράδειγμα, οι εταιρείες μπορούν να επενδύσουν σε ένα ευρύτερο χαρτοφυλάκιο έτσι ώστε να έχουν ένα ευρύ φάσμα προστασίας έναντι του κινδύνου. Μπορούν να αποφεύγουν επενδύσεις σε τεχνολογίες που πάνε ενάντια στις αρχές της εταιρικής διακυβέρνησης, όπως είναι η κοινωνική ευθύνη. Μπορούν να γίνουν επενδύσεις από εταιρίες ηλεκτρικής ενέργειας με σκοπό να αποκαλύψουν πληροφορίες σχετικά με την αγορά ή να κερδίσουν πλεονέκτημα στην αγορά, ή αντίθετα να καθυστερήσουν να πραγματοποιηθούν για τους ίδιους λόγους. Σε περιπτώσεις νέων τεχνολογιών ή όπου

αναμένονται νέες πολιτικές, ενδέχεται να υπάρχει αξία στην καθυστέρηση των επενδύσεων.

Η πολιτική πρέπει να συνδέεται ενεργά με τον επενδυτικό κίνδυνο. Αυτό σημαίνει κατανόηση, από πού προέρχεται ο κίνδυνος και πώς επηρεάζει τις επενδύσεις. Η πολιτική ανάλυση χρειάζεται να μοντελοποιήσει επενδυτικά σενάρια και να ενσωματώσει τον εισοδηματικό κίνδυνο, αντί να εστιάζεται σε μεγάλο βαθμό στο κόστος.[1]

1.3 Ο ρόλος του σχεδιασμού πολιτικής

Ο σχεδιασμός πολιτικής μπορεί να επηρεάσει τους εισοδηματικούς κινδύνους όπως για παράδειγμα τα τιμολόγια σταθερής τιμής (π.χ. τα Γερμανικά feed in tariffs) και βασισμένα στην αγορά σχήματα (όπως τα Renewables Obligations) διαφέρουν όσον αφορά την κατανομή του κινδύνου. Τα πρώτα περνούν τον κίνδυνο στους καταναλωτές, δεδομένου ότι οι τιμές είναι σταθερές. Τα τελευταία εκθέτουν όσους τα εφαρμόζουν σε κίνδυνο τιμών. Όταν καθορίζεται η φύση των συστημάτων στήριξης εσόδων, και η απόφαση των κεφαλαίων, αυτοί που καθορίζουν την πολιτική πρέπει να σταθμίσουν τον κίνδυνο που δημιουργείται από τις πολιτικές ενάντια στις δυνάμεις της αγοράς για μείωση του κόστους. Η επιλογή θα εξαρτηθεί από την συγκεκριμένη περίπτωση, και θα λαμβάνει υπόψη την κατάσταση της τεχνικής ανάπτυξης και το βαθμό εμπιστοσύνης στις εκτιμήσεις κόστους:

- Η επιδότηση κεφαλαίου (capital grants) είναι καταλληλότερη σε περιπτώσεις εξ' ολοκλήρου νέων τεχνολογιών που προκύπτουν από έρευνα και ανάπτυξη.
- Σταθερά τιμολογιακά προγράμματα (fixed price tariffs) είναι καταλληλότερα στα αρχικά στάδια εφαρμογής αναδυόμενων τεχνολογιών, εκείνων που είναι αποδεδειγμένες, αλλά δεν πρόκειται ακόμα να χρησιμοποιηθούν σε μεγάλη κλίμακα, γιατί κρύβουν σημαντικό τεχνολογικό κίνδυνο και έχουν ακόμη να επωφεληθούν από την εκτεταμένη «Μάθηση μέσα από τη χρήση»
- Βασιζόμενα στην αγορά σχήματα είναι καταλληλότερα για τη δημιουργία μεγάλων αγορών για αποδεδειγμένες τεχνολογίες, ή για να δημιουργήσουν κίνητρα για ελάχιστο κόστος μέσα από τη βραχυπρόθεσμη μείωση του άνθρακα.

Πληροφορίες σχετικά με το κόστος και τις επιδόσεις των νέων τεχνολογιών συχνά αποκαλύπτονται μέσω της δραστηριότητας της αγοράς. Η χάραξη πολιτικής μπορεί να έχει κακή πληροφόρηση. Όταν η πληροφορία είναι σπάνια, απαιτούνται επενδύσεις για να την αποκαλύψουν. Η πολιτική μπορεί να χρειαστεί να πληρώσει για αυτό, ξεπερνώντας την αξία επιλογής που συνδέεται με την αναμονή. Επομένως, η πολιτική πρέπει να είναι διατεθειμένη να κάνει ρητή πρόβλεψη για τις πληρωμές προμηθευτών για «πρωτοπόρους», δεδομένου ότι αυτοί, με δεδομένα υψηλότερο επενδυτικό κίνδυνο, θα αποκαλύψουν τα δεδομένα κόστους και κινδύνου για την ευρύτερη αγορά.

Από τα παραπάνω γίνεται φανερό ότι ο επενδυτής λαμβάνει πολλές παραμέτρους υπόψη για την πραγματοποίηση μιας επένδυσης. Οι παράμετροι αυτοί δεν έχουν να κάνουν απαραίτητα μόνο με το κόστος της επένδυσης αλλά και με έννοιες όπως ο χρόνος της επένδυσης, τα μακροπρόθεσμα κόστη καυσίμου, τα πιθανά κίνητρα για μελλοντική είσοδο ανταγωνιστών στην αγορά, ο εισοδηματικός κίνδυνος, ο κίνδυνος κόστους, οι εκπομπές CO₂ κ.α. Δουλειά αυτού που χαράσσει πολιτική είναι να σταθμίσει σωστά όλους αυτούς τους παράγοντες και να βρει τα κατάλληλα κίνητρα ώστε να προσελκύσει επενδυτές στην αγορά.[1]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΟΓΑΝΩΣΗ ΣΚΑΝΔΙΝΑΒΙΚΗΣ ΑΓΟΡΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

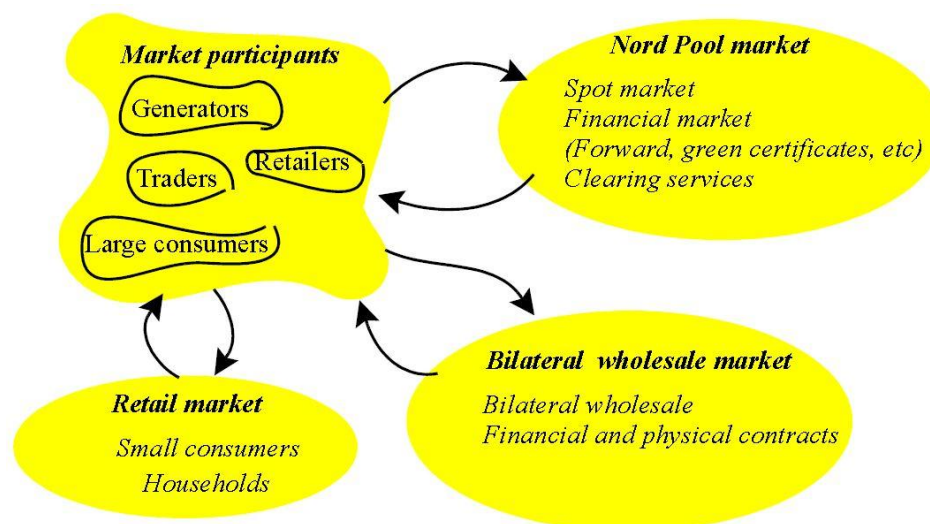
Σε αυτό το σημείο κρίνεται απαραίτητο να δούμε πιο αναλυτικά τη δομή και την οργάνωση μίας αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας. Επιλέγουμε την Σκανδιναβική αγορά, στην οποία πολύ μεγάλη συμμετοχή έχει η Νορβηγία, καθώς στοιχεία από τη συγκεκριμένη αγορά θα χρησιμοποιηθούν στο 5^ο κεφάλαιο για την μοντελοποίηση της τιμής της spot αγοράς. Στο παρόν κεφάλαιο θα αναλύσουμε την οργάνωση της αγοράς στις Σκανδιναβικές χώρες (Nordic countries), δηλαδή, Νορβηγία, Σουηδία, Δανία και Φιλανδία, τους περιορισμούς δυναμικότητας μεταφοράς που παρατηρούνται σε αυτή την αγορά, καθώς και το είδος του ανταγωνισμού για την είσοδο νέων επενδυτών στην αγορά. Η Nord pool αγορά, όπου η παροχή ηλεκτρικής ενέργειας στις Σκανδιναβικές χώρες είναι πλέον συντονισμένη, ιδρύθηκε το 1996.

2.1 Οργάνωση της αγοράς

Το σύστημα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στις Σκανδιναβικές χώρες χαρακτηρίζεται από τεχνολογική ποικιλομορφία, η οποία έχει σημαντικές επιπτώσεις στα εμπορικά πρότυπα που μπορούν να εφαρμοστούν. Ο λόγος της απελευθέρωσης του τομέα της ηλεκτρικής ενέργειας, ήταν να αυξηθεί η οικονομική αποδοτικότητα. Υπήρχαν αρκετές ενδείξεις για αναποτελεσματικότητα, όπως επισημαίνεται από τους οικονομολόγους καθ' όλη τη δεκαετία του 70. Η χαμηλή απόδοση του κεφαλαίου, οι μεγάλες διαφορές τιμών μεταξύ των περιφερειών και των πελατών, καθώς και οι τιμές χονδρικής αρκετά κάτω από το μακροπρόθεσμο οριακό κόστος, υποδεικνύουν έλλειψη ανταγωνισμού και υπέρ-επενδύσεις.

Ο ενεργειακός νόμος του 1991 που εισήγαγε το Νορβηγικό κοινοβούλιο, έδωσε στους καταναλωτές το δικαίωμα να επιλέγουν προμηθευτή ηλεκτρικής ενέργειας. Επιπλέον η παραγωγή και η μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας διαχωρίζονται σαν δυο ξεχωριστές οικονομικές οντότητες. Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας στη συνέχεια έγινε αντικείμενο ανταγωνισμού, ενώ η μεταφορά και η διανομή οργανώθηκαν σε ρυθμιζόμενο μονοπώλιο, με πρόσβαση για τους παραγωγούς και τους καταναλωτές.

Η αγορά πλέον είναι οργανωμένη σε διάφορα όργανα με συγκεκριμένους ρόλους και ευθύνες, όπως φαίνεται στο σχήμα-2.1.



Σχήμα-2.1: Οργάνωση της Nord pool αγοράς.[3]

➤ **Κάτοχοι δικτύου**

Οι κάτοχοι δικτύου λειτουργούν σαν μονοπώλια, σύμφωνα με το καταστατικό και τους κανονισμούς των ρυθμιστικών αρχών. Οι διανομείς λειτουργούν τη διανομή και τα περιφερειακά δίκτυα. Αρμοδιότητά τους είναι να χρεώνουν τους καταναλωτές για μεταφορά, να θέτουν τις τιμές μεταφοράς (transmission tariffs), και να συντηρούν το δίκτυο. Το κύριο δίκτυο χειρίζεται ο Διαχειριστής του Συστήματος (TSO) σε κάθε χώρα. Ρόλος τους είναι η εξασφάλιση της προσφοράς και της ποιότητας, η διαχείριση σε πραγματικό χρόνο των λειτουργιών του συστήματος και ο χειρισμός των ανισορροπιών που παρουσιάζονται, σε στενή συνεργασία με τους συμμετέχοντες στην αγορά και την Nord pool αγορά.

➤ **Συμμετέχοντες στην αγορά**

Παραγωγοί λειτουργούν τόσο στην χονδρική, όσο και στην λιανική αγορά. Επίσης εμπορεύονται υπηρεσίες από την Nord pool spot αγορά και την χρηματοπιστωτική αγορά, για την διαχείριση του κινδύνου, για εξισορρόπηση ισχύος και για green certificates. Οι έμποροι είναι νομικές οντότητες που λειτουργούν στις αγορές. Οι παραγωγοί, οι μεγάλοι καταναλωτές και οι λιανοπωλητές δρουν σαν έμποροι. Οι

μικροί καταναλωτές συνήθως αγοράζουν ηλεκτρική ενέργεια από λιανοπωλητές που μπορεί να είναι είτε έμποροι, είτε παραγωγοί.

➤ Αγορές

Όσον αφορά τις αγορές, το Nord pool exchange παρέχει τις απαραίτητες πληροφορίες της αγοράς στους συμμετέχοντες στην αγορά. Η σημαντικότερη πληροφορία είναι η spot τιμή, η οποία χρησιμεύει ως τιμή αναφοράς για τις υπόλοιπες αγορές. Παρακάτω αναλύονται περαιτέρω οι σημαντικότερες αγορές.

- **Spot market:** Η Nordic spot αγορά, είναι η πρώτη spot αγορά στον κόσμο. Οι καμπύλες τιμής-ποσότητας προσφοράς και ζήτησης για την επόμενη μέρα υποβάλλονται καθημερινά μέχρι το μεσημέρι. Στη συνέχεια το Nord pool υπολογίζει την spot τιμή από αυτές τις καμπύλες, και την δημοσιεύει εντός 1,5-2 ωρών. Επίσης δημιουργείται μία έκθεση για την real-time αγορά. Εξαιτίας της χρονικής καθυστέρησης μεταξύ των προσφορών και της παράδοσης, δημιουργούνται αποκλίσεις μεταξύ των αρχικών προσφορών και της κατανάλωσης. Πριν από την υποβολή προσφορών στην spot αγορά, γίνονται υπολογισμοί της κερδοφορίας βασισμένοι σε πληροφορίες σχετικά με το κόστος, αντιλήψεις σχετικά με τις μελλοντικές τιμές, τα επίπεδα των αποθεμάτων κ.τ.λ.
- **Real-time market:** Η real-time αγορά έχει σαν στόχο να χειρίζεται τις αποκλίσεις που αναφέρθηκαν προηγουμένως, που δημιουργούνται στο χρόνο μεταξύ της υποβολής των προσφορών και της φυσικής παράδοσης στην spot αγορά.
- **Μελλοντικές αγορές:** Η μελλοντική αγορά χρησιμοποιείται για τη διαχείριση του κινδύνου και παρέχει μια κοινή προσδοκία για τις μελλοντικές τιμές, συν ένα ασφάλιστρο κινδύνου. Ανάλογα με τον χρονικό ορίζοντα, οι μελλοντικές αγορές μπορεί να περιλαμβάνουν πληροφορίες σχετικά με ανεφοδιασμό δεξαμενών, προσδοκίες για μελλοντικά γεγονότα (όπως η παράδοση μιας νέας γραμμής μεταφοράς, ή νέας παραγωγικής δυναμικότητας), ή άλλους παράγοντες που μπορεί να επηρεάσουν την τιμή ηλεκτρικής ενέργειας μακροπρόθεσμα. Καμία φυσική συναλλαγή ηλεκτρικής ενέργειας δεν λαμβάνει χώρα στην μελλοντική αγορά. Είναι σαφές ότι οι προσδοκίες τιμών της μελλοντικής αγοράς επηρεάζουν την spot αγορά. Η μελλοντική αγορά μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως δείκτης για τις μακροπρόθεσμες τιμές και ως εκ τούτου επηρεάζει τις επενδυτικές αποφάσεις.

- **Elcertificate market / TGC market:** Η συγκεκριμένη αγορά εισήχθη τον Μάρτιο του 2004 στην Nord pool exchange. Τον Μάρτιο του 2003 μια διμερή αγορά εμπορεύσιμων green certificates (TGC) εισήχθη στην Σουηδία. Οι επιδοτήσεις για τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας στη συνέχεια αντικαταστάθηκαν από TGCs τα οποία εμπορεύονται πλέον ελεύθερα σαν χρηματοοικονομικά περιουσιακά στοιχεία. Τα TGCs αντιπροσωπεύουν το πρόσθετο κόστος (ή αξία) των ανανεώσιμων πηγών που απαιτείται για να ικανοποιηθούν προκαθορισμένοι στόχοι. Για κάθε MWh ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, όπως αιολική, μικρής κλίμακας υδροηλεκτρικούς σταθμούς, ή βιοενέργεια, εκδίδεται ένα πιστοποιητικό. Οι τελικοί χρήστες υποχρεούνται να ικανοποιούν ένα αυξανόμενο μερίδιο της ζήτησής τους από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Κάθε χρόνο ένα σώμα ελέγχει κατά πόσο οι στόχοι έχουν επιτευχθεί, και επιβάλλει ποινές αν χρειαστεί.

Δεδομένου ότι η ηλεκτρική ενέργεια δεν αποθηκεύεται, η προσφορά πρέπει να ισορροπεί ακριβώς με την άκρως μεταβλητή ζήτηση. Για αυτό το λόγο έχουν συσταθεί και εξελιχθεί με την πάροδο του χρόνου διάφορα συστήματα διαπραγμάτευσης.

- **Eltermin and Eloption:** Αυτά τα προϊόντα είναι χρηματοπιστωτικές συμβάσεις (τα λεγόμενα futures), που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την εξασφάλιση παροχής ηλεκτρικής ενέργειας σε μια, εκ των προτέρων, προσυμφωνημένη τιμή, για μια ημέρα και μέχρι τρία χρόνια. Δεν υπάρχει πραγματική συναλλαγή, που να συνδέεται άμεσα με αυτά τα προϊόντα, ωστόσο η χρήση αυτών των χρηματοοικονομικών μέσων, υποδεικνύουν ότι η φυσική αγορά ηλεκτρικής ενέργειας είναι καλά εδραιωμένη. Η εκκαθάριση των αγορών Eltermin και Eloption γίνεται συνεχώς.
- **Elspot:** Αποτελεί μία σύμβαση αμοιβαίας υποχρέωσης για ζήτηση και προσφορά ηλεκτρικής ενέργειας σε συγκεκριμένες αναφερόμενες τιμές. Η εκκαθάριση των Elspot γίνεται σε καθημερινή δημοπρασία, όπου οι προσφορές για την ωριαία ζήτηση και προσφορά του επόμενου εικοσιτετράωρου συμψηφίζονται. Είναι επίσης πιθανό να παρέχει προσφορές για μπλοκ ωρών, μια επιλογή ιδιαίτερα

σχετική με εγκαταστάσεις συνδυασμένης παραγωγής θερμότητας και ηλεκτρισμού, με μεγάλα κόστη έναρξης και λήξης.

- **Elbas:** Αποτελεί επίσης μία σύμβαση, η οποία είναι αντικείμενο συνεχούς διαπραγμάτευσης μέχρι και 2 ώρες πριν από τη φυσική παράδοση. Χρησιμοποιείται για την τελική αντιστοίχιση προσφοράς και ζήτησης λόγω απροσδόκητων μεταβολών στην προσφορά και στη ζήτηση.
- **Elreg:** Οι συμβάσεις αυτές αποτελούν ένα μέσο παρέμβασης του Διαχειριστή του Συστήματος (TSO) για την συνεχή ρύθμιση του συστήματος. Ο TSO προσφέρει αυτές τις συμβάσεις σε ωριαία βάση στις εταιρίες παραγωγής. Σε αντάλλαγμα οι επιχειρήσεις αυτές ρυθμίζουν την ισορροπία του συστήματος όσον αφορά την τάση και την συχνότητα. Σε σπάνιες περιπτώσεις οι TSOs έχουν τη δυνατότητα ελέγχου των επιχειρήσεων παραγωγής.

Η μεγάλη ρευστότητα των χρηματοοικονομικών συμβάσεων και άλλων μέσων υποδηλώνει ότι, παρόλο που πολλά “οικονομικά” προϊόντα αποτελούν αντικείμενο συναλλαγών, η τιμή αυτών των προϊόντων είναι αυστηρά συνδεδεμένη με την τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας. Οι διαφορές στις τιμές μεταξύ των προϊόντων αυτών, αντικατοπτρίζουν διαφορετικές προτιμήσεις όσον αφορά τον κίνδυνο και την αβεβαιότητα. Πρέπει να αναφερθεί ότι σε περιπτώσεις περιορισμένης δυναμικότητας στην μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας, οι Elspot, Elbas και Elreg συμβάσεις, περιορίζονται σε συγκεκριμένες γεωγραφικές περιοχές[3].

2.2 Περιορισμοί δυναμικότητας μεταφοράς

Οι περιορισμοί δυναμικότητας μεταφοράς είναι σημαντικοί για τον ορισμό της αγοράς. Αν η δυναμικότητα μεταφοράς είναι ανεπαρκής, οι τιμές της μιας περιοχής δεν μπορούν να επηρεάσουν την προσφορά και την ζήτηση στις άλλες περιοχές. Το σημερινό μοντέλο της Σκανδιναβικής αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας, διαιρεί την αγορά σε μια σειρά από περιοχές, τις λεγόμενες Elspot περιοχές τιμών, και συγκεκριμένα την Φιλανδία, τη Σουηδία, δύο ή τρεις στη Νορβηγία, και την Ανατολική και Δυτική Δανία.

Οι περιοχές αυτές συνδέονται με ικανότητα μετάδοσης περιορισμένου μεγέθους. Τις γραμμές μεταφοράς χειρίζεται ο TSO, και όλη η ενέργεια που παράγεται και

καταναλώνεται σε μία περιοχή τιμών, αποτελεί αντικείμενο εμπορίας στην τιμή της συγκεκριμένης περιοχής. Όφελος μπορεί να προκύψει λόγω της διαφοράς των τιμών, μεταφέροντας ενέργεια από μια περιοχή χαμηλού κόστους, σε μια περιοχή υψηλότερου κόστους. Όταν δεν παρατηρείται συμφόρηση στις γραμμές μεταφοράς, όλη η Σκανδιναβική αγορά έχει μία ενιαία τιμή (51,8% του χρόνου το 2001). Ωστόσο όταν παρατηρείται συμφόρηση στις γραμμές μεταφοράς, η τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας μπορεί να διαφέρει μεταξύ των περιοχών Elspot.

Εκτός από τις γραμμές μεταφοράς στο εσωτερικό της Σκανδιναβικής αγοράς, υπάρχουν συνδέσεις μεταξύ Φιλανδίας-Ρωσίας, Σουηδίας-Πολωνίας, Σουηδίας-Γερμανίας, Ανατολικής και Δυτικής Δανίας-Γερμανίας. Οι συναλλαγές σε αυτές τις γραμμές μεταφοράς δεν είναι καλά ενσωματωμένες στην Σκανδιναβική αγορά.

2.3 Ανταγωνισμός-είσοδος στην αγορά

Στην αγορά της Δανίας, δύο παραγωγοί, Elsam A / S και Energi E2 A / S κυριαρχούν στις δύο ξεχωριστές περιοχές τιμών DK1 και DK2, δεδομένου ότι κατέχουν 50% και 80% της δυναμικότητας παραγωγής στις δύο περιοχές αντίστοιχα. Από την πλευρά της πολιτικής του ανταγωνισμού, τα αντίστοιχα μερίδια αγοράς των δύο παραγωγών είναι κοντά στο 100%.

Η εύρεση κατάλληλων τοποθεσιών για τη δημιουργία νέων μονάδων παραγωγής, αποτελεί σημαντικό φραγμό για την είσοδο νέων επενδυτών στην αγορά παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στη Δανία.

Όσον αφορά την Νορβηγική αγορά, ο μεγαλύτερος ιδιοκτήτης εγκαταστάσεων υδροηλεκτρικής ενέργειας είναι η κρατική εταιρεία Statkraft. Το μερίδιο αγοράς της υπερβαίνει το 40%, καθιστώντας την κυρίαρχο παραγωγό. Επιπρόσθετα, η εκτεταμένη χρήση της συνιδιοκτησίας στην Νορβηγία αυξάνει την συγκέντρωση της αγοράς. Από τη στιγμή που η Statkraft έχει ποσοστό ιδιοκτησίας σε μια σειρά μεγάλων εταιρειών παραγωγής, η συγκέντρωση των εγκαταστάσεων παραγωγής αυξάνεται ακόμα περισσότερο.

Παρατηρούνται σημαντικά εμπόδια στην είσοδο νέων επενδύσεων στη Νορβηγική αγορά ηλεκτρικής ενέργειας. η δημιουργία νέων εγκαταστάσεων, καθώς και η

απόκτηση υπάρχουσας δυναμικότητας από νεοεισερχόμενους επενδυτές αποθαρρύνεται, από την διαφορετική νομική μεταχείριση μεταξύ των δημόσιων και ιδιωτικών εταιριών. Η Νορβηγική αγορά είναι πιο κάθετα δομημένη, (κυριότητα της παραγωγής, διανομής, μεταφοράς από την ίδια εταιρία) από ότι η αγορά της Δανίας.

Στην Σουηδία, πέντε μεγάλες εταιρίες (Vattenfall, Sydkraft, Fortum Kraft, Skelleftea Kraft και Graninge) αντιπροσωπεύουν το 93% της εθνικής παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Στην υδροηλεκτρική παραγωγή, περίπου το ήμισυ της παραγωγικότητας ανήκει στην εταιρεία Vattenreguleringsföretagen. Ο τομέας της πυρηνικής ενέργειας ανήκει σε συνθέσεις ομίλων που αποτελούνται από τις εταιρίες Vattenfall, Sydkraft και της Fortum Kraft . Το Σουηδικό εθνικό δίκτυο έχει τη μορφή ρυθμιζόμενου μονοπωλίου, ενώ τα περιφερειακά δίκτυα ανήκουν στους μεγαλύτερους παραγωγούς. Τα τοπικά δίκτυα ανήκουν σε περίπου 200 εταιρίες διανομής. Η βασική ροή ενέργειας είναι από τον, πλούσιο σε υδροηλεκτρικά, Βορρά στον, πλούσιο σε κατανάλωση, Νότο. Παρόλο που η Σουηδία είναι μία Nord pool περιοχή τιμολόγησης, εξαιτίας του περιορισμού στην δυναμικότητα μεταφοράς από την Βόρεια στην Κεντρική, και από την Κεντρική στην Νότια Σουηδία, συχνά παρατηρούνται διαφορετικές τιμές σε αυτές τις τρεις περιοχές.

Η δυσκολία εισόδου νέων επενδύσεων στην αγορά, έγκειται κυρίως στις περιβαλλοντικές ανησυχίες. Πυρηνική επέκταση δεν επιτρέπεται, καθώς και τα περιθώρια για νέα υδροηλεκτρική ενέργεια είναι περιορισμένα. Το Ευρωπαϊκό σχήμα εμπορίας εκπομπών(EETS), ωστόσο, οφείλει να εξαλείψει κάθε επιφύλαξη σχετικά με νέες εγκαταστάσεις καύσης ορυκτών.

Στην αγορά της Φιλανδίας οι κυρίαρχες εταιρίες Fortum και PVO/TVO εκπροσωπούν περισσότερο από το 60% της παραγόμενης ενέργειας. Άλλες 120 μικρότερες εταιρίες παρέχουν επίσης ενέργεια στο Φιλανδικό δίκτυο. Το Φιλανδικό δίκτυο φαίνεται να λειτουργεί σωστά, χωρίς σημαντικά σημεία συμφόρησης. Υπάρχει επίσης μία σημαντική εισαγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από την Ρωσία.

Σημαντικοί φραγμοί για είσοδο στην Φιλανδική αγορά δεν υπάρχουν, καθώς τόσο οι πυρηνικές, όσο και οι θερμικές μονάδες, εξετάζονται ως επιλογές για την ενίσχυση της παραγωγικής δυναμικότητας.

Συνοψίζοντας, η συγκέντρωση της αγοράς παραγωγής ενέργειας στη Δανία και τη Νορβηγία, φαίνεται σημαντική, ενώ παρατηρείται κάπως μικρότερη στη Σουηδία και τη Φιλανδία. Στη Σουηδία, εντούτοις, η συμφόρηση του εθνικού δικτύου δείχνει ότι θα μπορούσε κανείς να διαιρέσει τη Σουηδία σε τρεις αγορές αντί για μία. Αυτό θα μπορούσε φυσικά να ενισχύσει τη συγκέντρωση της αγοράς.[3]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΠΛΑΙΣΙΟ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗΣ ΑΓΟΡΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Σε αυτό το κεφάλαιο θα αναπτύξουμε ένα πλαίσιο για την ανάπτυξη μοντέλων προσομοίωσης των μεταβάσεων σε ενεργειακά συστήματα. Αρχικά θα αναλύσουμε τις απαιτήσεις που υπάρχουν για ένα πλαίσιο μοντελοποίησης των συστημάτων αυτών και στη συνέχεια θα παρουσιάσουμε ένα πλαίσιο μοντελοποίησης βασισμένο στην ανάπτυξη Agent-Based μοντέλων (ABMs). Ωστόσο το συγκεκριμένο πλαίσιο δεν περιορίζεται μόνο στα ABMs μοντέλα, καθώς τα στοιχεία του πλαισίου είναι εφαρμόσιμα σε κάθε μοντέλο προσομοίωσης.

3.1 Απαιτήσεις για τη μοντελοποίηση της διαχείρισης ενεργειακών μεταβάσεων

Για την επιτυχή διαχείριση των μεταβάσεων - η ιδέα ότι οι φορείς θα μπορούσαν με κάποιο τρόπο να διαχειριστούν την εμφάνιση μιας μετάβασης – υπάρχει έλλειψη κατανόησης του κοινωνικό-τεχνικού χώρου μετάβασης. Η ίδια η πολυπλοκότητα πολλών κοινωνικό-τεχνικών συστημάτων, συνεπάγεται ότι έχουμε ορισμένες πιθανότητες επιτυχίας, όσον αφορά την καθοδήγηση μεγάλης κλίμακας συστημάτων προς κάποια προτιμώμενη κατάσταση.

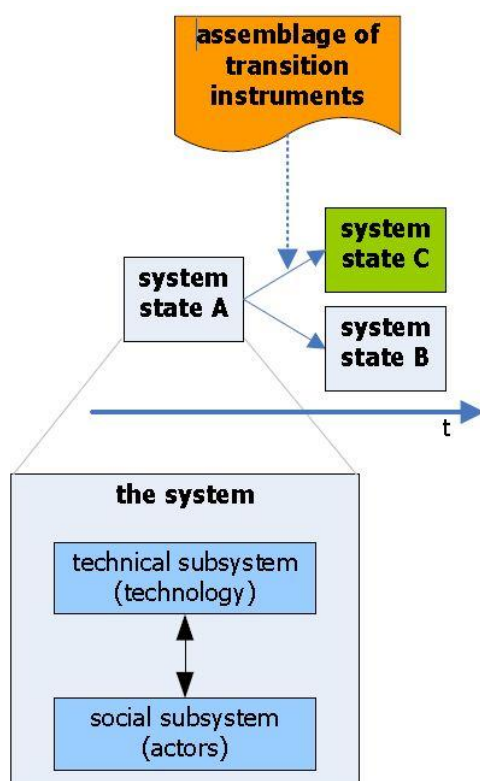
Η πολιτική είναι ένα εργαλείο μετάβασης, εάν οι υπεύθυνοι χάραξης πολιτικής την εφαρμόζουν για να προκαλέσουν διαρθρωτικές αλλαγές, με άλλα λόγια, αν υπάρχει η πρόθεση να προκαλέσουν μία μετάβαση. Η πολιτική είναι αποτελεσματική όταν εκκινεί πράγματι μία μετάβαση και οδηγεί σε μία επιθυμητή τελική κατάσταση, ενώ συχνά υπάρχουν πρόσθετες απαιτήσεις για την πορεία μετάβασης. Διευκρινίζεται ότι πολλές φορές ο σχεδιασμός κατάλληλων μεταβλητών για τη διαμόρφωση των μεταβάσεων είναι δύσκολος ή ακόμα και αδύνατος. Οι διαχειριστές των μεταβάσεων πρέπει να σχεδιάσουν ένα συνεπές πλαίσιο παρεμβάσεων (πολιτικές, κανονισμούς, στρατηγικές έρευνας και ανάπτυξης, χρηματοδότηση) και να παρακολουθούν και να αξιολογούν τα αποτελέσματά τους.

Χρειαζόμαστε μοντέλα προσομοίωσης για την αξιολόγηση των επιδόσεων μεμονωμένων ή αθροιστικών παρεμβάσεων. Ένα μοντέλο είναι μια απλοποιημένη αναπαράσταση (μέρους) ενός πραγματικού συστήματος. Τα μοντέλα χρησιμοποιούνται για διάφορους σκοπούς: για καλύτερη κατανόηση των υπαρχόντων συστημάτων, για την βελτίωση των επιδόσεων των υπαρχόντων συστημάτων, για την πρόβλεψη της μελλοντικής κατάστασης των υπαρχόντων συστημάτων, και για την σχεδίαση νέων συστημάτων. Με τη χρήση των υπολογιστών είναι δυνατή η προσομοίωση πραγματικών συστημάτων μέσω μοντέλων προσομοίωσης: η προσομοίωση είναι «η δραστηριότητα της διεξαγωγής πειραμάτων για την επίτευξη συγκεκριμένου στόχου με τη χρήση προγραμμάτων H/Y »[5]. Ο Robinson (2004), εστιάζει σε υπάρχοντα συστήματα στον ορισμό του για την προσομοίωση « Πείραμα-Πειραματισμός με μια απλουστευμένη απομίμηση (σε έναν υπολογιστή) ενός [...] συστήματος κατά την εξέλιξή του μέσα στο χρόνο, με σκοπό την καλύτερη κατανόηση και/ή την βελτίωση του συστήματος » [6].

3.1.1 Απαιτήσεις για την προσομοίωση ενεργειακών μεταβάσεων

Προτού οι προσομοιώσεις να μπορούν να αναπτυχθούν, πρέπει να καθορίζουμε μία σειρά από απαιτήσεις. Η προοπτική αυτή στηρίζεται στη πολύπλοκη θεωρία των κοινωνικό-τεχνικών συστημάτων και στην προσέγγιση του σχεδιαστή σχετικά με την διαχείριση των μεταβάσεων. Πώς αυτή η προοπτική μπορεί να μεταφραστεί σε μοντέλα προσομοίωσης συνοψίζεται στο σχήμα-3.1. Η διαχείριση μιας μετάβασης συνεπάγεται την προώθηση της εξέλιξης του συστήματος σύμφωνα με κάποια ανάγκη. Όταν αυτό εφαρμόζεται σε ένα υποθετικό σύστημα, θα μπορούσε κανείς να σκεφτεί την τρέχουσα κατάσταση του συστήματος, ως την ονομάσουμε κατάσταση του συστήματος A. Αυτή η κατάσταση περιέχει απαραίτητα τόσο τεχνικά όσο και κοινωνικά στοιχεία: πρόκειται για ένα κοινωνικό-τεχνικό σύστημα. Όλοι οι πιθανοί συνδυασμοί των αποφάσεων και των γεγονότων μπορεί να οδηγήσει σε άπειρο αριθμό πιθανών μελλοντικών καταστάσεων. Ωστόσο, μπορούμε να φανταστούμε μία κατάσταση του συστήματος την οποία θα ονομάσουμε κατάσταση του συστήματος B. Κάποιος θα μπορούσε να φανταστεί μια πιθανή μετάβαση ως την διαδρομή που μπορεί να προκύψει με την πάροδο του χρόνου ανάμεσα στις δύο αυτές καταστάσεις του συστήματος. Σε γενικές γραμμές η έννοια “μετάβαση” υποδηλώνει μια

διαδρομή με την πάροδο του χρόνου. Γνωρίζοντας ότι κάθε απόφαση δημιουργεί μια νέα διαδρομή, θα μπορούσε κανείς να καταλήξει σε μια ολόκληρη σειρά πιθανών μονοπατιών που συνδέουν την κατάσταση του συστήματος A με μια κατάσταση του συστήματος σαν την κατάσταση B με την πάροδο του χρόνου. Κάποιος θα μπορούσε επίσης να καταλήξει σε πολλές διαφορετικές καταστάσεις του συστήματος, ξεκινώντας από την κατάσταση A, καθώς πολλές αλληλεπιδράσεις οδηγούν σε διαφορετικές κατευθύνσεις.



Σχήμα-3.1 : Η προοπτική ενός κοινωνικό-τεχνικού συστήματος για την διαχείριση των μεταβάσεων.[12]

Η διαδρομή μιας μετάβασης επηρεάζεται από αλλαγές στα συστατικά του συστήματος, από τις σχέσεις εντός του συστήματος, και από εξωτερικές επιδράσεις. Οι παράγοντες, που αποτελούν μέρος του συστήματος, μπορούν να χρησιμοποιήσουν τα μέσα τους, π.χ. οι κυβερνήσεις μπορούν να χρησιμοποιήσουν τις πολιτικές τους, για να επηρεάσουν την πορεία μετάβασης και ως εκ τούτου να αλλάξουν την διαδρομή – την εξέλιξη του συστήματος στο σύνολό του – η οποία απεικονίζεται ως εκτροπή του συστήματος προς την κατεύθυνση της κατάστασης του συστήματος C στο σχήμα-3.1. Η διαχείριση των μεταβάσεων θα μπορούσε, ως εκ τούτου, να

θεωρηθεί ως εκτροπή της κατάστασης του συστήματος προς μια επιθυμητή συγκεκριμένη κατάσταση. Αναγνωρίζοντας την πολυπλοκότητα των ενεργειακών υποδομών, η συγκεκριμένη προοπτική μας οδηγεί σε πολλά εύλογα ερωτήματα, όπως «Ποια είναι η πιθανότητα μιας συγκεκριμένης κατεύθυνσης;», «Ποιες περιστάσεις την καθιστούν πιθανή;», «Για ποιόν αποτελεί επιθυμητή μελλοντική κατάσταση και για ποιόν όχι;», «Ποιές άλλες διαδρομές μετάβασης με μεγάλη πιθανότητα υπάρχουν;», κ.λ.π.

Φαίνεται πολύ περίπλοκο να αναπτυχθούν μοντέλα προσομοίωσης που να επιτρέπουν 1) την καταγραφή ενός πολύπλοκου κοινωνικό-τεχνικού συστήματος, 2) την αντίληψη του πώς η εξέλιξή του μπορεί να εκτραπεί και 3) την ανάπτυξη των στοιχείων που υποστηρίζουν την διαχείριση των μεταβάσεων στον τομέα της ενέργειας στον πραγματικό κόσμο. Τι είδους μοντέλο προσομοίωσης θα πρέπει να είναι; Αυτό το ερώτημα αντικατοπτρίζεται σε μία λίστα απαιτήσεων που μπορεί να βοηθήσει στην επιλογή ενός μοντέλου, τέτοιου ώστε οι προσομοιώσεις των μεταβάσεων όσον αφορά την ενέργεια που μπορούμε να αναπτύξουμε θα ταιριάζουν στον σκοπό τους και θα είναι χρήσιμες. Έχουμε υιοθετήσει την έννοια των λειτουργικών απαιτήσεων [7].

3.1.2 Απαιτήσεις για το πλαίσιο μοντελοποίησης

Οι ακόλουθες δύο προϋποθέσεις εστιάζουν στο ίδιο το πλαίσιο. Αυτές οι απαιτήσεις επικεντρώνονται στο γεγονός ότι είναι χρήσιμο οι προσομοιώσεις που θα αναπτυχθούν να υποστηρίζονται από το πλαίσιο.

Χρήσιμο για ανάπτυξη: Το πλαίσιο πρέπει να είναι χρήσιμο για τον σχεδιαστή των προσομοιώσεων των μεταβάσεων των ενεργειακών συστημάτων. Θα πρέπει να βοηθά αυτόν που πραγματοποιεί την μοντελοποίηση όσον αφορά την ανάπτυξη μοντέλων μετάβασης ενεργειακών συστημάτων. Θα πρέπει να βοηθά όσον αφορά τις πολλές επιλογές που γίνονται κατά τη διάρκεια της ανάπτυξης των προσομοιώσεων. Το πλαίσιο θα πρέπει να προωθεί την επιλογή των πιο βασικών στοιχείων και αλληλεπιδράσεων και να παρέχει μία επισκόπηση όλων των στοιχείων της μοντελοποίησης που πρέπει να ληφθούν υπόψη.

Παρουσίαση των δυνατοτήτων των προσομοιώσεων: Το πλαίσιο πρέπει να αναφέρει κατά πόσο συγκεκριμένα μοντέλα προσομοίωσης αναμένεται ότι θα είναι χρήσιμα. Θα πρέπει εκ των προτέρων να δείχνει κατά πόσον τα χαρακτηριστικά του μοντέλου προσομοίωσης επιτρέπουν την αντίληψη των μεταβάσεων και τι είδους πληροφορίες μπορεί να παρέχει ένα υπάρχον μοντέλο προσομοίωσης. Μια τυπολογία ή ταξινόμηση είναι ένας τρόπος με τον οποίο το πλαίσιο δίνει την δυνατότητα για μια γρήγορη αξιολόγηση όσον αφορά τη χρήση ενός μοντέλου προσομοίωσης μεταβάσεων στον τομέα της ενέργειας. Αυτό βοηθά αυτόν που αναπτύσσει το μοντέλο στο να αξιολογήσει υπάρχοντα στην βιβλιογραφία μοντέλα πράγμα που αποτελεί σημαντική βοήθεια στις αρχικές επιλογές σχεδιασμού.

3.1.3 Απαιτήσεις για τις προσομοιώσεις

Οι υπόλοιπες απαιτήσεις επικεντρώνονται στις προσομοιώσεις.

Φυσικές και κοινωνικές συνιστώσες: Υποστηρίξαμε ότι οι ενεργειακές υποδομές αποτελούν κοινωνικό-τεχνικά συστήματα. Από αυτή την οπτική οι προσομοιώσεις πρέπει να συλλάβουν τουλάχιστον τα βασικά φυσικά και κοινωνικά συστατικά των ενεργειακών συστημάτων. Οι φυσικές οντότητες των ενεργειακών συστημάτων, όπως οι μονάδες ηλεκτροπαραγωγής, συσκευές ευρείας κατανάλωσης, βιομηχανικές εγκαταστάσεις, δίκτυα και υλικές υποδομές είναι σημαντικές για την απόδοση αυτών των συστημάτων καθώς αλλάζουν κατά τη διάρκεια της μετάβασης. Ως εκ τούτου, πρέπει να παρίστανται έτσι ώστε οι μεταβάσεις να μπορούν να παρατηρούνται. Οι βασικές κοινωνικές οντότητες είναι οι φορείς, όπως οι κυβερνήσεις, οι παραγωγοί ενέργειας, οι καταναλωτές, και οι αγορές. Τα κύρια χαρακτηριστικά αυτών των οντοτήτων πρέπει να αναπαριστώνται στις προσομοιώσεις των μεταβάσεων ενέργειας, επειδή παίρνουν τις αποφάσεις που προαναγγέλλουν αλλαγές στα φυσικά υποσυστήματα, και τελικά, μπορεί να οδηγήσουν σε μία μετάβαση. Ως εκ τούτου, είναι απαραίτητες σε αυτά τα μοντέλα, προκειμένου να καταστεί δυνατή η παρατήρηση των μεταβάσεων του συστήματος σε ενεργειακά συστήματα.

Αλληλεπιδράσεις: Οι ενεργειακές υποδομές περιέχουν φυσικές και κοινωνικές συνιστώσες που αλληλεπιδρούν. Όπως έχει αναφερθεί, η αλλαγή σε ένα σύστημα καθοδηγείται από τις αποφάσεις των φορέων. Μπορούν, για παράδειγμα, να

αποφασίσουν να αλλάξουν τα φυσικά περιουσιακά τους στοιχεία. Αυτές οι αλληλεπιδράσεις είναι, ως εκ τούτου, καίριας σημασίας για την σωστή και πλήρη αντίληψη των μεταβάσεων. Οι αλληλεπιδράσεις μεταξύ των φυσικών συστατικών περιλαμβάνουν ανταλλαγές υλικών και πληροφοριών. Οι αλληλεπιδράσεις μεταξύ των κοινωνικών συνιστωσών περιλαμβάνουν διαπραγματεύσεις και ανταλλαγές πληροφοριών. Οι κοινωνικό-τεχνικές αλληλεπιδράσεις περιλαμβάνουν τον έλεγχο, την ιδιοκτησία, και τη λειτουργία των φυσικών συστατικών από τις κοινωνικές συνιστώσες. Όλες αυτές οι αλληλεπιδράσεις πρέπει να ληφθούν υπόψη, δεδομένου ότι το άθροισμα των αλληλεπιδράσεων καθορίζει την κατάσταση και την εξέλιξη του συστήματος. Επιπλέον, η κατάσταση και η εξέλιξη του συστήματος καθορίζει κατά πόσο μια μετάβαση μπορεί να παρατηρηθεί.

Αναδυόμενη δομή του συστήματος: Εκτός από το γεγονός ότι πρέπει να ενσωματωθούν τα βασικά στοιχεία και οι αλληλεπιδράσεις, είναι επίσης σημαντικός ο τρόπος που παρουσιάζονται. Η πρώτη απαίτηση σχετίζεται με τη δομή του συστήματος, την οποία ορίζουμε ως τη διαμόρφωση των φυσικών και κοινωνικών μερών του συστήματος και την αλληλεπίδραση μεταξύ αυτών των στοιχείων. Κρίσιμης σημασίας για την μετάβαση είναι ότι η κατάσταση του συστήματος αλλάζει σημαντικά. Η κατάσταση του συστήματος αλλάζει εν μέρει από τα συστατικά στοιχεία εντός του συστήματος, και εν μέρει από την ίδια τη δομή του συστήματος που προκύπτει από τις αλληλεπιδράσεις των εν λόγω στοιχείων. Ως εκ τούτου, απαιτούμε η δομή του συστήματος να προκύπτει από τις αλληλεπιδράσεις κατά τη διάρκεια των προσομοιώσεων και να εξελίσσεται. Με άλλα λόγια, η διαμόρφωση των συστατικών και των αλληλεπιδράσεων θα πρέπει να μην είναι προκαθορισμένη ή σταθερή. Μόνο αν η δομή του συστήματος είναι αναδυόμενη μπορούμε να παρατηρήσουμε τη δομή να αλλάζει. Μόνο τότε μπορούμε να παρατηρήσουμε τις μεταβάσεις σε προσομοιώσεις.

Δείκτες μετάβασης: Πρέπει τα μοντέλα μας να παρουσιάζουν δείκτες μετάβασης όταν η προσομοίωση τρέχει. Οι προσομοιώσεις πρέπει να παρουσιάζουν δείκτες σχεδιασμένους να μετρούν αλλαγές στη δομή του συστήματος. Όταν οι δείκτες είναι καλά σχεδιασμένοι, δείχνουν αν και πότε μια μετάβαση πραγματοποιείται στην προσομοίωση.

Εντοπισμός συγκεκριμένων παρεμβάσεων: Εκτός από τους δείκτες υπάρχει η ανάγκη για τον εντοπισμό συγκεκριμένων παρεμβάσεων. Προκειμένου να εκτιμηθούν οι επιπτώσεις των μεταβάσεων, το μοντέλο πρέπει να είναι σε θέση να εντοπίσει συγκεκριμένες παρεμβάσεις. Συνεπώς, μεμονωμένες παρεμβάσεις, ή σύνολα παρεμβάσεων σε ένα σχέδιο μετάβασης, όπως ένα σύνολο ορισμένων δημόσιων πολιτικών, θα πρέπει να μοντελοποιηθεί με τέτοιο τρόπο ώστε να είναι δυνατό να μετρηθεί υπό ποιες προϋποθέσεις η παρέμβαση αυτή οδηγεί σε μία μετάβαση.

Συγκεκριμένες νέες ιδέες: Οι προσομοιώσεις πρέπει να οδηγούν σε νέες ιδέες σε συγκεκριμένες μεταβάσεις των ενεργειακών συστημάτων. Μία σημαντική απαίτηση για κάθε μοντέλο προσομοίωσης των μεταβάσεων στον τομέα των ενεργειακών συστημάτων είναι να φέρνει νέες γνώσεις και ιδέες σχετικά με τις μεταβάσεις ειδικά για το υπό προσομοίωση σύστημα. Αυτός είναι και ο τελικός σκοπός της προσπάθειας μοντελοποίησης. Μπορούμε να θεωρήσουμε μια σειρά από τύπους ιδεών, όπως οι ιδέες που σχετίζονται με το σχεδιασμό της πολιτικής σε ενεργειακά συστήματα και ιδέες που αφορούν τη δυναμική των συστημάτων αυτών. Τέτοιες ιδέες μπορούν να δημιουργήσουν προτάσεις όσον αφορά το σχεδιασμό των συστημάτων αυτών και να προωθήσουν τη συζήτηση γύρω από πιθανές δράσεις στον πραγματικό κόσμο.

Γενικές γνώσεις για τις μεταβάσεις: Οι προσομοιώσεις πρέπει να οδηγήσουν σε γενικές ιδέες σχετικά με τις μεταβάσεις εκτός από τις ιδέες σε συγκεκριμένα ενεργειακά συστήματα. Αυτό αποτελεί σημαντική συνεισφορά στο σύνολο των γνώσεων σχετικά με την μετάβαση, η οποία οδηγεί σε γενικότερη έρευνα σχετικά με τις μεταβάσεις.

Υπάρχοντα μοντέλα: Οι προσομοιώσεις πρέπει να είναι σε θέση να συνδεθούν με τα υπάρχοντα μοντέλα ενεργειακών συστημάτων. Παρά το γεγονός ότι τα μοντέλα αυτά δεν έχουν σχεδιαστεί από τη σκοπιά των μεταβάσεων, πολλά μοντέλα μπορεί να είναι σχετικά ως συστατικά σε μεγαλύτερα μοντέλα. Χρησιμοποιώντας επιτυχώς την υπάρχουσα βιβλιογραφία για το σκοπό αυτό μπορούμε να οδηγηθούμε σε μια πιο αποτελεσματική διαδικασία ανάπτυξης μοντέλων. Για παράδειγμα, ένα μοντέλο CGE μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για την μοντελοποίηση της οικονομίας γύρω από ένα πρότυπο ενεργειακό σύστημα.

Τμηματικότητα (Modularity): Οι προσομοιώσεις πρέπει να οργανώνονται σε τμήματα. Αυτός ο τρόπος οργάνωσης επιτρέπει την επαναχρησιμοποίηση μερών των μοντέλων και αυξάνει την αποδοτικότητα πολλών αναπτυξιακών διαδικασιών μοντέλων. Εκτός από συγκεκριμένα μέρη μοντέλων, μπορούν να επαναχρησιμοποιηθούν πρακτικές από επιτυχημένες διαδικασίες ανάπτυξης άλλων μοντέλων.

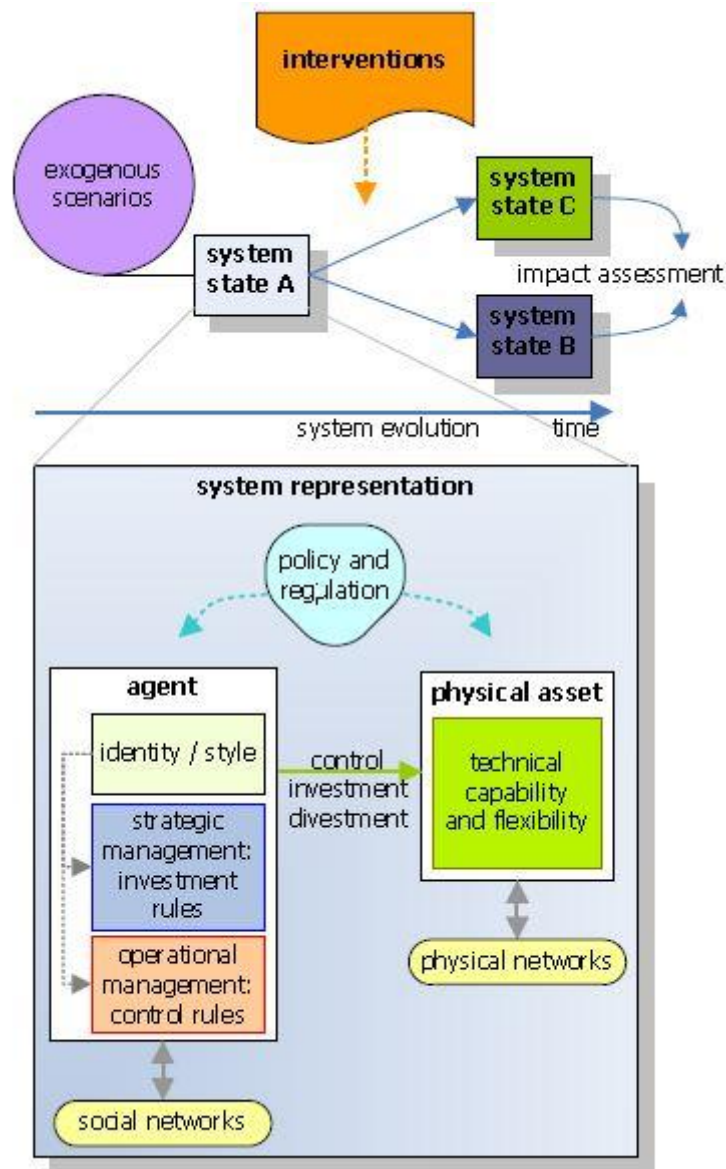
3.2 Πλαίσιο μοντελοποίησης για την προσομοίωση μεταβάσεων ενεργειακών συστημάτων

Στην παρούσα ενότητα παρουσιάζουμε ένα πλαίσιο για την προσομοίωση ενεργειακών μεταβάσεων. Θα χρησιμοποιήσουμε το πλαίσιο για την ανάπτυξη Agent-Based μοντέλων (ABMs)[12]. Ωστόσο το παρόν πλαίσιο δεν περιορίζεται μόνο στα ABMs μοντέλα: τα στοιχεία του πλαισίου είναι εφαρμόσιμα σε κάθε μοντέλο προσομοίωσης. Το πλαίσιο παρέχει μία συνεκτική επισκόπηση των δομικών στοιχείων για προσομοιώσεις εξελισσόμενων συστημάτων ενεργειακών υποδομών, και παρουσιάζει τις επιλογές που ο σχεδιαστής του μοντέλου πρέπει να κάνει καθώς και τους περιορισμούς που ισχύουν. Έτσι, βοηθάει στην εξισορρόπηση της ανάπτυξης μοντέλου εξελισσόμενων ενεργειακών δομών. Επιπλέον, το πλαίσιο χρησιμεύει ως μια τυπολογία μοντέλων μετάβασης: χαρακτηρίζει υπάρχοντα και νέα μοντέλα όσον αφορά την ικανότητά τους να εντοπίζουν συγκεκριμένες παρεμβάσεις, και παρέχει χρήσιμα στοιχεία για την αξιολόγηση της βιωσιμότητας της διαχείρισης των μεταβάσεων. Κατά συνέπεια, το πλαίσιο μοντελοποίησης δομεί τη συζήτηση γύρω από τις μεταβάσεις.

Το πλαίσιο μοντελοποίησης απεικονίζεται στο σχήμα-3.2, και περιλαμβάνει τα παρακάτω πέντε δομικά στοιχεία:

- Αναπαράσταση του συστήματος (system representation)
- Εξωγενή σενάρια (exogenous scenarios)
- Παρεμβάσεις (interventions)
- Εξέλιξη του συστήματος (system evolution)
- Εκτίμηση του αντίκτυπου (impact assessment)

Ακολουθεί αναλυτική περιγραφή του κάθε δομικού στοιχείου ξεχωριστά.



Σχήμα-3.2: Πλαίσιο μοντελοποίησης για την προσομοίωση ενεργειακών μεταβάσεων. Αν και το πλαίσιο δεν αναφέρεται σε συγκεκριμένο μοντέλο προσομοίωσης, η αναπαράσταση του συστήματος καθίσταται λειτουργική για ABM μοντέλα.[12]

3.2.1 Αναπαράσταση του συστήματος (system representation)

Το πλαίσιο μας, μας παρέχει τη δυνατότητα να χρησιμοποιήσουμε μοντέλα προσομοίωσης εξελισσόμενων συστημάτων ενεργειακών υποδομών. Αυτό συνεπάγεται ότι το μοντέλο προσομοίωσης αντιπροσωπεύει το σύστημα ενεργειακών υποδομών. Βασισμένοι στην ιδέα ότι τα συστήματα ενεργειακών υποδομών

αποτελούν πολύπλοκα εξελισσόμενα κοινωνικό-τεχνικά συστήματα, έχουμε επιλέξει agent-based μοντελοποίηση για να καταστήσουμε την αναπαράσταση του συστήματος λειτουργική. Καθορίζουμε τους όρους *agent-based models* και *agents* και αναλύουμε τα βήματα που χρειάζονται για να επιτύχουμε *agent-based* αναπαράσταση ενός εξελισσόμενου συστήματος ενεργειακών υποδομών. Το πλαίσιο μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για την προσομοίωση εξελισσόμενων συστημάτων ενεργειακών υποδομών χρησιμοποιώντας άλλα υποδείγματα, με ανάπτυξη μιας κατάλληλης αναπαράστασης του συστήματος. Σε γενικές γραμμές, όλα τα υποσυστήματα ή στοιχεία που βρίσκονται κάτω από σχετική επίδραση από άλλα υποσυστήματα ή στοιχεία πρέπει να περιλαμβάνονται στην αναπαράσταση του συστήματος.

Τα agent-based models (ABMs) προέκυψαν από το πεδίο της πολυπλοκότητας, του χάους, της κυβερνητικής και των υπολογιστών [8]. Ένας κοινός ορισμός για ένα agent-based μοντέλο είναι «μια συλλογή ετερογενών, ευφυών, και αλληλεπιδρώντων πρακτόρων, οι οποίοι λειτουργούν και υπάρχουν σε ένα περιβάλλον, το οποίο από την πλευρά του αποτελείται από πράκτορες» [9],[10]. Με άλλα λόγια, «τα συστατικά στοιχεία ενός agent-based μοντέλου είναι μια συλλογή πρακτόρων (agents) και των καταστάσεών τους, καθώς και οι κανόνες που διέπουν τις αλληλεπιδράσεις των πρακτόρων και του περιβάλλοντος μέσα στο οποίο ζουν.», [11].

Ένας πράκτορας (agent) ορίζεται ως «ένα έγκλειστο υπολογιστικό σύστημα που βρίσκεται σε κάποιο περιβάλλον, και είναι ικανό για ευέλικτη αυτόνομη δράση σε αυτό το περιβάλλον, προκειμένου να επιτευχθούν οι στόχοι σχεδιασμού του» [13]. Με άλλα λόγια, ένας πράκτορας είναι «ένα πράγμα που κάνει πράγματα σε πράγματα»[11].

Ένα σημαντικό μοντέλο σχεδιασμού για πράκτορες προέρχεται από την τεχνητή νοημοσύνη και ονομάζεται Beliefs-Desires-Interventions (BDI) model [14]:

- Οι πεποιθήσεις (beliefs), είναι οι ερμηνείες του πράκτορα για το περιβάλλον του.
- Οι επιθυμίες (desires), είναι οι γενικοί στόχοι του πράκτορα.
- Τα συμφέροντα (interests), καθορίζονται από τους στόχους του πράκτορα οι οποίοι, λόγω των πεποιθήσεών του, μεταφράζονται σε δράσεις.

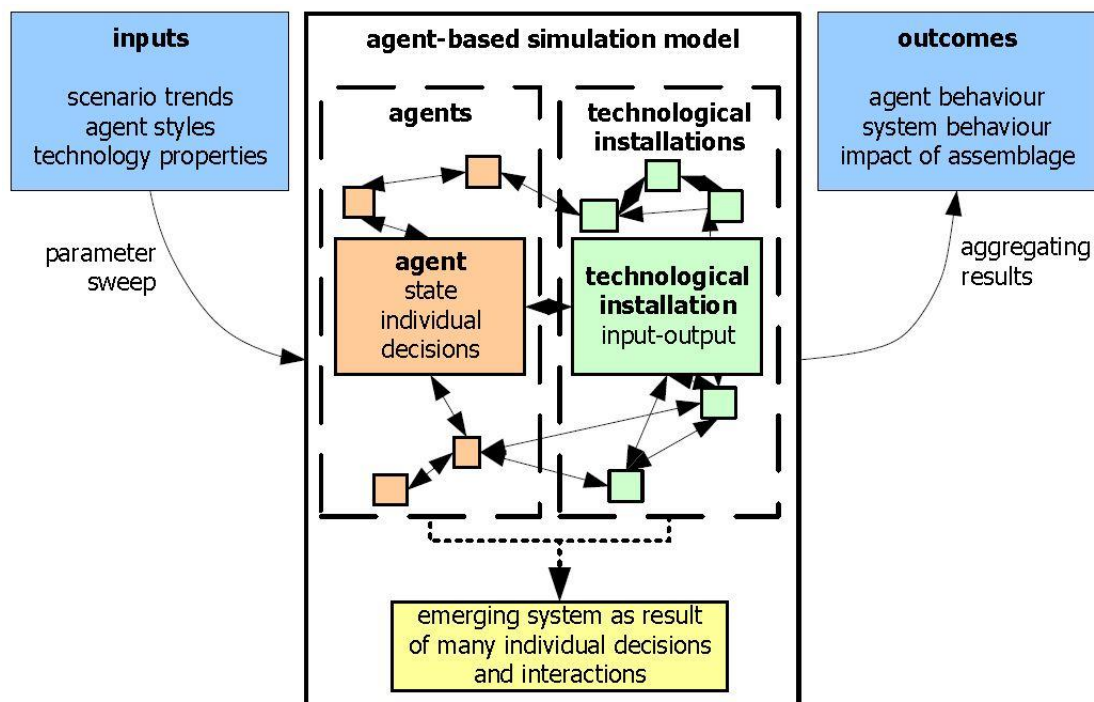
Το BDI μοντέλο ήταν η αφετηρία πολλών ιδιοτήτων που μπορούν να έχουν οι πράκτορες. Οι ιδιότητες αυτές αναφέρονται στο πώς οι πεποιθήσεις, επιθυμίες και προθέσεις του πράκτορα γίνονται αντιληπτές και εφαρμόζονται. Για παράδειγμα, οι πράκτορες μπορεί να είναι ετερογενείς μοντελοποιώντας ποικίλες επιθυμίες ή πεποιθήσεις. Οι πεποιθήσεις ονομάζονται λειτουργική μνήμη ενός πράκτορα. Περιέχει πληροφορίες για τον ίδιο τον πράκτορα (η κατάσταση του πράκτορα). Η γνώση ή οι παρατηρήσεις σχετικά με την συμπεριφορά άλλων πρακτόρων αποτελούν επίσης μέρος των πεποιθήσεων. Ως εκ τούτου, οι πεποιθήσεις αναπτύσσονται κατά τη διάρκεια αλληλεπιδράσεων με άλλους πράκτορες. Οι αλληλεπιδράσεις αυτές επιφέρουν ή είναι αποφάσεις που λαμβάνονται από τους πράκτορες. Σκοπίμως λειτουργούν βάσει των κανόνων απόφασης. Κοινές ιδιότητες των πρακτόρων είναι ότι είναι αυτόνομοι, ευέλικτοι, ικανοί για μάθηση, ενεργητικοί και αντιδραστικοί. Συνοψίζοντας, ABM είναι η προσομοίωση μιας αλληλεπίδρασης μιας σειράς πρακτόρων με την πάροδο του χρόνου, που παίρνουν αποφάσεις βασιζόμενοι στις πεποιθήσεις και τις επιθυμίες τους.

Με βάση το BDI μοντέλο, η βιβλιογραφία περιέχει διαφορετικά σύνολα ιδιοτήτων για τους πράκτορες ([15],[16]). Ο πυρήνας της συζήτησης στη βιβλιογραφία εστιάζεται στα ακόλουθα στοιχεία:

- Ένα σύνολο στόχων
- Μια λειτουργική μνήμη
- Μια κοινωνική μνήμη
- Ένα σύνολο κανόνων κοινωνικής εμπλοκής

Οι πράκτορες έχουν στόχους και μπορούν να λάβουν δράσεις για την επίτευξη αυτών των στόχων. Το σύνολο των στόχων είναι στόχοι που ο πράκτορας θέλει να επιτύχει. Η λειτουργική μνήμη ενός πράκτορα είναι ένα σύνολο από στόχους πληροφορίες για τον εαυτό του, που καλούνται κατάσταση. Η κοινωνική μνήμη είναι ένα σύνολο από γνώσεις σχετικά με τη συμπεριφορά του πράκτορα και άλλων πρακτόρων. Προηγούμενες δράσεις και αλληλεπιδράσεις οικοδομούν αυτή τη μνήμη. Οι κανόνες κοινωνικής συμπλοκής καθορίζουν την κοινωνική συμπεριφορά ενός πράκτορα. Περιέχει τις δυνατότητες ενός πράκτορα να αλληλεπιδρά με άλλους ή να παίρνει αποφάσεις. Με άλλα λόγια, ένα agent-based μοντέλο είναι μια προσομοίωση της

αλληλεπίδρασης μιας σειράς πρακτόρων με την πάροδο του χρόνου, που παίρνουν αποφάσεις με βάση τους στόχους τους, εξωγενείς παραμέτρους, και προηγούμενες αλληλεπιδράσεις με άλλους πράκτορες.



Σχήμα-3.3: Η χρήση ενός agent-based μοντέλου: από τις παραμέτρους εισόδου στα αποτελέσματα[12].

Το σχήμα-3.3 εστιάζει στην αναπτυξιακή διαδικασία του μοντέλου, εντός του πλαισίου για την προσομοίωση ενεργειακών μεταβάσεων. Οι παράγοντες, ο κάθε ένας από τους οποίους παίρνει ατομικές αποφάσεις, και οι τεχνολογικές εγκαταστάσεις αποτελούν τον πυρήνα του μοντέλου. Οι αποφάσεις των πρακτόρων παίρνονται με βάση τις εισόδους των παραμέτρων. Με βάση τις αποφάσεις των επιμέρους παραγόντων, το σύστημα σαν σύνολο εξελίσσεται. Ύστερα από τον συνυπολογισμό των αποτελεσμάτων, τα αποτελέσματα μπορούν να αναλυθούν όσον αφορά τη συμπεριφορά των πρακτόρων και τις εξελίξεις του συστήματος.

Οι πράκτορες στο μοντέλο κάνουν στρατηγική διαχείριση (strategic management). Πρέπει να παίρνουν αποφάσεις που έχουν μεγάλη και μακροχρόνια επίδραση. Δεδομένου ότι πρέπει να ασχοληθούν με τις καθημερινές λειτουργικές αποφάσεις, οι

πράκτορες κάνουν επίσης λειτουργική διαχείριση (operational management). Αυτά τα δύο διαφορετικά είδη αποφάσεων μοντελοποιούνται και αναλύονται ξεχωριστά.

Τα φυσικά στοιχεία δεν δρουν από μόνα τους, δεν είναι ενεργητικά. Ως εκ τούτου, οι εγκαταστάσεις και οι δυναμικότητες χαρακτηρίζουν στοιχεία στο φυσικό σύστημα.

Πολλά εργαλεία και μέθοδοι υπάρχουν για να καθιστούν λειτουργική την αναπαράσταση του συστήματος. Η ανάπτυξη μιας αναπαράστασης ενός συστήματος είναι μια διαδικασία που συνδυάζει την συλλογή και ερμηνεία της γνώσης σχετικά με το σύστημα. Το πλαίσιο ορίζει τη δομή για τη μετάφραση αυτής της γνώσης στην αναπαράσταση του συστήματος. Αυτό προκύπτει συνδυάζοντας τη χρήση πρακτόρων σε ένα agent-based μοντέλο και την οπτική του κοινωνικό-τεχνικού συστήματος.

Ο δημιουργός του μοντέλου ορίζει ένα θεωρητικό-εννοιολογικό μοντέλο του συστήματος, το οποίο περιέχει όλα τα σχετικά στοιχεία. Στη συνέχεια, η εφαρμογή των στοιχείων αυτών καθορίζει την ταυτότητα και τους κανόνες απόφασης των πρακτόρων καθώς και τις εγκαταστάσεις και τις δυναμικότητες των φυσικών στοιχείων. Επιπλέον, ο ορισμός των πρωτοκόλλων επικοινωνίας για την αλληλεπίδραση των πρακτόρων επιτρέπει την δημιουργία κοινωνικών και φυσικών δικτύων.

Στο ίδιο το πλαίσιο, εξακολουθούν να υπάρχουν πολλές πιθανές αναπαραστάσεις του συστήματος. Η περαιτέρω λειτουργικότητα είναι μια προσαρμοσμένη σχεδιαστική διαδικασία, συγκεκριμένη ανάλογα με τον υπό μελέτη τομέα και την οπτική του ερευνητή. Συμπληρωματικές συμβάσεις ή μεθοδολογίες διευκολύνουν αυτή τη διαδικασία. Για παράδειγμα, μπορεί να χρησιμοποιήσει κάποιος τη μέθοδο αποσύνθεσης συστήματος (System Decomposition Method-SDM), [17],[18], σχεδιασμένη για να συλλάβει την σιωπηρή γνώση των παραγόντων σε ένα agent-based μοντέλο. Η μέθοδος αυτή περιγράφει τη συστηματική συλλογή δεδομένων, από τους παράγοντες και τους ειδικούς του τομέα. Ένα τυπικό υπολογιστικό μοντέλο περιλαμβάνει μια αναπαράσταση της γνώσης των ενδιαφερόμενων μερών. Αυτή η γνώση μπορεί να επισημοποιηθεί και να κοινοποιηθεί με τη χρήση οντολογιών [19],[20]. Στη συνέχεια διατυπώνονται πολλές προτάσεις σχετικά με την αύξηση της αποτελεσματικότητας της αναπτυξιακής διαδικασίας ενός μοντέλου.

3.2.2 Εξωγενή σενάρια (*Exogenous scenarios*)

Τα χρήσιμα μοντέλα απαιτούν αυστηρή οριοθέτηση. Ειδικά όσον αφορά τη μελέτη των μεταβάσεων, η απόφαση του τι θα πρέπει να περιλαμβάνεται και τι να αποκλείεται είναι εξαιρετικά δύσκολη. Ενδογενώς, δεν μπορούν όλα τα σχετικά υποσυστήματα να αναπαρασταθούν στο πλαίσιο του συστήματος. Ως εκ τούτου, πρέπει να γίνουν υποθέσεις σχετικά με τις σχέσεις μεταξύ των υποσυστημάτων. Όπου είναι δυνατό, ορίζουμε μέρη του συστήματος που δεν επηρεάζονται από άλλες περιοχές εντός του συστήματος και τα αποκλείουμε από το σύστημα. Το οτιδήποτε έξω από τα όρια του συστήματος είναι, κατά συνέπεια, εξωγενές. Οτιδήποτε εφικτό αλλά εξωγενές συνθέτει το χώρο σεναρίων [21]. Ο χώρος σεναρίων (ή μέρος αυτού) μπορεί να αποτελείται από διάφορα επίπεδα πολυπλοκότητας. Σε όλα αυτά τα επίπεδα, οι σχετικές αλλά ανεπηρέαστες συνιστώσες μοντελοποιούνται ως εξωγενείς παράμετροι. Τα σενάρια «μερικές φορές ερμηνεύονται ως μια σειρά από εφικτές εξελίξεις, είναι ίσως προτιμότερο να θεωρηθούν ως κόσμοι που ποτέ δεν θα υλοποιηθούν, αλλά παρ' όλα αυτά είναι ρεαλιστικοί και συνεπείς σε εσωτερικό επίπεδο»[22]. Το ζητούμενο είναι να επιλεγεί μια λειτουργική μέθοδος για τη μοντελοποίηση εξωγενών σεναρίων, τα οποία μπορεί να είναι στατικά, να ποικίλλουν μεμονωμένα, ή να ποικίλλουν μαζί.

Τιμές στατικών παραμέτρων (*static parameter values*) Ο ευκολότερος τρόπος να αλλάζουν οι παράμετροι είναι μόνο μεταξύ των εκτελέσεων των προσομοιώσεων. Για παράδειγμα, σε κάθε εκτέλεση της προσομοίωσης μια συγκεκριμένη τιμή αποδίδεται στην τιμή του φυσικού αερίου στην αγορά, η οποία επιλέγεται από έναν αριθμό προκαθορισμένων τιμών. Αν ο αριθμός των πιθανών τιμών ισούται με ένα, αυτό συνεπάγεται μια στατική τιμή για όλες τις προσομοιώσεις, και άρα αποκλείεται από το σενάριο.

Ένα εύρος τιμών, μερικές φορές με μη ομοιόμορφη κατανομή, είναι πιο σύνηθες. Η ανάγκη για δεδομένα είναι περιορισμένη: για κάθε παράμετρο, το ελάχιστο, το μέγιστο, οι τιμές του μεσοδιαστήματος, και ενδεχομένως η κατανομή πρέπει να καθοριστούν. Το εύρος των διαθέσιμων τιμών αντανακλά την αβεβαιότητα της παραμέτρου.

Ποικίλες τάσεις (*varying trends*) Η μοντελοποίηση των παραμέτρων του σεναρίου ως συνεχή τάση είναι πιο δύσκολη και πιο ευαίσθητη στα δεδομένα. Σε αυτό το σημείο χρειαζόμαστε μια αναπαράσταση της τάσης των τιμών, για παράδειγμα, του φυσικού αερίου. Μια αναπαράσταση είναι μια αρχική τιμή και ένα πρότυπο μεταβολής το οποίο μπορεί να είναι στοχαστικό. Η μοντελοποίηση των παραμέτρων του σεναρίου ως τάσεις έχει δύο συνέπειες. Πρώτον, αυτό απαιτεί πρόσθετες παραμέτρους: μια κατανομή πιθανότητας και τις ιδιότητές τις. Αν και πιο περίπλοκη για την ανάπτυξη της, αυτή η προσέγγιση επιτρέπει την χρήση πιο ρεαλιστικών σεναρίων. Η μεταβλητότητα στις τάσεις χαρακτηρίζει την αβεβαιότητα της παραμέτρου. Αυτή η αβεβαιότητα μπορεί να σχετίζεται με το χρόνο (η αβεβαιότητα μπορεί να αυξηθεί ή να μειωθεί κατά το χρόνο προσομοίωσης). Δεύτερον, το μοντέλο πρέπει να προσαρμόζεται στις αλλαγές της τιμής αυτής της παραμέτρου. Είναι δεδομένο ότι οι παράμετροι δεν είναι στατικές εντός μιας προσομοίωσης, αυτή η τάση πρέπει να ληφθεί υπόψη, για παράδειγμα, με την πρόβλεψη των πρακτόρων. Ως εκ τούτου, η χρήση ποικίλων τάσεων οδηγεί σε πολύ διαφορετικά μοντέλα.

Σύνδεση με άλλα μοντέλα Τέλος, μπορεί κανείς να αναπτύξει ή να χρησιμοποιήσει υπάρχοντα μοντέλα, όπως system dynamics models (SD) ή μαθηματικά μοντέλα όσον αφορά τις εξωγενείς παραμέτρους. Τα SD μοντέλα- συλλογές διαφορικών εξισώσεων- συνήθως θεωρούνται ασύμβατα με τα ABMs, επειδή τα ABMs είναι διακριτά και τα SD μοντέλα είναι συνεχή [23],[24]. Τα είδη των υποθέσεων συχνά διαφέρουν μεταξύ των πρότυπων μοντέλων, γεγονός που καθιστά δύσκολη τη σύνδεση τους. Υποθέτουμε ωστόσο, ότι πρέπει να συνδυάσουμε διάφορα υποδείγματα, όπως τα ABM και SD σε υβριδικά, προκειμένου να χρησιμοποιήσουμε ότι καλύτερο έχουν να προσφέρουν. Ένα ενιαίο μαθηματικό CGE ή SD μοντέλο, μπορεί να παράγει πολλαπλές παραμέτρους σεναρίων. Και πάλι, αυτό μπορεί να είναι πιο πολύπλοκο από τις ποικίλες τάσεις, καθώς αυτή η προσέγγιση δεν οδηγεί μόνο σε απαιτήσεις λογισμικού, αλλά απαιτεί επίσης περισσότερες και διαφορετικές δεξιότητες μοντελοποίησης. Η χρήση μοντέλων προσομοίωσης για τις εξωγενείς παραμέτρους θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη εάν υπάρχει στενή σύνδεση μεταξύ πολλαπλών παραμέτρων των σεναρίων, ειδικά όταν είναι διαθέσιμα κατάλληλα και επικυρωμένα μοντέλα.

3.2.3 Παρεμβάσεις (interventions)

| Level | Description | Level of complexity |
|-------|------------------------------|-------------------------------|
| 1 | Implicitly modelled | |
| 2 | Fixed system parameter | Model requires responsiveness |
| 3 | Exogenous scenario parameter | Model requires flexibility |

Πίνακας-3.1: Μοντελοποίηση μεμονωμένων παρεμβάσεων ή συνόλων από παρεμβάσεις.[12]

Παρόμοια με τα εξωγενή σενάρια, υπάρχουν διαφορετικά επίπεδα για την μοντελοποίηση μεμονωμένων παρεμβάσεων ή συνόλων από παρεμβάσεις. Ο πίνακας 3.1 παρουσιάζει μια επισκόπηση αυτών των επιπέδων. Υποθέτουμε ότι για την κατάλληλη αξιολόγηση μεμονωμένων ή συνόλων από παρεμβάσεις, θα πρέπει να στοχεύουμε στο υψηλότερο επίπεδο (επίπεδο τρία), αν και μπορεί να είναι δυνατό να ξεκινήσουμε από το επίπεδο δύο και να αναβαθμιστούμε αργότερα. Το επίπεδο ένα θα πρέπει να αποφευχθεί δεδομένου ότι η δυνατότητα επαναχρησιμοποίησης σε ένα υψηλότερο επίπεδο αποδεικνύεται πολύ δύσκολη αν όχι αδύνατη. Πρέπει να παρατηρήσουμε ότι αυτά τα επίπεδα δεν είναι αποκλειστικά και ότι διαφορετικά επίπεδα πολιτικών και κανονισμών μπορεί να είναι ταυτόχρονα παρόντα σε ένα μοντέλο. Ακολουθούν αναλυτικά τα τρία επίπεδα.

Implicitly modeled Σε αυτή την περίπτωση, η δομή του μοντέλου εξυπηρετεί συγκεκριμένες πολιτικές και ρυθμίσεις. Η παρέμβαση, είναι ένα σταθερό σύνολο από πολιτικές και ρυθμίσεις, ο καθορισμός των οποίων περιλαμβάνεται στο μοντέλο. Δεδομένου ότι το σύνολο είναι καθορισμένο, μπορεί να αποδειχθεί δύσκολο ή αδύνατο να προσαρμοστεί σε αλλαγές. Οι συνιστώσες του συστήματος δεν χρειάζεται να έχουν επίγνωση των παρεμβάσεων. Ως αποτέλεσμα, η συνέπεια των παρεμβάσεων δεν θα μπορούσε να εκτιμηθεί. Ωστόσο, χρησιμοποιώντας αυτό το επίπεδο δεν θα οδηγηθούμε σε μοντέλα που συμβάλλουν στην αξιολόγηση της βιωσιμότητας της διαχείρισης των μεταβάσεων. Κατά συνέπεια, συνιστούμε να μην εφαρμόζονται πολιτικές και ρυθμίσεις πρώτου επιπέδου στα μοντέλα μετάβασης. Η ίδια η επιλογή και ο σχεδιασμός της πολιτικής και των ρυθμίσεων είναι εκ των πραγμάτων μια μεταβλητή σχεδιασμού της μετάβασης. Αν η πολιτική δεν μοντελοποιηθεί ως τέτοια, η τροποποίηση της πολιτικής είναι αδύνατη χωρίς τη δημιουργία νέου μοντέλου.

Fixed system parameter Όταν η πολιτική ή η ρύθμιση αποτελεί σταθερή παράμετρο του συστήματος (fixed system parameter), πρέπει το μοντέλο να είναι σε θέση να ανταποκριθεί σε αυτή τη ρύθμιση των παραμέτρων κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης. Όσον αφορά τα agent-based μοντέλα, αυτό σημαίνει ότι οι πράκτορες βασίζονται στις αποφάσεις τους στη συγκεκριμένη πολιτική και υποθέτουν (ή είναι αβέβαιοι σχετικά με) τη σταθερότητα αυτής της πολιτικής ρύθμισης. Δεδομένου ότι η πολιτική δεν σχετίζεται με άλλες ιδιότητες του συστήματος, είναι εξωγενής για το μοντέλο.

Όσον αφορά το δεύτερο επίπεδο, εξακολουθεί να είναι αδύνατο να εκτιμηθεί η επίδραση των παρεμβάσεων. Το μόνο πλεονέκτημα της χρήσης αυτού του επιπέδου είναι ότι μπορεί να είναι πιθανή η αναβάθμιση του μοντέλου στο υψηλότερο επίπεδο σε μεταγενέστερο στάδιο. Η αναβάθμιση συνεπάγεται την προσθήκη της απόκρισης του συστήματος σε άλλες πολιτικές, ενώ η δομή του μοντέλου παραμένει άθικτη. Επομένως προτείνεται η μοντελοποίηση να ξεκινά από το επίπεδο δύο ή υψηλότερα.

Exogenous scenario parameter Τρίτον, η πολιτική μπορεί να είναι μία ή ένα σύνολο από παραμέτρους σεναρίων, οι οποίες είναι εξωγενείς για το σύστημα στην μετάβαση. Σε αυτή τη θεώρηση, η πολιτική είναι ένα από τα τρία επίπεδα των παραμέτρων των σεναρίων – διαφορετικές τιμές των παραμέτρων μεταξύ των εκτελέσεων, διαφορετικές τάσεις μεταξύ των εκτελέσεων, ή βασίζονται σε μοντέλα δυναμικών συστημάτων – με όλα τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα τους (δείτε την ενότητα με τα εξωγενή σενάρια).

Μόνο σε αυτό το επίπεδο είναι δυνατή η διαφοροποίηση της μοντελοποιημένης πολιτικής ή ρύθμισης, για την εξαγωγή και τη δοκιμή διάφορων εναλλακτικών όσον αφορά στο σχεδιασμό των μεταβάσεων. Επομένως, αυτό είναι το χαμηλότερο επίπεδο όπου θα πρέπει να στοχεύει ο σχεδιαστής για την μοντελοποίηση των παρεμβάσεων σε αυτό το πλαίσιο. Ωστόσο, όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, μπορεί κανείς να ξεκινήσει με το δεύτερο επίπεδο (fixed system parameters), καθώς αυτό δεν περιορίζει την επέκταση του μοντέλου.

3.2.4 Εξέλιξη του συστήματος (*system evolution*)

Με τις ενέργειες των πρακτόρων, το σύστημα εξελίσσεται με την πάροδο του χρόνου. Λειτουργούν σαν μέρος του συστήματος, αντιδρώντας σε εξωγενή σενάρια και σε ενδογενή μέρη του συστήματος. Από τη στιγμή που οι πράκτορες είναι αλληλεξαρτώμενοι, εμφανίζονται οι ιδιότητες του επιπέδου του συστήματος και η συμπεριφορά του συστήματος. Η ποικιλία στις ρυθμίσεις των παραμέτρων εισόδου παρέχει διαφορές στα αποτελέσματα των εκτελέσεων των προσομοιώσεων. Επομένως, η εξέλιξη του συστήματος σε μία προσομοίωση δεν είναι μια πρόβλεψη για το μέλλον του εν λόγω συστήματος. Ως εκ τούτου, για να καταλήξουμε σε ορθά συμπεράσματα, είναι απαραίτητη η αξιολόγηση του αντίκτυπου χρησιμοποιώντας διαφορετικές εξελίξεις του συστήματος σε διαφορετικές θέσεις στο χώρο παραμέτρων.

3.2.5 Εκτίμηση του αντίκτυπου (*impact assessment*)

Μαζί, οι παραπάνω έννοιες είναι τα απαραίτητα συστατικά για την αξιολόγηση του αντίκτυπου διαφόρων πρότυπων παρεμβάσεων: πώς να επιλέξουμε μεταξύ (συνόλων) παρεμβάσεων; Η εκτίμηση του αντίκτυπου πρέπει να περιλαμβάνει ένα καλά σχεδιασμένο σύνολο πειραμάτων και μια στέρεα ανάλυση των αποτελεσμάτων τους.

Σάρωση παραμέτρων: πειραματικός σχεδιασμός

Για να αξιολογηθούν και να συγκριθούν οι επιδόσεις διαφορετικών παρεμβάσεων, μπορεί κανείς να χρησιμοποιήσει τη βιβλιογραφία σχετικά με το σχεδιασμό των πειραμάτων ([25],[26],[27]).

Οι κλασικές μέθοδοι περιλαμβάνουν παραγοντικό σχεδιασμό, με τον οποίο οι παράγοντες αλλάζουν ανεξάρτητα [28]. Σύμφωνα με τον παραγοντικό σχεδιασμό, τα πειράματα αναλαμβάνουν όλους τους πιθανούς συνδυασμούς των επιπέδων των παραγόντων. Συνήθως, κάθε ένας από τους παράγοντες έχει μόνο δύο διαφορετικές τιμές.

Αν ο αριθμός των παραγόντων είναι πολύ μεγάλος για να εκτελεστεί εντός ενός εύλογου χρονικού διαστήματος, δεδομένης της υπολογιστικής ισχύος, μπορεί να

υιοθετηθεί ένας τμηματικός παραγοντικός σχεδιασμός. Μια αποτελεσματική μορφή κλασματικού παραγοντικού σχεδιασμού επιτυγχάνεται με μια τεχνική που ονομάζεται Latin Hypercube Sampling (LHS) [29]. Η τεχνική αυτή επιτρέπει την επιλογή οποιουδήποτε προτιμώμενου αριθμού πειραμάτων, όπου τα αποτελέσματα έχουν μια ομοιόμορφη κατανομή πάνω στο πολυδιάστατο χώρο των παραμέτρων. Έτσι, ο αριθμός των πειραμάτων μπορεί να ρυθμιστεί ανάλογα με το χρόνο και τη διαθέσιμη υπολογιστική ισχύ.

Η χρήση περιβαλλοντικών σεναρίων [21] οδηγεί σε μια διαφορετική ρύθμιση, αν και το πειραματικό σχέδιο μπορεί να θεωρηθεί σαν μια διαφορετική κατηγορία κλασματικού παραγοντικού σχεδιασμού. Κάθε σενάριο είναι ένας συνδυασμός τιμών σε ένα σύνολο παραγόντων, μοντελοποιημένων ξεχωριστά στον πλήρη και κλασματικό παραγοντικό σχεδιασμό. Με άλλα λόγια, οι παράμετροι ομαδοποιούνται ανάλογα με τη διακύμανση τους, γεγονός που οδηγεί σε ένα μικρότερο αριθμό πιθανών συνδυασμών. Για να καταλήξουμε σε μια κατάλληλη μεταβολή των τιμών των παραγόντων στο σενάριο, πρέπει να χρησιμοποιήσουμε ένα από τα πειραματικά σχέδια που περιγράφονται. Για παράδειγμα, ένα σενάριο μπορεί να έχει τρεις ομάδες παραγόντων που διαφοροποιούνται με πλήρη παραγοντικό σχεδιασμό. Σε ένα τέτοιο σχέδιο, θα έχει οκτώ διαφορετικά σενάρια (γωνίες ενός κύβου). Συνολικά, αυτό είναι ένα κλασματικό παραγοντικό σχέδιο που είναι θεμελιωδώς διαφορετικό από το LHS, επειδή οι προεπιλεγμένες κατηγορίες παραγόντων διαφέρουν. Κατά συνέπεια, η χρήση περιβαλλοντικών σεναρίων βασίζεται σε παραδοχές ότι οι παράγοντες εντός κάθε σεναρίου αλληλοεξαρτώνται και ότι κάθε παράγοντας είναι ανεξάρτητος από παράγοντες άλλων ομάδων.

Ανάλυση των αποτελεσμάτων: μέθοδοι αξιολόγησης

Τα πρώτα αποτελέσματα των προσομοιώσεων είναι ένα πλήρες αρχείο της κατάστασης του εξελισσόμενου συστήματος κατά τη διάρκεια όλων των πειραμάτων στη σάρωση των παραμέτρων. Για να καταστεί δυνατή η δοκιμή για συσχετισμούς, οι καταγεγραμμένοι παράμετροι δεν πρέπει να περιλαμβάνουν μόνο τους επιλεγμένους δείκτες απόδοσης, αλλά και τις μεταβλητές εισόδου. Από τη στιγμή που ο χώρος παραμέτρων είναι μεγάλος, η σύγχρονη υπολογιστική ισχύς επιτρέπει μεγάλα σύνολα εκτελέσεων να ολοκληρώνονται σε εύλογο χρονικό διάστημα, αυτό μεταφράζεται σε

ένα τεράστιο όγκο δεδομένων. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν μέθοδοι απεικόνισης για να συλλάβουν μερικές λεπτομέρειες που “κρύβονται” στα δεδομένα, αλλά αυτό δεν οδηγεί σε πραγματική αξιολόγηση. Αντίθετα, οι στατιστικές μέθοδοι για την ανάλυση των δεδομένων πρέπει να χρησιμοποιούνται για την αξιολόγηση και σύγκριση της δομής του συστήματος και της απόδοσης κάτω από διαφορετικές παρεμβάσεις. Ωστόσο, οι στατιστικές μέθοδοι έχουν γενικά έναν στατικό χαρακτήρα και δεν είναι ικανές για επαρκή ανάλυση των αποτελεσμάτων. Παρουσιάζεται η ανάγκη για την προσαρμογή και ανάπτυξη στατιστικών μεθόδων για την αξιολόγηση και σύγκριση διαφορετικών σχεδίων σχετικά με την ποικιλία και αβεβαιότητα στην εξέλιξη της απόδοσης.

3.3 Η αναγκαιότητα ενός νέου μοντέλου

Οι ενεργειακές πολιτικές μπορούν να αξιολογηθούν με βάση δύο σημαντικές πτυχές: την αποδοτικότητα και την αποτελεσματικότητα. Η αποδοτικότητα αφορά το οικονομικό κόστος που δέχεται η κοινωνία για την επίτευξη των στόχων της πολιτικής. Στην πραγματικότητα, η υιοθέτηση νέων τεχνολογιών ή η εσωτερίκευση εξωγενών επιδράσεων οδηγεί κυρίως σε επιδράσεις στην κατανομή της κοινωνικής ευημερίας. Κατά συνέπεια, είναι σύνηθες η επικέντρωση στην αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας σε συγκεκριμένους τομείς της οικονομίας σε μια περιοχή. Με βάση την ιδέα της πίεσης-κατάστασης-αντίδρασης, ([30],[31]) μια αποτελεσματική πολιτική αντιπροσωπεύει μια αντίδραση που είναι σε θέση να χαλαρώσει την πίεση και να βελτιώσει την κατάσταση. Ωστόσο, όταν ερχόμαστε στην αντιμετώπιση περίπλοκων διασυνδέσεων μεταξύ των βασικών θεμάτων, π.χ. επενδύσεις στην αγορά υπό αβεβαιότητα, ο σκελετός αξιολόγησης της πολιτικής που χρησιμοποιείται πρέπει να παρέχει ένα ευέλικτο πλαίσιο στο οποίο η ανάλυση βοηθά στην κατανόηση τέτοιων πολυπλοκοτήτων και στην ανάδραση μεταξύ των αιτιών και των αποτελεσμάτων της ανασφάλειας στον τομέα της αγοράς.

Η σύγχρονη θεωρία των επενδύσεων ([32],[33],[34]) υποδεικνύει ότι οι ιδιωτικές επενδύσεις και οι αποφάσεις σχετικά με το R&D εξαρτώνται από την αντίληψη της εξέλιξης της αβεβαιότητας όσον αφορά το κόστος, τις τιμές και τις ρυθμιστικές παρεμβάσεις, καθώς και από την διάθρωση της αγοράς. Με άλλα λόγια, οι επενδύσεις οδηγούνται από τις αναμενόμενες αποδόσεις, οι οποίες αξιολογούνται από το πρίσμα

διαφόρων κινδύνων που συνδέονται με τις δαπάνες και τα έσοδα. Επιπλέον, οι επενδύσεις κινούνται από τις στρατηγικές εκτιμήσεις, π.χ. διαχείριση χαρτοφυλακίου για αντιστάθμιση του κινδύνου, επενδύσεις για αποκάλυψη πληροφοριών ή καθυστέρηση επενδύσεων για τη συγκέντρωση περαιτέρω πληροφοριών [34].

Σύμφωνα με την παραπάνω οπτική, οι προσεγγίσεις μοντελοποίησης ελαχιστοποίησης κόστους / μεγιστοποίησης κοινωνικής ευημερίας μας λένε περισσότερα για το τι πρέπει να γίνει παρά για το τι αναμένεται να γίνει όταν διαφορετικές πολιτικές τίθενται σε ισχύ. Αυτή η διαφοροποίηση των αποτελεσμάτων προέρχεται από δύο σημαντικές πτυχές της συμπεριφοράς των επιχειρήσεων κατά την αξιολόγηση μιας μελλοντικής επένδυσης:

1. Απροθυμία ανάληψης κινδύνου. Οι επιχειρήσεις στοχεύουν στον έλεγχο των πιστωτικών κινδύνων τους. Σαν αποτέλεσμα, η αποτίμηση των επενδύσεων μπορεί να θεωρηθεί σαν ένα πρόβλημα μεγιστοποίησης κέρδους υπό αβεβαιότητα με περιορισμούς σχετικά με τον κίνδυνο. Η αποστροφή προς τον κίνδυνο μπορεί να μειώσει την αξία εισόδου στην αγορά ή την υιοθέτηση μιας συγκεκριμένης τεχνολογίας. Ωστόσο, μπορεί επίσης να οδηγήσει στο να προτιμώνται ορισμένες επενδύσεις, λόγω της αντιστάθμισης στην αβεβαιότητα των ταμειακών ροών που παρέχουν, ακόμα και αν μια τυποποιημένη προσέγγιση σταθερού κόστους πρότεινε κάτι διαφορετικό.
2. Ελάχιστη δέσμευση. Υπό συνθήκες αβεβαιότητας της αγοράς και των ρυθμίσεων, μια επιχείρηση μπορεί να αναβάλει μια επένδυση περιμένοντας να συσσωρεύσει περισσότερες πληροφορίες, ή να αποκαλυφθεί (εν μέρει) η αβεβαιότητα. Είναι καλά τεκμηριωμένο ότι οι επιχειρήσεις δεν επενδύουν μέχρι οι τιμές πώλησης να αυξηθούν σημαντικά πάνω από το μακροπρόθεσμο μέσο κόστος [35]. Υπό αυτή την οπτική, και ανάλογα με την τρέχουσα κατάσταση της αγοράς, ορισμένα όργανα πολιτικής μπορεί να αποτελέσουν εμπόδιο για νέες επενδύσεις, όταν οι επενδυτές έχουν την τάση να καθυστερήσουν την επένδυση ή να αποτελέσουν κίνητρο για επένδυση όταν οι επενδυτές έχουν την τάση να επενδύσουν νωρίτερα από τους ανταγωνιστές τους.

Αυτή η παρατήρηση έχει οδηγήσει σε ορισμένες περιπτώσεις έρευνας που χρησιμοποιούν τη μέθοδο μοντελοποίησης των Real Options, για την αξιολόγηση των

επενδύσεων σε διαφορετικές τεχνολογίες παραγωγής ενέργειας από τη σκοπιά των ιδιωτικών επιχειρήσεων. Ενδεικτικά, οι Frayer & Uludere (2001) [36] αναφέρουν ότι το λειτουργικό κέρδος μιας ευέλικτης μονάδας παραγωγής ορίζεται ως μια σειρά από ωριαία call options. Μια προσαρμοσμένη Black-Scholes φόρμουλα χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της αξίας αυτών των call options και, κατά συνέπεια, της αξίας της μονάδας. Η μοναδική αβέβαιη παράμετρος είναι το spark-spread, δηλαδή η διαφορά μεταξύ της τιμής του καυσίμου που απαιτείται για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και της τιμής στην οποία πωλείται η ηλεκτρική ενέργεια στην χονδρική αγορά ηλεκτρικής ενέργειας. Οι Gardner και Zhuang (2000) [37], παρουσίασαν μια προσέγγιση δυναμικού προγραμματισμού, όπου τα λειτουργικά έξοδα και οι λειτουργικοί περιορισμοί (minimum up, down και start-up times) περιλαμβάνονται στο μοντέλο αποτίμησης. Και πάλι, η μόνη αβέβαιη παράμετρος είναι το spark-spread.

Προκειμένου να μοντελοποιήσουμε με συνεκτικό τρόπο τη σχέση μεταξύ της ζήτησης, της συνολικής εγκατεστημένης δυναμικότητας παραγωγής, του λειτουργικού κόστους και της τιμής στην οποία μπορεί ένα utility να πουλήσει την παραγωγή του, συμπεριλαμβανομένης της επίπτωσης που ενδέχεται να έχει η ίδια η επένδυση του στην τιμή, χρησιμοποιούνται θεμελιώδη μοντέλα, που κυμαίνονται από απλές καμπύλες τιμής-διάρκειας μέχρι μοντέλα μερικής ισορροπίας (partial equilibrium – PE). Ειδικότερα, ο Botterud (2003) [38] παρουσιάζει ένα στοχαστικό δυναμικό μοντέλο βελτιστοποίησης για την αξιολόγηση επενδύσεων σε νέες μονάδες ηλεκτροπαραγωγής φυσικού αερίου στη Νορβηγία. Το μοντέλο του είναι σε θέση να ενσωματώσει διάφορες πηγές αβεβαιότητας, καθώς και επενδύσεις από ανταγωνιστές μέσω ενός προκαθορισμένου επιπέδου τιμών που λειτουργεί ως έναυσμα εισόδου στην αγορά. Ένα απλό θεμελιώδες μοντέλο της αγοράς χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό των τιμών ηλεκτρικής ενέργειας για κάθε ζεύγος τιμών ζήτησης και τιμών καυσίμων. Οι Stine και Meibom (2008) [39] αναφέρουν ότι τα σενάρια των τιμών ηλεκτρικής ενέργειας παράγονται από ένα μοντέλο μερικής ισορροπίας του Σκανδιναβικού συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας και, στη συνέχεια, σε συνδυασμό με ένα μοντέλο δένδρου αποφάσεων των επενδυτικών αποφάσεων. Τέλος, ένα πολύ-παραγοντικό ολοκληρωμένο δυναμικό μοντέλο αξιολόγησης, που αποτελείται από ένα μη γραμμικό impulse response μοντέλο και ένα κοινωνικό-οικονομικό μοντέλο

([40]), δίνει έμφαση στην ενδογενή τεχνολογική αλλαγή ως κυρίαρχη διαδικασία που διέπει την οικονομική ανάπτυξη, η οποία αντιμετωπίζεται ως συνώνυμη με την αύξηση του ανθρώπινου κεφαλαίου και της παραγωγικότητας της εργασίας.

Ένα σημαντικό κομμάτι της βιβλιογραφίας περιλαμβάνει τις περιπτώσεις όπου η Real Option προσέγγιση χρησιμοποιήθηκε για την εκτίμηση της επιρροής μιας πολιτικής – συνήθως με τη μορφή μιας, λόγω της πολιτικής, αβεβαιότητας – στην αξιολόγηση των επενδύσεων σε μια αγορά ηλεκτρικής ενέργειας. Ένα αντιπροσωπευτικό παράδειγμα είναι η μελέτη των Blyth et al. (2007) [41], όπου η επίδραση της αβεβαιότητας για το μελλοντικό ανώτατο όριο CO₂ και οι τιμές για επενδύσεις σε δυναμικότητα παραγωγής ορυκτών καυσίμων αξιολογούνται. Επιπλέον, ο Botterud (2003) [38] εξετάζει την επίδραση στις επενδύσεις στην παραγωγή από την εισαγωγή μιας πληρωμής δυναμικότητας ως ένα μέτρο επάρκειας δυναμικότητας.

Υφίστανται ορισμένοι περιορισμοί σχετικά με την εφαρμογή των Real Options μοντέλων, όπως φαίνεται και στην βιβλιογραφία ([33],[42],[43],[44],[45]). Συγκεκριμένα, τα Real Options μοντέλα προσεγγίζουν την αβεβαιότητα σαν μια στοχαστική εξέλιξη – συνήθως random walk – γύρω από μια προκαθορισμένη τάση. Ωστόσο, οι μακροοικονομικές εξελίξεις επηρεάζουν και την τάση των στοχαστικών παραμέτρων, όπως η ζήτηση για ενέργεια, οι τιμές των αδειών εκπομπών CO₂ και οι τιμές των καυσίμων [46]. Συνεπώς, σε αντίθεση με την Real Options προσέγγιση μοντελοποίησης της αβεβαιότητας, η τάση είναι επίσης αβέβαιη. Αυτό είναι ακόμα πιο σημαντικό αν λάβει κανείς υπόψη την εντελώς άγνωστη εξέλιξη της εμφανιζόμενης για πρώτη φορά κρίσης χρέους στην ΕΕ και το φάσμα των πιθανών επιπτώσεων στην οικονομική ανάπτυξη των κρατών μελών.

Επιπλέον, πρέπει κανείς να θυμάται ότι η Real Option προσέγγιση έχει δανειστεί ένα μεγάλο αριθμό εννοιών και εργαλείων από την financial option προσέγγιση, αλλά όχι μία από τις πιο σημαντικές πτυχές της σύγχρονης επιλογής εμπορίας: η αβεβαιότητα χαρακτηρίζεται από “fat tails”, όπου τα fat tails είναι εγγενώς απρόβλεπτα τόσο στο χρόνο όσο και στο μέγεθος τους [47]. Ο Didier Sornette (2003) [48] εξέτασε το φαινόμενο των fat tails σε ακραίες συμπεριφορές κοινές στις αγορές συναλλάγματος, χρυσού και στα χρηματιστήρια. Αν και, θα μπορούσε κανείς να υποστηρίξει ότι οι αγορές καυσίμων και άνθρακα είναι διαφορετικές από τις αντίστοιχες οικονομικές, η

έκθεση “*Price Formation in financialized commodity markets: The role of information*”, Study prepared by the secretariat of the United Nations Conference on Trade and Development, 2011 για τις τιμές βασικών εμπορευμάτων μαρτυρά ότι η αύξηση της συμμετοχής των οικονομικών φορέων σε αυτές τις αγορές, μετακινεί τις τιμές μακριά από τα επίπεδα που δικαιολογούνται από τις βασικές αρχές για μεγάλα χρονικά διαστήματα, οδηγώντας σε αυξανόμενο κίνδυνο όσον αφορά τις τιμές.

Η ιδέα της Random Walk υπόθεσης (RWH) ότι “η διακύμανση αυξάνεται ως συνάρτηση της τετραγωνικής ρίζας του χρόνου” [49], προσφέρει ελάχιστες επιπλέον πληροφορίες σε μια διαδικασία εκτίμησης της επένδυσης και, επίσης, οδηγεί σε μία ψευδή αίσθηση λογιστικής αβεβαιότητας. Στην πράξη, όταν κάποιος πραγματοποιεί μια ανάλυση αβεβαιότητας, η αστάθεια αντανακλά την μέγιστη απόκλιση από τις ονομαστικές τιμές που η παραγόμενη βέλτιστη στρατηγική μπορεί να χειριστεί. Όσο μεγαλύτερο είναι το εύρος, τόσο πιο συντηρητική είναι η στρατηγική. Υπό αυτή την οπτική, η αστάθεια είναι ένα στρατηγικό trade-off σχέδιο που επιλύεται μόνο από αυτόν που παίρνει τις αποφάσεις, και ως εκ τούτου, αποτελεί μέρος του ορισμού του σεναρίου.

Κατά συνέπεια, μια πολύ πιο πρακτική προσέγγιση είναι να υποθέσουμε ότι υπάρχουν μόνο δύο περιοχές για τα μελλοντικά αποτελέσματα: μία που βρίσκεται μέσα σε ένα περιβάλλον τοποθετημένο γύρω από την τάση του σεναρίου και μία άλλη που βρίσκεται απ’ έξω. Η τελευταία λαμβάνεται υπόψη μόνο όταν μια στρατηγική αντιστάθμισης βασισμένη σε απόλυτες μέσες αποκλίσεις ενσωματωθεί στη διαδικασία αξιολόγησης που στοχεύει να καθορίσει ένα όριο για τα πιθανά κέρδη/ζημίες. Σε γενικές γραμμές, αυτό δεν ισχύει για τις αποφάσεις εκτίμησης μιας επένδυσης, όπου, μετά από μια δέσμευση για μια επένδυση, η αντιστάθμιση της αβεβαιότητας γίνεται στο επιχειρησιακό παρά στο στρατηγικό επίπεδο.

Θέτοντας τους περιορισμούς στην άκρη, το μεγάλο πλεονέκτημα της Real Options προσέγγισης είναι ότι οδηγεί στον εντοπισμό των κανόνων απόφασης που λαμβάνουν υπόψη όλες τις πιθανές μελλοντικές υλοποιήσεις, καθώς και τις πιθανότητες εμφάνισής τους. Σε αυτό το σημείο, πρέπει να σημειωθεί ότι τα Real Options μοντέλα μπορούν να εκτιμήσουν την ορθότητα των παρεχόμενων κινήτρων έτσι ώστε να γίνονται δεσμεύσεις για νέες ή/και πιο βιώσιμες τεχνολογίες. Οι ανωτέρω περιορισμοί

αυτής της προσέγγισης είναι σημαντικοί δεδομένου ότι η αξιολόγηση της πολιτικής προϋποθέτει την αξιολόγηση των συνολικών αποφάσεων και τα αποτελέσματά τους. Οι στρατηγικές που υιοθετήθηκαν από μεμονωμένους φορείς πρέπει να συσσωρευτούν, εάν η αναμενόμενη μελλοντική πορεία των επενδύσεων πρέπει να εκτιμηθεί, καθώς και να μελετήσουν την επίδραση νέων δράσεων που εισάγονται στην αγορά με την πάροδο του χρόνου. Η συγκέντρωση αυτή θα αποκαλύψει τους κύκλους υπερεπένδυσης ή έλλειψης επενδύσεων. Θα υποστηρίξει την αξιολόγηση της αξιοπιστίας ορισμένων R&D σεναρίων, θα αξιολογήσει κατά πόσον η αγορά είναι πιθανό να γίνει περισσότερο ή λιγότερο ανταγωνιστική, καθώς και θα βοηθήσει στο σχεδιασμό πολιτικών που χαρακτηρίζονται από μεγαλύτερη δυναμική αποτελεσματικότητα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΟΡΘΟΛΟΓΙΣΤΙΚΕΣ ΠΡΟΣΔΟΚΙΕΣ ΚΑΙ ΜΑΘΗΣΗ

Σε πολλές περιπτώσεις, ένας πράκτορας πρέπει να εξετάσει την μελλοντική του κατάσταση, καθώς και το οικονομικό περιβάλλον στο μέλλον όταν καλείται να πάρει οικονομικές αποφάσεις. Οι προσδοκίες (expectations) έχουν παίξει μείζονα ρόλο στην οικονομική σκέψη από την αρχή. Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζεται η αναγκαιότητα δημιουργίας προσδοκιών από έναν πράκτορα (agent) ώστε να λάβει επενδυτικές αποφάσεις. Ακολουθεί μία ιστορική αναδρομή σχετικά με την εξέλιξη της θεωρίας των προσδοκιών και στην συνέχεια παρουσιάζεται η βασική ιδέα των rational expectations. Στην ενότητα 4.4 γίνεται εισαγωγή στην adaptive learning προσέγγιση όσον αφορά το σχεδιασμό μοντέλων προσδοκιών, η οποία εισάγει ένα είδος “φραγμένου ορθολογισμού” και παρουσιάζονται δύο μέθοδοι μάθησης με χρήση αναδρομικών ελαχίστων τετραγώνων.

4.1 Η αναγκαιότητα δημιουργίας προσδοκιών

Η απελευθέρωση του τομέα της ηλεκτρικής ενέργειας οδήγησε στην εξάρτηση των αποφάσεων σχετικά με την κατασκευή νέων μονάδων παραγωγής, ιδίως όσον αφορά τη χρονική στιγμή της επένδυσης και το μίγμα τεχνολογιών που πρέπει να χρησιμοποιηθεί, από τις προσδοκίες των επενδυτών σχετικά με την εξέλιξη όσον αφορά το κόστος, τις τιμές και τις ρυθμιστικές παρεμβάσεις. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα η πολιτική να μην μπορεί να επηρεάσει άμεσα την εξέλιξη του τομέα, αλλά μόνο μέσω ενός ενδιάμεσου στρώματος αντιλήψεων των ιδιωτών επενδυτών. Ένα στρώμα το οποίο σε γενικές γραμμές δεν είναι πλήρως παρατηρήσιμο και είναι μερικώς ελεγχόμενο.

Η σύγχρονη οικονομική θεωρία αναγνωρίζει ότι η βασική διαφορά ανάμεσα στις οικονομικές και φυσικές επιστήμες έγκειται στο ότι οι αποφάσεις που παίρνουν οι οικονομικοί παράγοντες είναι προσανατολισμένες στο μέλλον. Σε κάθε τομέα της οικονομίας οι προσδοκίες παίζουν μείζονα ρόλο. Στις επενδυτικές αποφάσεις ο υπολογισμός της παρούσας αξίας εξαρτάται από τις αναμενόμενες μελλοντικές τιμές

και πωλήσεις. Οι τιμές των στοιχείων ενεργητικού (τιμές μετοχών, επιτοκίων και συναλλαγματικών ισοτιμιών) εξαρτώνται ξεκάθαρα από τις μελλοντικές τιμές.

Σε αντίθεση με την παραδοχή ότι οι παράμετροι της στοχαστικής διαδικασίας που περιγράφει το μέλλον δεν επηρεάζονται από τις αποφάσεις των άλλων συμμετεχόντων στην αγορά και θεωρούνται ως ακριβείς από όλους αυτούς, η αναστοχαστικότητα είναι κυρίαρχο φαινόμενο, σύμφωνα με το οποίο οι απόψεις και υποθέσεις των συμμετεχόντων σχετικά με την μελλοντική εξέλιξη της αγοράς επηρεάζουν την πραγματική της εξέλιξη. Σύμφωνα με μία βασική άποψη, οι προσδοκίες επηρεάζουν την πορεία της οικονομίας στο χρόνο, και θα μπορούσε κάποιος εύλογα να υποθέσει ότι η πορεία της οικονομίας στο χρόνο επηρεάζει τις προσδοκίες. Ως εκ τούτου, μια θεωρία μεμονωμένων προσδοκιών ή πεποιθήσεων της αγοράς αποτελεί σημαντικό τμήμα της μοντελοποίησης της πιθανής εξέλιξης μιας συγκεκριμένης αγοράς, όπως είναι η αγορά ηλεκτρικής ενέργειας. Η αγορά είναι ένα σύστημα ανατροφοδότησης προσδοκιών και εξαρτάται σε πολύ μεγάλο βαθμό από την υπόθεση που έχουμε κάνει όσον αφορά τις προσδοκίες του συστήματος. Σε αυτό το σημείο δημιουργείται εύλογα το ερώτημα, πως μπορεί κάποιος να μοντελοποιήσει μονάδες που μαθαίνουν από το παρελθόν και προσαρμόζουν την συμπεριφορά τους, καθώς με την πάροδο του χρόνου γίνονται γνωστά όλο και περισσότερα πραγματικά στοιχεία όσον αφορά την αγορά;

4.2 Ιστορική αναδρομή

Σε πολλές περιπτώσεις, ένας πράκτορας πρέπει να εξετάσει την μελλοντική του κατάσταση, καθώς και το οικονομικό περιβάλλον στο μέλλον όταν καλείται να πάρει οικονομικές αποφάσεις. Οι προσδοκίες έχουν παίξει μείζονα ρόλο στην οικονομική σκέψη από την αρχή. Ωστόσο, σε στατικά ή συγκριτικά στατικά μοντέλα δεν υπάρχει ανάγκη για την διαμόρφωση προσδοκιών, έτσι αντί των μεταβλητών για αναμενόμενες τιμές συνήθως χρησιμοποιούνται τα πραγματικά τους αποτελέσματα. Συνεπώς, με την έλευση των δυναμικών οικονομικών μοντέλων, οι προσδοκίες έλαβαν περισσότερη προσοχή και συμπεριλήφθηκαν και επίσημα σε μοντέλα.

Ο ευκολότερος τρόπος να χειριστούμε τις προσδοκίες είναι να τις θεωρήσουμε ως στατικές. Σε αυτή την περίπτωση η τιμή της μεταβλητής που αναμένεται για την επόμενη περίοδο είναι ίδια με την πραγματική τιμή της την τρέχουσα περίοδο:

$$E_t x_{t+1} = x_t \quad (1)$$

Με αυτό τον τρόπο η τελευταία χρονικά διαθέσιμη πληροφορία για την τιμή που επιθυμούμε να προβλέψουμε παίζει το μοναδικό ρόλο στην διαδικασία πρόβλεψης μας, και γι αυτό το λόγο η συγκεκριμένη μέθοδος χαρακτηρίζεται ως “αφελής” (Naive or static expectations).

Τη δεκαετία του 1950, οι προσδοκίες εισήχθησαν σε όλους σχεδόν τους τομείς της μακροοικονομίας, συμπεριλαμβανομένης της κατανάλωσης, των επενδύσεων, της ζήτησης του χρήματος και του πληθωρισμού. Μια συχνά εναλλακτική λύση είναι οι adaptive expectations, που λαμβάνουν την μορφή:

$$E_t x_{t+1} = E_{t-1} x_t + \lambda(x_t - E_{t-1} x_t) \quad (2) \quad \text{όπου } 0 < \lambda < 1$$

Εδώ, οι πράκτορες ενημερώνουν τις προσδοκίες τους με το σφάλμα από την τελευταία πρόβλεψη που έκαναν, αλλά μόνο σε κάποιον βαθμό που προσδιορίζεται από το λ . Η έννοια των adaptive expectations αναφέρθηκε για πρώτη φορά από τον Fisher (1930), αλλά έγινε πιο δημοφιλής από τον Phillip Cagan (1956) [50]. Με το $\lambda < 1$, αυτή η προσέγγιση εξομαλύνει τις προσδοκίες κάθε φορά που αλλάζουν οι πραγματικές τιμές, συμβάλλοντας έτσι στην σταθερότητα του μοντέλου. Όμως οι adaptive expectations δεν αντιπροσωπεύουν απαραίτητα έναν μεγαλύτερο βαθμό μάθησης από τον οικονομικό πράκτορα σε σχέση με τις στατικές προσδοκίες. Στην πραγματικότητα όσο μεγαλύτερο είναι το λ , τόσο περισσότερο ο πράκτορας αναθεωρεί τις προηγούμενες προσδοκίες του υπό το φως των νέων πληροφοριών. Έτσι, θα μπορούσε να υποστηρίξει κανείς ότι ο υψηλότερος βαθμός μάθησης εμφανίζεται όταν $\lambda \rightarrow 1$, η οποία είναι η περίπτωση των στατικών προσδοκιών.

Παρά το γεγονός ότι και στις δύο προσεγγίσεις που παρουσιάζονται παραπάνω οι πράκτορες μαθαίνουν έως έναν ορισμένο βαθμό από τα σφάλματα στις προηγούμενες προσδοκίες τους, αυτός ο αλγόριθμος εκμάθησης είναι μάλλον αργός και μπορεί να οδηγήσει σε πολλές περιπτώσεις σε συστηματικά λανθασμένες προσδοκίες. Αυτό

έρχεται σε αντίθεση με την έννοια της ορθολογικής συμπεριφοράς: ένας ορθολογικός πράκτορας θα αναγνωρίσει ότι σχημάτισε επανειλημμένως λάθος προσδοκίες και θα προσπαθήσει να προσαρμόσει τον αλγόριθμο του αναλόγως. Επιπλέον, όταν το κάνει αυτό θα προσπαθήσει να χρησιμοποιήσει όλες τις διαθέσιμες πληροφορίες, συμπεριλαμβανομένων των γνώσεων σχετικά με την οικονομική θεωρία και την στατιστική. Αυτή είναι η βασική ιδέα πίσω από τις rational expectations (ορθολογικές προσδοκίες), η οποία αποδίδεται στον Muth(1961) [51].

4.3 Η βασική ιδέα των Rational Expectations

Η έννοια των rational expectations είναι βασισμένη στην υπόθεση ότι μακροπρόθεσμα οι ορθολογικοί πράκτορες δεν θα διαμορφώσουν προσδοκίες οι οποίες είναι συστηματικά λάθος. Με τον όρο “συστηματικά λάθος” εννοούμε ότι τα σφάλματα των προσδοκιών θα σχετίζονται με συστηματικό τρόπο με παρατηρήσιμες επιρροές, όπως εξωγενείς μεταβλητές ή ενδογενείς μεταβλητές με χρονική υστέρηση. Η ύπαρξη των rational expectations δικαιολογείται από την παραδοχή ότι οι πράκτορες ανταγωνίζονται μεταξύ τους. Αν οι προσδοκίες παρουσιάζουν σφάλματα τα οποία μπορούν να εξηγηθούν από παρατηρήσιμες επιρροές, μερικοί πράκτορες μπορούν να χρησιμοποιήσουν αυτή την πληροφορία για να βελτιώσουν τις προσδοκίες τους και με αυτό τον τρόπο να επιτύχουν ένα πλεονέκτημα σε σχέση με τους ανταγωνιστές τους. Σε βάθος χρόνου αυτή η διαδικασία επιλογής θα οδηγήσει στην εξάλειψη όλων των κατώτερων προσδοκιών, αφήνοντας μόνο όσο το δυνατόν πιο ορθολογικές προσδοκίες.

Στο δημιουργικό του άρθρο, ο Muth (1961 ,p.316) [51] περιγράφει την ιδέα των rational expectations (με το παράδειγμα των προσδοκιών των επιχειρήσεων) ως εξής:

“...οι προσδοκίες των επιχειρήσεων (ή, γενικότερα, η υποκείμενη κατανομή πιθανότητας των αποτελεσμάτων) τείνουν να είναι κατανεμημένες, για το ίδιο σύνολο πληροφοριών, σχετικά με την πρόβλεψη της θεωρίας (ή την “αντικειμενική” κατανομή πιθανότητας των αποτελεσμάτων).”

Ο Muth τονίζει ότι αυτό δεν σημαίνει απαραίτητα ότι οι προσδοκίες πρέπει να είναι πανομοιότυπες για όλες τις επιχειρήσεις, ούτε ότι οι επιχειρήσεις χρησιμοποιούν το

“σωστο” ή αντικειμενικό μοντέλο για να διαμορφώσουν τις προσδοκίες τους. Ωστόσο, για λόγους απλότητας, οι ορθολογικές προσδοκίες συχνά μοντελοποιούνται ως ομογενείς και με βάση το αντικειμενικό μοντέλο. Αυτό έχει γίνει συνήθης πρακτική με αποτέλεσμα σήμερα, ο όρος “Rational Expectation” να σημαίνει συνήθως πράγματι ότι οι προσδοκίες των πρακτόρων είναι βασισμένες στο αντικειμενικό μοντέλο.

Ο Sargent (1993) [52], δίνει έναν εναλλακτικό τρόπο χαρακτηρισμού των rational expectations. Σε αυτή την άποψη, οι ορθολογικές προσδοκίες είναι μία έννοια ισορροπίας η οποία χαρακτηρίζεται από α) μία ορθολογική επιλογή (π.χ. τη μεγιστοποίηση μιας αντικειμενικής συνάρτησης) από πράκτορες που υπόκεινται σε αντιληπτούς περιορισμούς και β) αμοιβαία συνοχή όλων των αντιληπτών περιορισμών στο σύστημα. Με άλλα λόγια, ο χαρακτηρισμός αυτός μπορεί να περιγραφεί ως εξής: α) Κάθε πράκτορας διαμορφώνει πεποιθήσεις για τον κόσμο στον οποίο ζει, και στη συνέχεια παίρνει ορθολογικές αποφάσεις με βάση αυτές τις πεποιθήσεις. β) Μία ισορροπία ορθολογικών προσδοκιών (rational expectations equilibrium) επιτυγχάνεται εάν όλες οι πεποιθήσεις είναι συμβατές μεταξύ τους, συμπεριλαμβανομένων των πεποιθήσεων σχετικά με τις πεποιθήσεις των άλλων (πεποιθήσεις υψηλότερης τάξης), έτσι ώστε οι παρατηρήσιμες πληροφορίες που παράγονται από το μοντέλο να μην έρχονται σε αντίθεση με τις πεποιθήσεις των πρακτόρων.

Σε αυτό το σημείο κρίνεται απαραίτητο να εξετάσουμε πιο προσεκτικά το ρόλο των rational expectations σε ένα δυναμικό μοντέλο προκειμένου να καθοριστεί η ισορροπία (rational expectations equilibrium). Οι προσδοκίες σε ένα δυναμικό μοντέλο έχουν αντίκτυπο στην κατάσταση της υπό παρατήρηση οικονομίας. Αν κάποιος ορίσει τις προσδοκίες στο μοντέλο ως ορθολογικές με τον ορισμό του Muth, θα πρέπει οι προσδοκίες να μην διαφέρουν συστηματικά από την προκύπτουσα κατάσταση της οικονομίας, ή ακριβέστερα: απαιτείται ότι οι πράκτορες δεν αντιλαμβάνονται καμία αντίφαση μεταξύ των προσδοκιών τους και της προκύπτουσας κατάστασης. Έτσι, το αποτέλεσμα υπό την επίδραση των προσδοκιών των πρακτόρων πρέπει να ταιριάζει με τις ίδιες τις προσδοκίες. Με τον τρόπο αυτό οι προσδοκίες είναι μέρος μιας αυτό-αναφορικής διαδικασίας.

Ένας πιθανός και άμεσος τρόπος για να ικανοποιήσει την προϋπόθεση ότι οι πράκτορες αντιλαμβάνονται την προκύπτουσα κατάσταση της οικονομίας ως δυσδιάκριτη από τις προσδοκίες τους, είναι ότι οι πράκτορες διαμορφώνουν τις προσδοκίες υπό προϋποθέσεις με βάση τις λειτουργίες και παραμέτρους του πραγματικού μοντέλου (συμπεριλαμβανομένων των λειτουργιών που διέπουν τον σχηματισμό των προσδοκιών). Αυτή η προσέγγιση οδηγεί σε μία ισορροπία στην προαναφερθείσα αυτό-αναφορική διαδικασία η οποία καλείται Rational Expectations Equilibrium (REE). Αυτή η προσέγγιση δεν είναι ο μόνος τρόπος για να ικανοποιηθεί η συνθήκη. Είναι επίσης πιθανό ότι οι πράκτορες χρησιμοποιούν ένα κακώς προσδιορισμένο μοντέλο για να σχηματίσουν τις προσδοκίες τους, αλλά ωστόσο, εντός του μοντέλου τους δεν μπορούν να διαπιστώσουν τυχόν ασυνέπειες μεταξύ των στοιχείων που προκύπτουν από το πραγματικό μοντέλο και από το κακώς προσδιορισμένο τους μοντέλο.[59]

4.3.1 Πολλαπλά σημεία ισορροπίας

Τα μοντέλα που χρησιμοποιούν rational expectations είναι συχνά πιθανό να έχουν πολλαπλά σημεία ισορροπίας (multiple REE). Για γραμμικά μοντέλα αυτό είναι πιθανό εφόσον οι τρέχουσες μεταβλητές του μοντέλου προσδιορίζονται από τις προσδοκίες των μελλοντικών τους τιμών. Η ύπαρξη πολλών (ή ακόμα και άπειρων) λύσεων σε ορισμένα μοντέλα έχει θεωρηθεί από μερικούς ως αδυναμία της υπόθεσης των rational expectations. Αλλά μπορεί να αποδειχθεί ότι η ύπαρξη πολλαπλών λύσεων είναι ένα κοινό χαρακτηριστικό των δυναμικών μοντέλων και δεν οφείλεται σε εφαρμογή των rational expectations. Με την ύπαρξη πολλαπλών λύσεων εγείρεται το ερώτημα σε ποια/ποιες λύση/λύσεις θα πρέπει να εστιάσουμε, και αν κάποιες λύσεις μπορούν να αποκλειστούν.

Πολλά κριτήρια έχουν προταθεί για να επιλεγθούν οικονομικά σχετικές λύσεις από ένα σύνολο πιθανών λύσεων. Ο Taylor(1977) [53] πρότεινε να επικεντρωθούμε στη λύση στην οποία η μεταβλητή που μας ενδιαφέρει παρουσιάζει την ελάχιστη χωρίς όρους διακύμανση (minimum-variance criterion). Όμως αυτό το κριτήριο δεν οδηγεί πάντα σε μοναδική λύση. Είναι πιθανό να υπάρχει πλήθος μεταβλητών που μας ενδιαφέρουν, κάθε μία από τις οποίες να παρουσιάζει ελάχιστη διακύμανση σε διαφορετικές λύσεις. Ένα άλλο κριτήριο είναι το ευρέως χρησιμοποιούμενο κριτήριο

της σταθερότητας (stability criterion) των Blanchard και Kahn (1980) [54]. Αρχικά, η διαδικασία που περιγράφεται εκεί δεν προοριζόταν για κριτήριο επιλογής μεταξύ διαφόρων λύσεων. Επί της ουσίας αποτελεί έναν αλγόριθμο επίλυσης για γραμμικά rational expectations μοντέλα, ο οποίος αποδίδει επίσης τις συνθήκες για ύπαρξη και μοναδικότητα της λύσης. Κατά την κατασκευή του αλγόριθμου απαιτείται ότι οι προσδοκίες δεν ακολουθούν εκθετική πορεία, γι αυτό πρέπει αποκλειστούν οι εκθετικές λύσεις προτού εφαρμοστεί ο αλγόριθμος στο μοντέλο. Ωστόσο, σε μία οικονομική ανάλυση συχνά μας ενδιαφέρει να καθορίσουμε τους όρους υπό τους οποίους οι λύσεις γίνονται εκθετικές. Συνεπώς η διαδικασία αυτή δεν είναι κατάλληλη ως κριτήριο επιλογής. Επιπλέον, υπάρχουν μοντέλα με πολλαπλές σταθερές λύσεις, και σε αυτή την περίπτωση το κριτήριο δεν είναι ικανό να επιλέξει μία από αυτές.

Σαν εναλλακτική ο McCallum (1999) προτείνει το κριτήριο ελαχίστων μεταβλητών κατάστασης (minimal state variable - MSV). Το κριτήριο αυτό αποτελείται από διάφορες συνθήκες. Πρώτον, μία MSV λύση για ένα γραμμικό μοντέλο είναι μια γραμμική συνάρτηση για όχι περισσότερες από ένα “ελάχιστο” σύνολο μεταβλητών κατάστασης, δηλαδή εξωγενείς ή προκαθορισμένες μεταβλητές που (άμεσα) καθορίζουν ενδογενείς μεταβλητές. Το “ελάχιστο” εδώ σημαίνει σύμφωνα με τον McCallum (1983), p. 145, [55]

“...είναι πιθανό να διαγράψουμε... κάθε απλή μεταβλητή, ή μία ομάδα μεταβλητών, ενώ θα συνεχίζουμε να λαμβάνουμε λύσεις έγκυρες για όλες τις μεταβλητές παραμέτρους εισόδου.”

Μπορεί ακόμα να υπάρχουν περισσότερες από μία λύσεις που να ικανοποιούν αυτή την κατάσταση, μία δεύτερη προϋπόθεση είναι ότι η MSV λύση εξακολουθεί να βασίζεται σε ένα ελάχιστο σύνολο μεταβλητών κατάστασης για όλες τις ειδικές περιπτώσεις των τιμών των παραμέτρων του μοντέλου. Αυτό ειδικότερα σημαίνει ότι αν μια ορισμένη τιμή παραμέτρου (π.χ. το μηδέν) στο μοντέλο έχει το αποτέλεσμα ότι η μεταβλητή κατάστασης που σχετίζεται με τη τιμή αυτή δε επιδρά στις ενδογενείς μεταβλητές πλέον, τότε αυτή η μεταβλητή κατάστασης πρέπει επίσης να εξαφανιστεί από την MSV λύση για αυτή την ειδική τιμή της παραμέτρου. Έτσι, η δεύτερη αυτή

συνθήκη αφήνει μία μοναδική λύση, η οποία εξ ορισμού είναι η θεμελιώδης λύση.[59]

Η προσέγγιση των rational expectations έχει σημαντικά πλεονεκτήματα: είναι απλή και κομψή μαθηματικά. Ωστόσο, δεν είναι ρεαλιστικό να υποθέτουμε τέλεια γνώση για την οικονομία, και ακόμα και αν αυτή η γνώση ήταν γνωστή, απαιτούνται εξαιρετικά ισχυρές δυνατότητες υπολογισμού από τους πράκτορες για τον υπολογισμό της ισορροπίας. Το πιο σημαντικό είναι, ότι τα RE μοντέλα έρχονται σε αντίθεση με τις εμπειρικές παρατηρήσεις και τη συμπεριφορά σε εργαστηριακά πειράματα με ανθρώπινα υποκείμενα.

4.4 Μάθηση (learning)

4.4.1 Η μάθηση ως μια δυναμική προσέγγιση σχηματισμού προσδοκιών

Ένα σημαντικό σημείο κριτικής σχετικά με τη υπόθεση των rational expectations είναι ότι συνεπάγεται ότι οι πράκτορες χρησιμοποιούν τη δομή και τις παραμέτρους του πραγματικού μοντέλου για να σχηματίσουν τις προσδοκίες τους. Επομένως, οι πράκτορες γνωρίζουν πολύ περισσότερα για την οικονομία στην οποία ζουν από ότι οι οικονομολόγοι οι οποίοι κατασκεύασαν το μοντέλο. Αυτό δεν αποτελεί ρεαλιστική περιγραφή του πως διαμορφώνονται οι προσδοκίες στον πραγματικό κόσμο, και έχει επικριθεί από πολλούς οικονομολόγους. Για να μπορέσουν οι πράκτορες σε ένα μοντέλο να είναι σε ίση βάση με τους οικονομολόγους εισήχθη η έννοια του φραγμένου ορθολογισμού (bounded rationality). Η έννοια αυτή απαιτεί την προσθήκη θεμελίων συμπεριφοράς των προσδοκιών σε ένα μοντέλο. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί αν θεωρήσουμε ότι οι πράκτορες δρουν σαν οικονομολόγοι: μπορεί να μην γνωρίζουν το πραγματικό μοντέλο, αλλά μπορούν να συμπεράνουν πληροφορίες για αυτό από την εμπειρία του παρελθόντος. Η αβεβαιότητα για το πραγματικό μοντέλο μπορεί να είναι διαφορετικού βαθμού.

Φαίνεται πιο φυσικό να υποθέσουμε ότι οι πράκτορες αντιμετωπίζουν τους ίδιους περιορισμούς στην γνώση για τις παραμέτρους του συστήματος. Αυτό υποδηλώνει ότι οι πράκτορες λειτουργούν περισσότερο σαν στατιστικολόγοι όταν κάνουν

πρόβλεψη για την μελλοντική κατάσταση του συστήματος. Αυτή η άποψη είναι το σημείο εκκίνησης για την adaptive learning προσέγγιση όσον αφορά το σχεδιασμό μοντέλων προσδοκιών, η οποία εισάγει ένα είδος “φραγμένου ορθολογισμού”.

Αυτή η άποψη ονομάζεται adaptive learning, καθώς οι πράκτορες προσαρμόζουν τους κανόνες πρόβλεψης τους καθώς νέα δεδομένα γίνονται διαθέσιμα με την πάροδο του χρόνου. Οι ορθολογικά φραγμένοι πράκτορες χρησιμοποιούν χρονοσειρές παρατηρήσεων για να σχηματίσουν προσδοκίες και να προσαρμόσουν την συμπεριφορά τους προσπαθώντας να μάθουν τις παραμέτρους του μοντέλου καθώς περισσότερες παρατηρήσεις γίνονται διαθέσιμες.

Όσον αφορά την ετερογένεια των προσδοκιών σύμφωνα με τον Muth (1961), το να επιτρέπονται διατμηματικές διαφορές στις προσδοκίες είναι ένα απλό θέμα, γιατί η συνολική τους επιρροή είναι αμελητέα, εφόσον η απόκλιση από την ορθολογική πρόβλεψη για μια μεμονωμένη επιχείρηση δεν συσχετίζεται σε μεγάλο βαθμό με εκείνη των άλλων. Τροποποιήσεις είναι απαραίτητες μόνο σε περίπτωση που η συσχέτιση των σφαλμάτων είναι μεγάλη και εξαρτάται συστηματικά από άλλες ερμηνεύσιμες μεταβλητές.

Αν οι πράκτορες εξάγουν πληροφορίες σχετικά με το μοντέλο από την εμπειρία του παρελθόντος, θα διαμορφώσουν προσδοκίες που δεν βασίζονται πλέον στο πραγματικό μοντέλο, αλλά στο αντιλαμβανόμενο από αυτούς μοντέλο. Οι προσδοκίες αυτές είναι λογικές μόνο αν οι πράκτορες επιτύχουν να κάνουν σωστή εκτίμηση των παραμέτρων του μοντέλου. Διαφορετικά, οι προσδοκίες δεν είναι πλέον λογικές, αλλά μπορούν ακόμα να είναι σε συμφωνία με την λογική των πρακτόρων υπό την έννοια ότι είναι πιθανό να σχηματίζουν καλύτερες προσδοκίες λόγω των διαθέσιμων πληροφοριών. Ένα δεύτερο χαρακτηριστικό των εν λόγω πρακτόρων είναι, ότι αναθεωρούν τα συμπεράσματά τους σχετικά με το μοντέλο όταν γίνονται διαθέσιμες νέες πληροφορίες, δηλαδή στην ουσία “μαθαίνουν”. Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι αυτό οδηγεί σε μία επιπλέον αναδρομή σε ένα δυναμικό μοντέλο: οι πράκτορες διαμορφώνουν προσδοκίες με βάση το μοντέλο που αντιλαμβάνονται, οι προσδοκίες τους επηρεάζουν τα αποτελέσματα του μοντέλου, τα οποία με τη σειρά τους είναι παρατηρήσιμα από τους πράκτορες και χρησιμοποιούνται για να αναθεωρήσουν τις αντιλήψεις τους για το μοντέλο. Με αυτό τον τρόπο η εκμάθηση παρέχει ένα τρόπο

να μοντελοποιηθεί ρητά η προαναφερθείσα αυτό-αναφορική διαδικασία οι ορθολογικές προσδοκίες της οποίας βρίσκονται σε ισορροπία. Με τη μάθηση, ο σχηματισμός των προσδοκιών δεν είναι πλέον στατικός αλλά εξελίσσεται σύμφωνα με μια δυναμική διαδικασία η οποία σταματά μόνο όταν οι προσδοκίες επιβεβαιωθούν από τα αποτελέσματα, δηλαδή επέλθει ισορροπία.

Ένας ολοένα και πιο συνηθισμένος τρόπος να εισάγουμε την έννοια του bounded rationality σε ένα μοντέλο, είναι μέσω της μάθησης με ελάχιστα τετράγωνα (least square learning) όσον αφορά τη διαδικασία λήψης των προσδοκιών. Σε αντίθεση με τα χρήση των rational expectations, το least square learning συνεπάγεται ότι ο πράκτορας στο εσωτερικό του μοντέλου πρέπει να χρησιμοποιήσει δεδομένα που παράγονται από το μοντέλο για να κάνει προβλέψεις ελαχίστων τετραγώνων για τις προσδοκίμες μεταβλητές, και αυτές οι προβλέψεις ενημερώνονται κάθε περίοδο καθώς ένα νέο κομμάτι δεδομένων γίνεται διαθέσιμο.

Σε κάθε περίοδο, όλοι οι πράκτορες στο μοντέλο χρησιμοποιούν τις ίδιες προβλέψεις ελαχίστων τετραγώνων για την πρόβλεψη των προσδοκίμων μεταβλητών του μοντέλου. Αυτές οι προβλέψεις γίνονται εντός του γραμμικού μοντέλου και οδηγούν σε τρέχουσες τιμές που είναι συνεπείς με τις προβλέψεις. Τα δεδομένα που παράγονται για αυτή την περίοδο αποτελούν ένα νέο σύνολο δεδομένων και στη συνέχεια αυτά τα δεδομένα χρησιμοποιούνται για να ενημερώσουν τους συντελεστές των εξισώσεων πρόβλεψης ελαχίστων τετραγώνων. Οι νέοι συντελεστές εισάγονται στο μοντέλο και επιλύουν για την επόμενη περίοδο.

Σε ορισμένες περιπτώσεις λόγω των συνθηκών μπορεί οι παράμετροι του προβλήματος πρόβλεψης ελαχίστων τετραγώνων να εξαρτώνται από το χρόνο. Για να μπορέσουν αυτοί οι παράμετροι να προσαρμοστούν είναι δυνατόν να προσθέσουμε ένα παράγοντα “απώλειας μνήμης” (“forgetting” factor) στην συνάρτηση αναπροσαρμογής. Αυτός ο παράγοντας δίνει λιγότερο βάρος σε παλαιότερα δεδομένα για την διαδικασία εκτίμησης έτσι ώστε οι τιμές των παραμέτρων να σταθμίζονται περισσότερο από ότι έχει συμβεί πρόσφατα. Προσθέτοντας αυτόν τον παράγοντα οι συντελεστές της εξίσωσης πρόβλεψης ελαχίστων τετραγώνων τείνουν να μεταβάλλονται με τον χρόνο και να ανταποκρίνονται περισσότερο σε πρόσφατα αποτελέσματα του συστήματος.[56]

4.4.2 Αναδρομική αναπροσαρμογή συντελεστών με την μέθοδο ελαχίστων τετραγώνων (Recursive least squares updating of coefficients)

Αρχικά, θα παρουσιάσουμε την διαδικασία ενημέρωσης αναδρομικών ελαχίστων τετραγώνων (recursive least square updating procedure). Η διαδικασία αυτή χρησιμοποιείται μαζί με ένα γραμμικό μοντέλο που περιλαμβάνει εξισώσεις προσδοκίων οι παράμετροι των οποίων υπολογίζονται εκ νέου κάθε περίοδο από τη διαδικασία ενημέρωσης. Σε κάθε περίοδο t , εκτελείται το γραμμικό μοντέλο και επιλύεται για τις τιμές ισορροπίας για τις μεταβλητές του μοντέλου για περίοδο t . Οι τιμές των μεταβλητών τον χρόνο t χρησιμοποιούνται στη συνέχεια με τη διαδικασία ενημέρωσης για να παρθούν νέες εκτιμήσεις για τις παραμέτρους των εξισώσεων πρόβλεψης στο γραμμικό μοντέλο. Αυτές οι νέες παράμετροι τοποθετούνται στη συνέχεια στο γραμμικό μοντέλο και χρησιμοποιούνται για την πρόβλεψη στην περίοδο $t+1$. Αυτή η διαδικασία επαναλαμβάνεται.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται δύο εκδοχές των αναδρομικών ελαχίστων τετραγώνων. Η πρώτη εκδοχή είναι ισοδύναμη με τα κοινά ελάχιστα τετράγωνα, και η δεύτερη είναι ισοδύναμη με τα ελάχιστα τετράγωνα με έναν παράγοντα “απόλειας μνήμης” (forgetting factor). Στην δεύτερη περίπτωση όπως έχουμε αναφέρει, στα παλαιότερα δεδομένα δίνεται πολύ μικρότερο βάρος στην γραμμική παλινδρόμηση για τον προσδιορισμό των τρεχουσών συντελεστών των εξισώσεων πρόβλεψης.

Θεωρείστε ένα απλό γραμμικό μοντέλο της μορφής:

$$y_t = x_t \varphi_t + \varepsilon_t,$$

Όπου y_t είναι το διάνυσμα των ενδογενών μεταβλητών, x_t είναι το ιστορικό μέχρι το χρόνο t των εξογενών μεταβλητών (μπορεί να περιλαμβάνει παλιές τιμές της y_t) που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό, φ_t είναι η εκτίμηση των συντελεστών του μοντέλου μέχρι το χρόνο $t-1$ και ε_t είναι ένα διάνυσμα των όρων σφάλματος. Ορίζονται $X_t = [x_t, x_{t-1}, \dots, x_0]'$ και $Y_t = [y_t, y_{t-1}, \dots, y_0]'$ ως τα διαθέσιμα δεδομένα σχετικά με τα x_t και y_t την περίοδο t και x_0 και y_0 είναι τα δεδομένα για την

διαθέσιμη αρχική περίοδο. Τα συνήθη ελάχιστα τετράγωνα των εκτιμήσεων των συντελεστών, φ_t , χρησιμοποιώντας τα διαθέσιμα δεδομένα τη χρονική περίοδο t είναι

$$\varphi_t = (X_t'X_t)^{-1}X_t'Y_t.$$

Ένας τρόπος να βρούμε τους συντελεστές ελαχίστων τετραγώνων με επαναληπτικό τρόπο είναι να γράψουμε τους πίνακες X_t και Y_t ως

$$X_t = \begin{bmatrix} X_{t-1} \\ x_t \end{bmatrix}$$

Και

$$Y_t = \begin{bmatrix} Y_{t-1} \\ y_t \end{bmatrix}.$$

Τότε,

$$X_t'X_t = [X_{t-1}' \quad x_t'] \begin{bmatrix} X_{t-1} \\ x_t \end{bmatrix} = X_{t-1}'X_{t-1} + x_t'x_t$$

Και

$$X_t'Y_t = [X_{t-1}' \quad x_t'] \begin{bmatrix} Y_{t-1} \\ y_t \end{bmatrix} = X_{t-1}'Y_{t-1} + x_t'y_t$$

Όπου τα $x_t'x_t$ και $x_t'y_t$ είναι πίνακες βαθμού ένα. Για τον σκοπό μας, είναι πολύ ενδιαφέρον που ο τετραγωνικός πίνακας $x_t'x_t$ είναι βαθμού ένα. Ο αντίστροφος του αθροίσματος ενός μοναδιαίου πίνακα και ενός πίνακα βαθμού ένα έχει μία ειδική, πολύ απλή λύση.

Έστω $I + \alpha'b$ ένας $n \times n$ μοναδιαίος πίνακας και το προϊόν δύο n διαστάσεως διανυσμάτων που δίνουν έναν $n \times n$ πίνακα βαθμού ένα¹. Ο αντίστροφος του πίνακα $I + \alpha'b$ μπορεί να γραφτεί ως

$$[I + \alpha'b]^{-1} = I + \alpha'b$$

¹ Κάθε $n \times n$ πίνακας βαθμού ένα μπορεί να εκφραστεί ως αποτέλεσμα δύο διανυσμάτων διάστασης n .

Όπου

$$c = -\frac{1}{1 + b\alpha'}$$

Σημειώστε ότι το $b\alpha'$ είναι μονοδιάστατο. Για να διαπιστώσουμε ότι ο τύπος αυτός για τον αντίστροφο είναι σωστός, απλά παίρνουμε

$$\begin{aligned} [I + c\alpha'b][I + \alpha'b] &= I + c\alpha'b + \alpha'b + c\alpha'b\alpha' \\ &= I - \frac{1}{1 + b\alpha'}\alpha'b + \alpha'b - \frac{\alpha'\beta}{1 + b\alpha'}\alpha'b \\ &= I + \alpha'b - \frac{1 + b\alpha'}{1 + b\alpha'}\alpha'b \\ &= I + \alpha'b - \alpha'b = I. \end{aligned}$$

Για έναν πιο γενικό πίνακα (εφόσον γενικά $X'_{t-1}X_{t-1} \neq I$), πολλαπλασιάζουμε το $[I + \alpha'b]^{-1}$ με έναν αναστρέψιμο πίνακα B^{-1} και έχουμε

$$B^{-1}[I + \alpha'b]^{-1} = [[I + \alpha'b]B]^{-1} = [B + \alpha'bB]^{-1}.$$

Χρησιμοποιώντας τον τύπο για την αντιστροφή που είδαμε προηγουμένως, έχουμε

$$B^{-1}[I + \alpha'b]^{-1} = B^{-1}[I + c\alpha'b] = B^{-1} + cB^{-1}\alpha'b.$$

Συνδυάζοντας τα δύο τελευταία αποτελέσματα έχουμε

$$[B + \alpha'bB]^{-1} = B^{-1} + cB^{-1}\alpha'b.$$

Ορίζουμε το διάνυσμα f ως $f = bB$, και αντικαθιστώντας στην από πάνω έκφραση έχουμε

$$[B + \alpha'f]^{-1} = B^{-1} + cB^{-1}\alpha'fB^{-1}$$

όπου

$$c = -\frac{1}{1 + fB^{-1}\alpha'}$$

Χρησιμοποιώντας αυτή τη μέθοδο εύρεσης του αντιστρόφου, μπορούμε να γράψουμε

$$(X'_{t-1}X_{t-1} + x'_t x_t)^{-1} = (X'_{t-1}X_{t-1})^{-1} + c(X'_{t-1}X_{t-1})^{-1} x'_t x_t (X'_{t-1}X_{t-1})^{-1} \quad (1),$$

Όπου

$$c = -\frac{1}{1 + x_t (X'_{t-1}X_{t-1})^{-1} x'_t}.$$

Όμως,

$$\varphi_t = (X'_t X_t)^{-1} X'_t Y_t = (X'_{t-1}X_{t-1} + x'_t x_t)^{-1} (X'_{t-1}Y_{t-1} + x'_t y_t),$$

Μπορούμε να αντικαταστήσουμε την έκφραση $(X'_{t-1}X_{t-1} + x'_t x_t)^{-1}$ από τον τύπο (1) και μετά από λίγη άλγεβρα έχουμε

$$\varphi_t = \varphi_{t-1} + \frac{(X'_{t-1}X_{t-1})^{-1} x'_t}{1 + x_t (X'_{t-1}X_{t-1})^{-1} x'_t} (y_t - x_t \varphi_{t-1}).$$

Ορίζουμε $P_t = (X'_t X_t)^{-1}$, και έχουμε

$$\varphi_t = \varphi_{t-1} + \frac{P_{t-1} x'_t}{1 + x_t P_{t-1} x'_t} (y_t - x_t \varphi_{t-1})$$

Με κανόνα αναπροσαρμογής για το P_t , από την εξίσωση (1),

$$P_t = \left[I - \frac{P_{t-1} x'_t}{1 + x_t P_{t-1} x'_t} x_t \right] P_{t-1}.$$

Ξεκινώντας από κάποιες αρχικές εκτιμήσεις για τα P_0 και φ_0 , μπορεί κανείς να υπολογίσει αναδρομικά τα P_t και φ_t . Αυτά συγκλίνουν στην εκτίμηση ελαχίστων τετραγώνων.

Η διατύπωση της αναπροσαρμογής ελαχίστων τετραγώνων που παρουσιάστηκε εδώ είναι αρκετά εύρωστη, καθώς εργαζόμαστε απευθείας με τον πίνακα P_t και το διάνυσμα παραμέτρων φ_t και δεν υπάρχει λόγος να υπολογίσουμε αντίστροφους πίνακες.[56]

4.4.3 Αναδρομικά ελάχιστα τετράγωνα με απώλεια μνήμης (recursive least squares with forgetting)

Μπορεί να υπάρξει η περίπτωση όπου κάποιος επιθυμεί να δώσει λιγότερο βάρος σε πολύ παλαιότερα δεδομένα, είτε πιστεύει ότι συμβαίνουν διαρθρωτικές αλλαγές στο μοντέλο, ή επειδή πιστεύει ότι οι ιδιώτες συμπεριφέρονται κάπως “μυωπικά”, και διαχειρίζονται τις πιο πρόσφατες παρατηρήσεις ως κάπως πιο σχετικές από τις παλαιότερες. Η μέθοδος ελαχίστων τετραγώνων με απώλεια μνήμης αποτελεί μια εκδοχή του φίλτρου Kalman με σταθερό “κέρδος”.

Σύμφωνα με τον Lindoff (1997) [57], η εισαγωγή “απώλειας μνήμης” σε μια αναδρομική εκτίμηση ελαχίστων τετραγώνων είναι απλή διαδικασία. Επιλέγουμε ένα λ όπου $0 < \lambda < 1$ και ρυθμίζουμε τον κανόνα αναπροσαρμογής ώστε να είναι

$$P_{t+1}^{-1} = \lambda P_t^{-1} + x'_{t+1} x_{t+1}.$$

Ασυμπτωτικά, το αναδρομικό μοντέλο ελαχίστων τετραγώνων με “απώλεια μνήμης” ισοδυναμεί με μία σταθμισμένη εκτίμηση ελαχίστων τετραγώνων της μορφής

$$\hat{\varphi}_t = \left(\sum_{k=1}^t \lambda^{t-k} x'_k x_k \right)^{-1} \left(\sum_{k=1}^t \lambda^{t-k} x'_k y_k \right).$$

Παρατηρείστε ότι αυτή η μορφή της εκτίμησης ελαχίστων τετραγώνων με βάρη, δίνει όλο και μικρότερα βάρη στον όρο με ρυθμό λ^j στα δεδομένα j περιόδων στο παρελθόν.

Για να πάρουμε την γραμμική περίπτωση των αναδρομικών ελαχίστων τετραγώνων με απώλεια μνήμης ακολουθούμε την ίδια μεθοδολογία όπως παραπάνω αλλά ορίζουμε τους πίνακες $X'_t X_t$ και $X'_t Y_t$ ως

$$X'_t X_t = [\lambda^{1/2} X'_{t-1} \quad x'_t] \begin{bmatrix} \lambda^{1/2} X_{t-1} \\ x_t \end{bmatrix} = \lambda X'_{t-1} X_{t-1} + x'_t x_t$$

και

$$X_t'Y_t = [\lambda^{1/2}X_{t-1}' \quad x_t'] \begin{bmatrix} \lambda^{1/2}Y_{t-1} \\ y_t \end{bmatrix} = \lambda X_{t-1}'Y_{t-1} + x_t'y_t$$

Παρατηρούμε ότι ο παράγοντας απώλειας μνήμης λ περιλαμβάνεται στο όρισμα. Χρησιμοποιώντας αυτά τα ορίσματα για τα $X_t'X_t$ και $X_t'Y_t$, η εκτίμηση ελαχίστων τετραγώνων γίνεται

$$\begin{aligned} \varphi_t &= (X_t'X_t)^{-1}X_t'Y_t \\ &= (\lambda X_{t-1}'X_{t-1} + x_t'x_t)^{-1}(\lambda X_{t-1}'Y_{t-1} + x_t'y_t). \end{aligned}$$

Χρησιμοποιώντας την γραμμική αναπαράσταση της παραπάνω αντίστροφης μορφής, έχουμε

$$(\lambda X_{t-1}'X_{t-1} + x_t'x_t)^{-1} = \frac{1}{\lambda}(X_{t-1}'X_{t-1})^{-1} + \frac{\mathbf{c}}{\lambda}(X_{t-1}'X_{t-1})^{-1}x_t'x_t(X_{t-1}'X_{t-1})^{-1},$$

Με

$$\mathbf{c} = -\frac{1}{\lambda + x_t'(X_{t-1}'X_{t-1})^{-1}x_t'}.$$

Από τα παραπάνω προκύπτει ότι

$$\varphi_t = \varphi_{t-1} + \frac{(X_{t-1}'X_{t-1})^{-1}x_t'(y_t - x_t\varphi_{t-1})}{\lambda + x_t'(X_{t-1}'X_{t-1})^{-1}x_t'}$$

Και η εξίσωση αναπροσαρμογής είναι

$$\begin{aligned} (X_t'X_t)^{-1} &= (\lambda X_{t-1}'X_{t-1} + x_t'x_t)^{-1} \\ &= \frac{1}{\lambda}(X_{t-1}'X_{t-1})^{-1} + \mathbf{c} \frac{1}{\lambda}(X_{t-1}'X_{t-1})^{-1}x_t'x_t \frac{1}{\lambda}(X_{t-1}'X_{t-1})^{-1}. \end{aligned}$$

Ορίζοντας $P_t = (X_t'X_t)^{-1}$, μπορούμε να γράψουμε το μοντέλο στην μορφή

$$\varphi_t = \varphi_{t-1} + \frac{P_{t-1}x_t'}{\lambda + x_t'P_{t-1}x_t'}(y_t - x_t\varphi_{t-1})$$

Και την εξίσωση αναπροσαρμογής ως

$$P_t = \frac{1}{\lambda} \left[I - \frac{P_{t-1} x'_t}{\lambda + x_t P_{t-1} x'_t} x_t \right] P_{t-1}.$$

Όπως επισημαίνουν οι Branch and Evans (2005) [58] και Sargent (1993) [52], η μάθηση με ελάχιστα τετράγωνα είναι μία περιορισμένη μορφή του φίλτρου Kalman όπου το σταθερό “κέρδος” Kalman ισούται με $1-\lambda$. [56]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΑΝΑΠΑΡΑΣΤΑΣΗ ΤΙΜΗΣ ΑΓΟΡΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζεται ένα μοντέλο αναπαράστασης της τιμής της spot αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας. Γίνεται αναλυτική περιγραφή των παραμέτρων του μοντέλου και στη συνέχεια το μοντέλο αυτό υλοποιείται για την παραγωγή τιμών ηλεκτρικής ενέργειας για τη Νορβηγική αγορά.

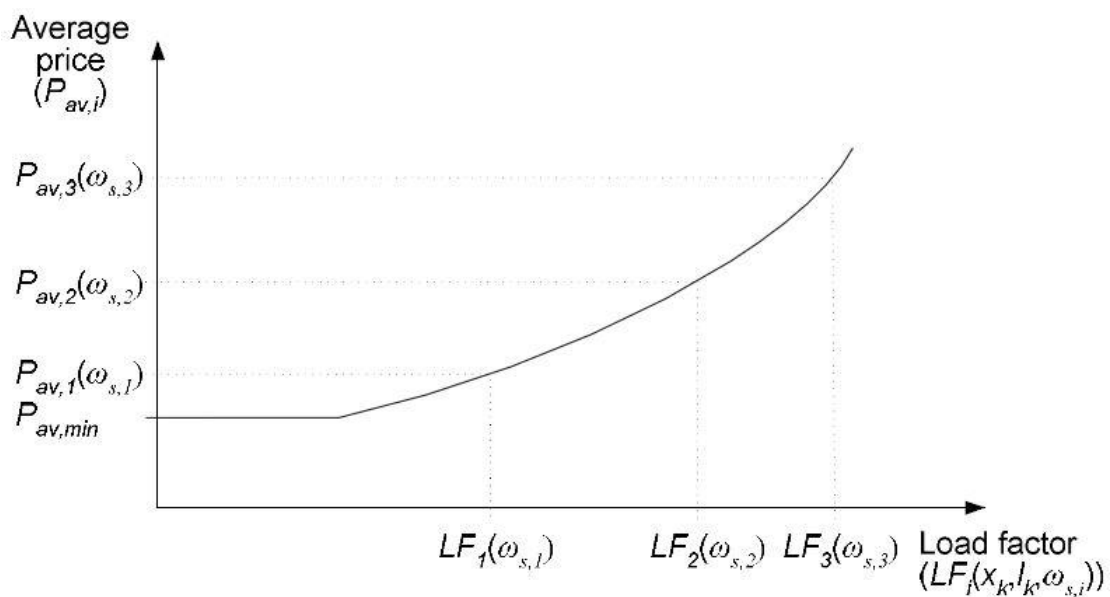
5.1 Περιγραφή του μοντέλου

Μια καλή αναπαράσταση της τιμής της ηλεκτρικής ενέργειας είναι σημαντική, προκειμένου να επιτύχουμε λογικά αποτελέσματα στο μοντέλο της αγοράς. Υπάρχουν διάφορα διαθέσιμα μοντέλα ηλεκτρικής ενέργειας που προσομοιώνουν την spot τιμή ηλεκτρικής ενέργειας, όπως bottom-up production cost based μοντέλα, bid-based στοχαστικά μοντέλα και πολλά άλλα. Θεωρητικά, οποιοδήποτε από αυτά τα μοντέλα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την αναπαράσταση της τιμής σε κάθε συνδυασμό καταστάσεων σε ένα μοντέλο βελτιστοποίησης. Ωστόσο, η υπολογιστική αποδοτικότητα είναι πολύ σημαντική δεδομένου ότι θα πρέπει να υπολογίσουμε την τιμή για όλους τους συνδυασμούς καταστάσεων. Ως εκ τούτου χρησιμοποιούμε μία συνολική απλοποιημένη περιγραφή της spot αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας [4]. Το μοντέλο εξακολουθεί να αποτυπώνει μερικές από τις κύριες σχέσεις της spot αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας, όπως:

- Η σχέση μεταξύ της διαθέσιμης δυναμικότητας παραγωγής και το επίπεδο του φορτίου από τη μία πλευρά σε σύγκριση με την τιμή ηλεκτρικής ενέργειας και την αστάθεια της από την άλλη.
- Η σχέση μεταξύ των βραχυπρόθεσμων αβεβαιοτήτων, όπως η διαθεσιμότητα της υδροηλεκτρικής ενέργειας, και της τιμής ηλεκτρικής ενέργειας.

Υποθέτουμε ότι η μέση τιμή ηλεκτρικής ενέργειας κατά τη διάρκεια του έτους, P_{av} , είναι μία συνάρτηση του συντελεστή φορτίου (Load Factor – LF), δηλαδή του λόγου

του μέσου φορτίου προς τη μέση παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια $\left(\frac{l_k}{x_k}\right)$ κατά τη διάρκεια του έτους. Ωστόσο, σε συστήματα με μεγάλη συμμετοχή των ανανεώσιμων πηγών ηλεκτρικής ενέργειας, η μέση παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια θα διαφέρει σημαντικά από έτος σε έτος. Συνεπώς, αναπαριστούμε την αρχική μέση παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια στο σύστημα με μια διακριτή κατανομή πιθανότητας, που περιγράφεται από την βραχυπρόθεσμη αβεβαιότητα, ω_s . Κατά συνέπεια καταλήγουμε με μία διακριτή κατανομή πιθανότητας για τον συντελεστή φορτίου, $LF(x_k, l_k, \omega_s)$, όπου x_k είναι η μέση παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια, και l_k είναι το μέσο επίπεδο φορτίου. Το ίδιο ισχύει και για την μέση τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας κατά τη διάρκεια του έτους, καθώς όπως είπαμε αποτελεί συνάρτηση του συντελεστή φορτίου, $P_{av}(LF)$. Η σχέση μεταξύ των ω_s , P_{av} και LF απεικονίζεται στο σχήμα-5.1.



Σχήμα-5.1: Απεικόνιση της μέσης τιμής ηλεκτρικής ενέργειας κατά τη διάρκεια του έτους, P_{av} , ως συνάρτηση του συντελεστή φορτίου LF. Ο συντελεστής φορτίου είναι μία συνάρτηση των μεταβλητών κατάστασης x_k και l_k (οι οποίες θεωρούνται σταθερές εδώ), και από τη βραχυπρόθεσμη αβεβαιότητα ω_s . Τα ω_1 , ω_2 και ω_3 αντιπροσωπεύουν υψηλή, μεσαία και χαμηλή διαθεσιμότητα της αρχικά εγκατεστημένης δυναμικότητας [4].

Μπορούμε επίσης να υποθέσουμε ότι υπάρχει μία συναρτησιακή σχέση ανάμεσα στη μέση τιμή ηλεκτρικής ενέργειας και στην διακύμανση που παρουσιάζει η $spot^2$ τιμή. Η διακύμανση είναι συνήθως υψηλότερη στα έτη όπου παρουσιάζονται υψηλές τιμές, αφού το σύστημα λειτουργεί πιο κοντά στο όριο δυναμικότητάς του. Ως εκ τούτου, η τυπική απόκλιση της $spot$ τιμής, $\sigma_s(P_{av})$, είναι μία αύξουσα συνάρτηση της μέσης τιμής ηλεκτρικής ενέργειας. Οι συναρτήσεις $P_{av}(LF)$ και $\sigma_s(P_{av})$, καθώς και η κατανομή πιθανότητας για το ω_s , εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από τις συνθήκες του συστήματος, όπως π.χ. η συνολική αρχική εγκατεστημένη δυναμικότητα (x_{tot_init}). Οι παράμετροι που περιγράφουν τις συναρτήσεις αυτές, μπορούν να εκτιμηθούν με βάση ιστορικά δεδομένα, ή με προσομοιώσεις από πιο λεπτομερή μοντέλα τιμών, όπου μπορούν να συμπεριληφθούν και νέες επενδύσεις[4].

5.1.1 Επιλογή κατανομής

Με το συνδυασμό των εκτιμήσεων των μέσων τιμών και των τυπικών αποκλίσεων στη $spot$ αγορά για ένα συνδυασμό μεταβλητών κατάστασης, καταλήγουμε σε μία σειρά από διαφορετικές κατανομές της $spot$ τιμής για το έτος. Επιλέγουμε την λογαριθμοκανονική κατανομή³ (lognormal distribution) για να αναπαραστήσουμε την κατανομή της $spot$ τιμής για το έτος, εξαιτίας της μη αρνητικότητας της, και του ότι η ασύμμετρη της μορφή μπορεί να συλλάβει εν μέρη τις εμφανίσεις μεγάλων τιμών λόγω φορτίων αιχμής σε περιόδους όπου ο συντελεστής φορτίου είναι υψηλός. Επομένως, η $spot$ τιμή, $P_{s,i}$, μοντελοποιείται όπως φαίνεται στην παρακάτω σχέση, όπου το i αναφέρεται στην διακριτή τιμή της βραχυπρόθεσμής στοχαστικής μεταβλητής $\omega_{s,i}$.

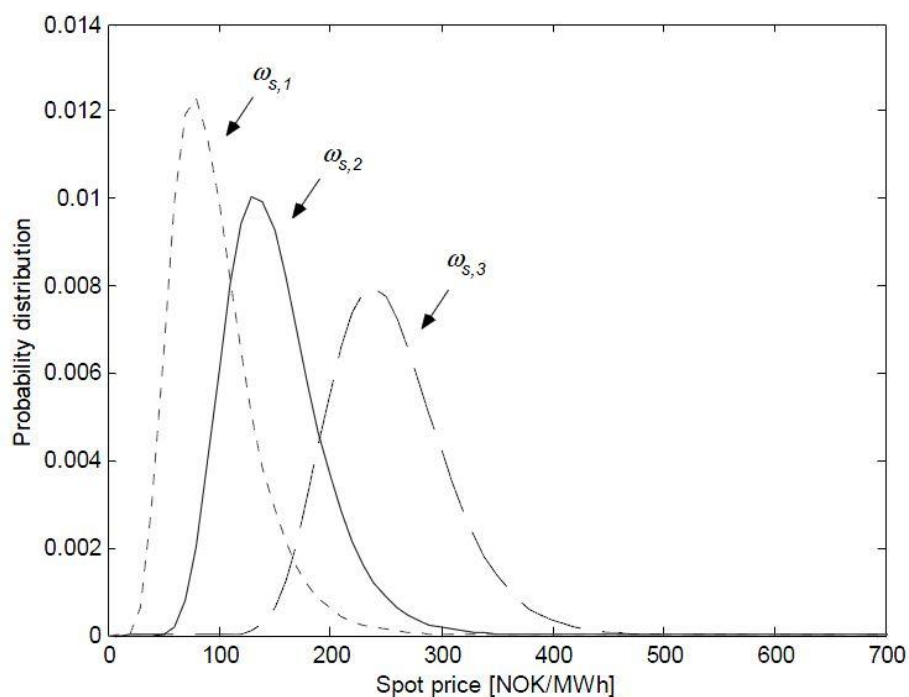
$$P_{s,i}(x_k, l_k) \sim \mathbf{logN}(P_{av,i}(x_k, l_k), \sigma_{s,i}(P_{av,i}))$$

Το σχήμα-5.2 παρουσιάζει μια εικόνα των κατανομών πιθανότητας για τη $spot$ τιμή για ένα συνδυασμό μεταβλητών κατάστασης. Εάν γίνει μια επένδυση σε μια νέα μονάδα παραγωγής, ο συντελεστής φορτίου LF στο σχήμα-5.1 μετατοπίζεται προς τα

² Σε αυτό το σημείο αλλά και στη συνέχεια της παρούσας διπλωματικής εργασίας, με τον όρο $spot$ τιμή εννοούμε τη μέση τιμή των τιμών της $spot$ αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας για το έτος.

³ Αναλυτική περιγραφή της λογάριθμο-κανονικής κατανομής ακολουθεί στο Παράρτημα

αριστερά με αποτέλεσμα η μέση τιμή ηλεκτρικής ενέργειας για το έτος $P_{av}(LF)$ να μειώνεται αναλόγως. Κατά συνέπεια, οι κατανομές της spot τιμής στο σχήμα-5.2 θα μετατοπιστούν και αυτές προς χαμηλότερες τιμές.[4]



Σχήμα-5.2: Συναρτήσεις κατανομής πιθανότητας για την spot τιμή με τρεις διαφορετικές υλοποιήσεις για την βραχυπρόθεσμη στοχαστική μεταβλητή $\omega_{s,i}$. [4]

5.1.2 Είσοδος νέων επενδύσεων

Σε μία ανταγωνιστική αγορά ηλεκτρικής ενέργειας, οι τιμές επηρεάζονται και από τις δράσεις όλων των επιχειρήσεων στην αγορά. Οι τιμές ηλεκτρικής ενέργειας ενδεχομένως μειώνονται όταν οι συμμετέχοντες στην αγορά επενδύουν σε νέες μονάδες παραγωγής ενέργειας, ή όταν εισέρχονται νέοι επενδυτές στην αγορά.

Η επίδραση της συμπεριφοράς των επενδυτών στην αγορά ηλεκτρικής ενέργειας, καθώς και της εισόδου νέων επενδυτών μπορεί να αναπαρασταθεί υποθέτοντας ότι δίνεται το έναυσμα για επενδύσεις μόλις η spot τιμή ηλεκτρικής ενέργειας ξεπεράσει ένα εξωγενώς καθορισμένο επίπεδο εισόδου. Η αναπαράσταση αυτή παρουσιάζεται παρακάτω

$$v_k(x_k, l_k) = \begin{cases} v_{cap}, & P_s(x_k, l_k) \geq P_{s,entry} \\ 0, & P_s(x_k, l_k) < P_{s,entry} \end{cases}$$

$$E[x_{k+1}] = E[x_k] + v_k$$

Όπου:

$E[x_{k+1}]$: νέα αναμενόμενη δυναμικότητα παραγωγής [MW]

v_k : αναμενόμενη δυναμικότητα παραγωγής από νέες επενδύσεις [MW]

$P_{s,entry}$: επίπεδο τιμής εισόδου για άλλους επενδυτές [νομ. μον./MW]

Η αναμενόμενη δυναμικότητα παραγωγής από νέες επενδύσεις στην αγορά (v_k) προστίθεται στη αναμενόμενη δυναμικότητα παραγωγής $E[x_k]$, με αποτέλεσμα αυτή να αυξάνεται με την έναρξη της επόμενης περιόδου $E[x_{k+1}]$. Υποθέτουμε ότι δεν υπάρχουν καθυστερήσεις στην κατασκευή των νέων επενδύσεων, με αποτέλεσμα η νέα εγκατεστημένη δυναμικότητα να γίνεται άμεσα διαθέσιμη την επόμενη ακριβώς περίοδο. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να μειώνεται ο συντελεστής φορτίου (LF) και ως εκ τούτου να μειώνεται και η τιμή ηλεκτρικής ενέργειας στην spot αγορά.

Με αυτή την αναπαράσταση των νέων επενδύσεων, το επίπεδο της τιμής εισόδου στην αγορά, γίνεται στην πραγματικότητα το άνω όριο της spot τιμής της αγοράς. Η τιμή εισόδου νέων επενδυτών στην αγορά πρέπει να βασίζεται σε προσδοκίες σχετικά με την απαιτούμενη τιμή για άλλους συμμετέχοντες για να επενδύσουν στην αγορά. Σε μία πλήρως ανταγωνιστική αγορά, όπου όλοι οι συμμετέχοντες έχουν πρόσβαση στις ίδιες τεχνολογίες, η τιμή εισόδου πρέπει να είναι η ίδια για όλους τους επενδυτές.

5.2 Μοντέλο παραγωγής τιμών ηλεκτρικής ενέργειας για την Νορβηγική αγορά

Στην ενότητα 5.1 αναφερθήκαμε αναλυτικά στο επιλεγμένο μοντέλο που θα χρησιμοποιήσουμε για την παραγωγή της spot τιμής της αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας. Η υλοποίησή έγινε σε matlab και χρησιμοποιήσαμε παραμέτρους οι οποίες έχουν βασιστεί σε ιστορικά-στατιστικά στοιχεία τα οποία είναι διαθέσιμα και

αφορούν την Νορβηγική αγορά για την περίοδο 1990-2002[4]. Ωστόσο, στην υλοποίησή μας έχει γίνει επέκταση και για την περίοδο 2002-2010 μιας και στο μοντέλο έχει ενσωματωθεί η δυνατότητα εισαγωγής στην αγορά νέων επενδυτών. Στον πίνακα-5.1 παρουσιάζονται τα στοιχεία που αφορούν τη ζήτηση (φορτίο) και στον πίνακα-5.2 τα στοιχεία που αφορούν την παραγωγή του Νορβηγικού συστήματος.

| | | |
|---|----------|----------------|
| Average annual system Load (90-02) | 13210 MW | 115.7 TWh/year |
| Max annual system Load (in 2001) | 14330 MW | 125.5 TWh/year |
| Min annual system Load (in 1990) | 12090 MW | 105.9 TWh/year |
| Annual Load growth (90-02) | 142 MW | 1.25 TWh/year |
| Annual std. dev. in Load growth (90-02) | 297 MW | 2.60 TWh/year |

Πίνακας-5.1: Ιστορικά στοιχεία για το φορτίο στο Νορβηγικό σύστημα.[4]

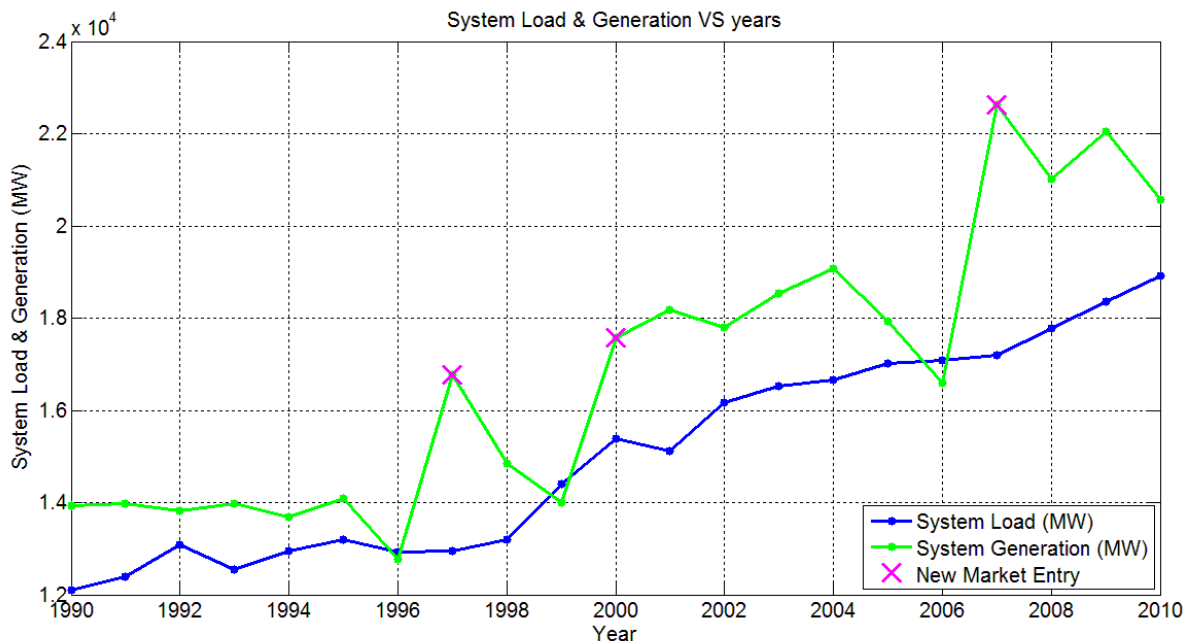
| | | |
|------------------------------|----------|----------------|
| Average generation 1990-2002 | 13680 MW | 119.8 TWh/year |
| Max generation (2001) | 16300 MW | 142.8 TWh/year |
| Min generation (1996) | 11950 MW | 104.7 TWh/year |

Πίνακας-5.2: Ιστορικά στοιχεία για την παραγωγή του Νορβηγικού συστήματος.[4]

5.2.1 Μοντελοποίηση ζήτησης

Για την μοντελοποίηση της ζήτησης θεωρήσαμε για το πρώτο έτος (1990) την ζήτηση με βάση τα ιστορικά στοιχεία του πίνακα-5.1 δηλαδή, 12090 MW. Όσον αφορά τον ετήσιο ρυθμό αύξησης της ζήτησης θεωρήσαμε ότι ακολουθεί κανονική κατανομή με μέση τιμή 142 MW/έτος και τυπική απόκλιση 297MW με βάση τα στοιχεία του

πίνακα-5.1. Η καμπύλη ζήτησης για έτη 1990-2010 παρουσιάζεται στο σχήμα-5.3 με μπλε γραμμή.



Σχήμα-5.3: Καμπύλες ζήτησης και παραγωγής συναρτήσει του χρόνου για την περίοδο 1990-2010

5.2.2 Μοντελοποίηση βραχυπρόθεσμης αβεβαιότητας

Η διαθεσιμότητα της υδροηλεκτρικής ενέργειας είναι η πιο σημαντική βραχυπρόθεσμη αβεβαιότητα στο Νορβηγικό σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας, και είναι η μόνη που λαμβάνουμε υπ' όψη στην παρούσα ανάλυση. Με βάση ιστορικά στοιχεία για την εισροή από την περίοδο 1961-1990, έχουμε μία εκτίμηση για την κατανομή πιθανότητας για σχετική διαθεσιμότητα της υδροηλεκτρικής παραγωγής στο σύστημα (RHG_t). Τα δεδομένα εισροής έχουν εισαχθεί σε ένα EMPS μοντέλο [1], το οποίο προσομοιώνει τη συνολική παραγωγή υδροηλεκτρικής ενέργειας στη Νορβηγία για 30 σενάρια εισροής. Τα σενάρια συγκεντρώνονται σε 5 διακριτές στάθμες υδροηλεκτρικής ενέργειας και η προκύπτουσα κατανομή πιθανότητας παρουσιάζεται στον πίνακα-5.3.

| Realisation, i | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $P(\omega_s = \omega_{s,i})$ | 0.1 | 0.2 | 0.4 | 0.2 | 0.1 |
| RHG_i | 1.174 | 1.063 | 0.986 | 0.939 | 0.878 |

Πίνακας-5.3: Διακριτή κατανομή πιθανότητας για την σχετική διαθεσιμότητα της υδροηλεκτρικής παραγωγής (RHG_i) στο αρχικό Νορβηγικό σύστημα. Οι τιμές βασίζονται σε προσομοιώσεις με ένα EMPS μοντέλο, χρησιμοποιώντας δεδομένα εισροής για την περίοδο 1961-1990.[4]

Με αυτή την αναπαράσταση της βραχυπρόθεσμης αβεβαιότητας ω_s γίνεται εύκολα αντιληπτό ότι επηρεάζεται ο συντελεστής φορτίου (LF) για διαφορετικές υλοποιήσεις της $\omega_{s,i}$, ο οποίος με τη σειρά του θα επηρεάσει τις κατανομές της spot τιμής. Όπως θα δούμε στην ενότητα 5.2.4 η βραχυπρόθεσμη αβεβαιότητα ενσωματώνεται στην μοντελοποίηση της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.[4]

5.2.3 Μοντελοποίηση ενεργοποίησης νέων επενδύσεων

Για την μοντελοποίηση εισόδου νέων επενδύσεων στην αγορά χρησιμοποιήσαμε την αναπαράσταση που παρουσιάστηκε στην ενότητα 5.1.2 επιλέγοντας ως επίπεδο τιμής εισόδου νέων επενδύσεων στην αγορά $P_{s,entry} = 150 \text{ NOK}^4/\text{MWh}$, και θεωρώντας ότι στην περίπτωση αυτή γίνονται επενδύσεις με στόχο την αύξηση της μέσης δυναμικότητας κατά 15%. Έτσι η αναπαράσταση παίρνει την εξής μορφή:

$$v_k(x_k, l_k) = \begin{cases} 0.15E[x_k], & P_s(x_k, l_k) \geq 150 \\ 0, & P_s(x_k, l_k) < 150 \end{cases}$$

$$E[x_{k+1}] = E[x_k] + v_k$$

5.2.4 Μοντελοποίηση παραγωγής

Όπως αναφέρθηκε στην ενότητα 5.2.2 η διαθεσιμότητα της υδροηλεκτρικής ενέργειας είναι η πιο σημαντική βραχυπρόθεσμη αβεβαιότητα στο Νορβηγικό

⁴ Η Νορβηγική Κορόνα (NOK) είναι το νόμισμα της Νορβηγίας. Η νορβηγική ονομασία είναι «krone», ο πληθυντικός του είναι «kroner» και διαιρείται σε 100 øre (ενικός και πληθυντικός). 1€=7.5 NOK στις 12 Οκτωβρίου 2012.

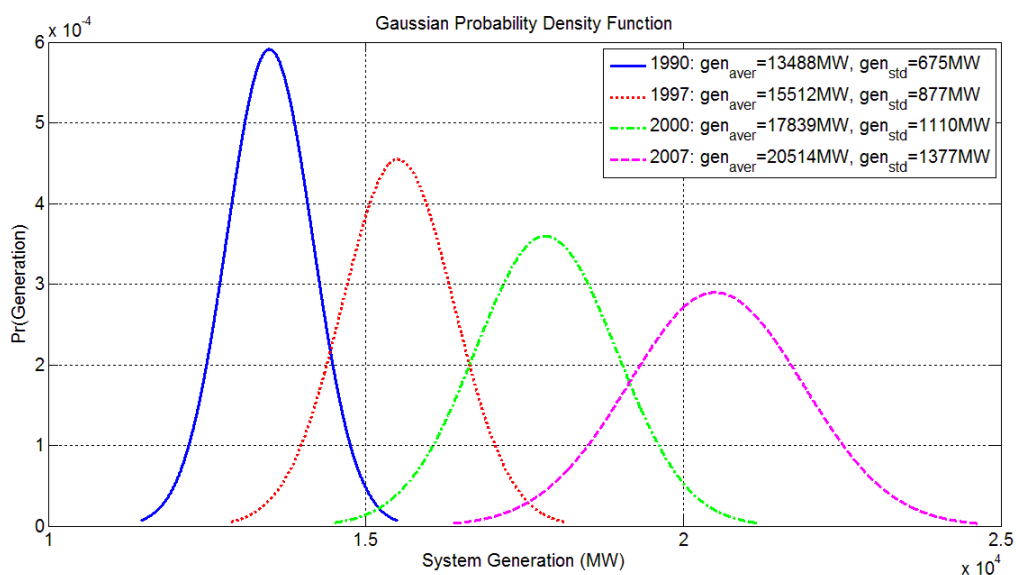
σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας. Επιθυμούμε να εισάγουμε την αβεβαιότητα αυτή στη αναπαράσταση της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας στο Νορβηγικό σύστημα. Για το λόγο αυτό θεωρούμε ότι η παραγωγή ακολουθεί κανονική κατανομή το εύρος της οποίας, καθώς και η μέση τιμή της εξαρτώνται από την σχετική διαθεσιμότητα της υδροηλεκτρικής παραγωγής (RHG_i) στο Νορβηγικό σύστημα, και κατά συνέπεια από στοχαστική μεταβλητή $\omega_{s,i}$, με βάση την διακριτή κατανομή που παρουσιάζεται στον πίνακα-5.3. Η αρχική κατανομή θεωρούμε ότι έχει μέση τιμή $0.986 \cdot 13680$ MW, μέγιστη τιμή $\max = 1.174 \cdot 13680$ MW και ελάχιστη τιμή $\min = 0.878 \cdot 13680$ MW. Από τις παραπάνω τιμές υπολογίζεται η τυπική απόκλιση της κατανομής ως εξής:

$$\sigma = (\max - \min) / 6$$

γιατί ως γνωστόν το εύρος της κανονικής κατανομής ισούται με έξι φορές την τυπική απόκλιση.

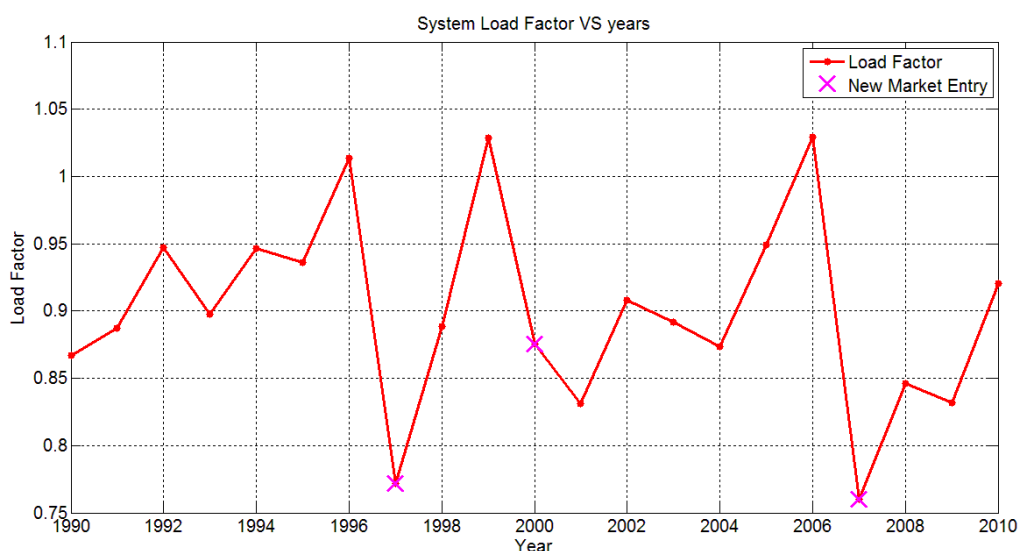
Σε περίπτωση εισόδου νέων επενδύσεων στην αγορά, θεωρούμε ότι αυξάνεται η μέση τιμή της κανονικής κατανομής κατά 15%. Θεωρούμε ότι οι νέες επενδύσεις γίνονται σε τεχνολογίες και εγκαταστάσεις που έχουν σαν στόχο να παράγουν μία μέση ισχύ με απόκλιση $\pm 30\%$. Με αυτό το σκεπτικό υπολογίζουμε τις \max και \min τιμές της νέας κατανομής.

Η καμπύλη παραγωγής για έτη 1990-2010 παρουσιάζεται στο σχήμα-5.3 με πράσινη γραμμή, ενώ σημειώνονται και τα τρία σημεία στα οποία γίνεται διαθέσιμη η αύξηση της παραγωγής λόγω νέων επενδύσεων. Στο σχήμα-5.4 παρουσιάζονται οι συναρτήσεις πυκνότητας πιθανότητας για το πρώτο έτος, καθώς και για τα τρία έτη στα οποία έχουμε αύξηση της δυναμικότητας παραγωγής λόγω νέων επενδύσεων. Παρατηρούμε ότι με την είσοδο των νέων επενδύσεων οι καμπύλες δεν μετατοπίζονται μόνο προς τα δεξιά (αύξηση μέσης τιμής), αλλά μεγαλώνει και το εύρος τους (αύξηση τυπικής απόκλισης).



Σχήμα-5.4: Συναρτήσεις πυκνότητας πιθανότητας κανονικής κατανομής της παραγωγής

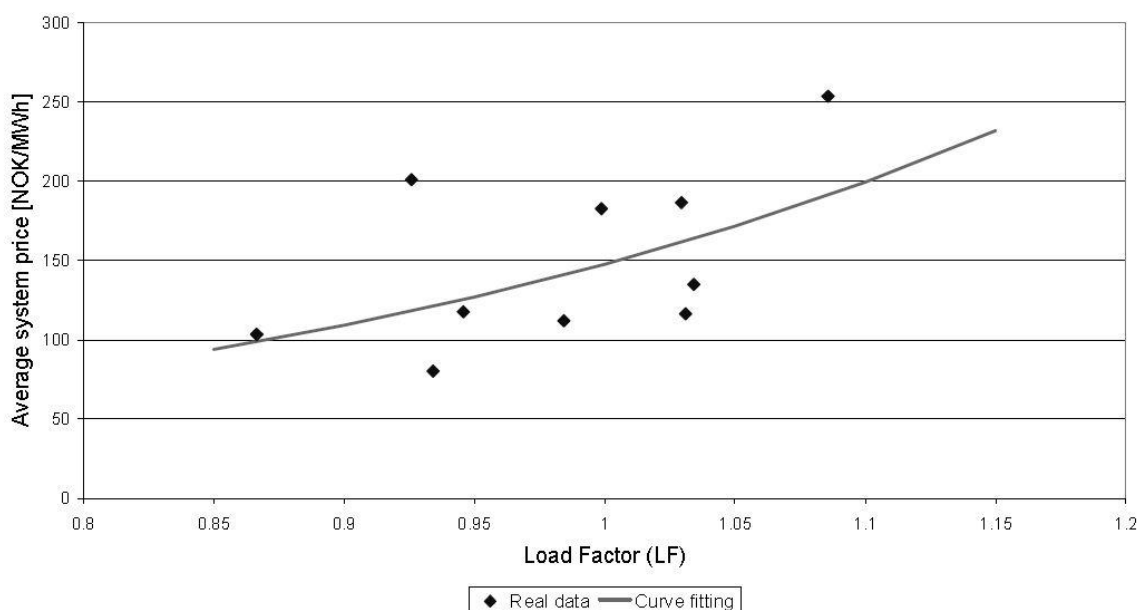
Με δεδομένες πλέον τις καμπύλες ζήτησης και παραγωγής που παρουσιάζονται στο σχήμα-5.3 οδηγούμαστε στην καμπύλη του συντελεστή φορτίου (LF) που παρουσιάζεται στο σχήμα-5.5. Παρατηρούμε όπως αναμενόταν ότι ο συντελεστής φορτίου μειώνεται μετά την είσοδο νέων επενδύσεων στην αγορά, λόγω της αύξησης της παραγωγής, ενώ είναι πιθανό να συνεχίσει να μειώνεται (έτος 2001) λόγω της αβεβαιότητας που παρουσιάζεται στην παραγωγή.



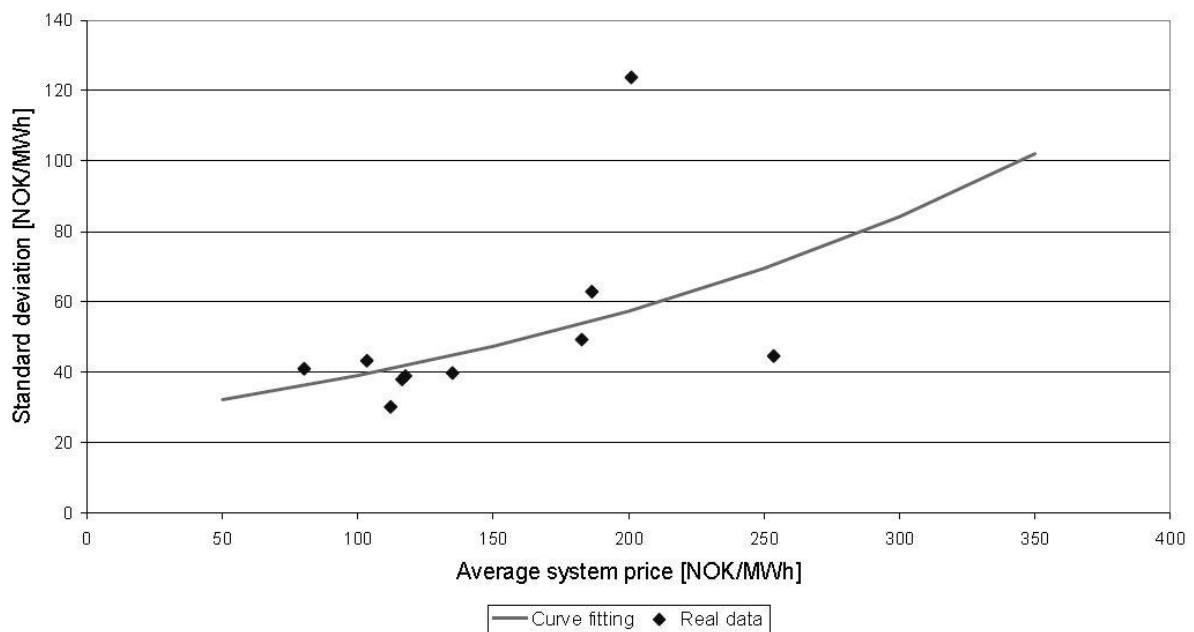
Σχήμα-5.5: Συντελεστής φορτίου (LF) για την περίοδο 1990-2010.

5.2.5 Μοντελοποίηση τιμής αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας

Οι παράμετροι στο μοντέλο για την spot τιμή εκτιμήθηκαν με ανάλυση παλινδρόμησης βασισμένη στα ιστορικά δεδομένα για το φορτίο και τις τιμές της περιόδου 1993-2002[4]. Χρησιμοποιούμε εκθετικές συναρτήσεις για να εκφράσουμε τις συναρτησιακές σχέσεις μεταξύ της μέσης spot τιμής και του συντελεστή φορτίου, $P_{av}(LF) = 8.08(20.3)^{LF}$, και μεταξύ της τυπικής απόκλισης της spot τιμής και τη μέση spot τιμή, $\sigma_s(P_{av}) = 26.6(1.004)^{P_{av}}$. Οι καμπύλες που προκύπτουν φαίνονται στο σχήμα-5.6 και σχήμα-5.7 αντίστοιχα. Όπως αναμενόταν, τα στοιχεία δείχνουν ότι και οι δύο από αυτές τις σχέσεις είναι αύξουσες. Η τιμή τείνει να είναι υψηλότερη όταν ο συντελεστής φορτίου είναι υψηλός, και η τυπική απόκλιση των τιμών αυξάνεται επίσης για υψηλότερες μέσες τιμές.



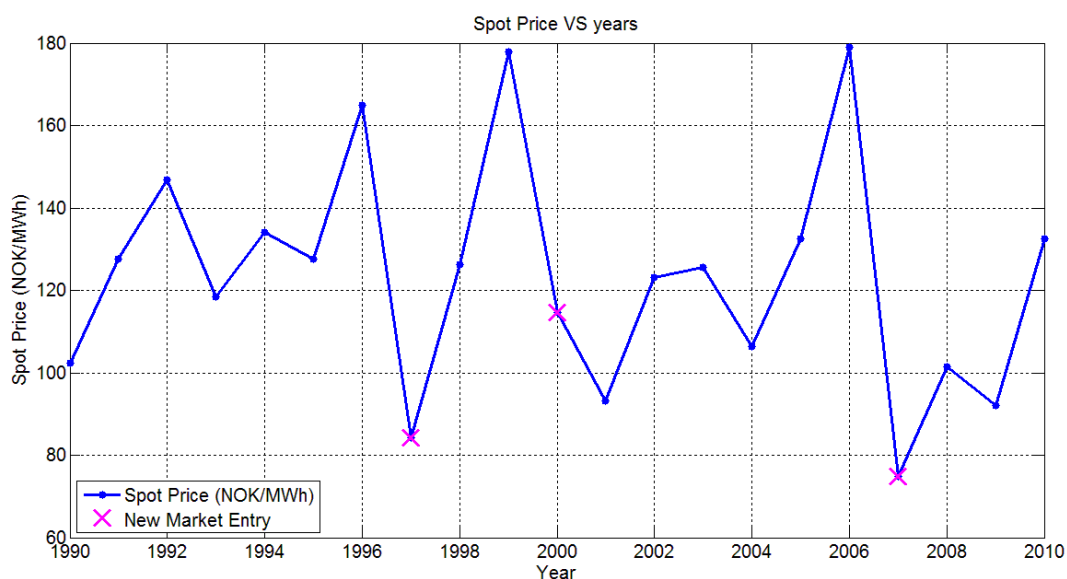
Σχήμα-5.6: Εκτιμώμενα και πραγματικά στοιχεία για τη σχέση μεταξύ του συντελεστή φορτίου, LF (δηλ. φορτίο/παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια), στη Νορβηγία, και τη μέση τιμή ηλεκτρικής ενέργειας στο Nord pool σύστημα, 1993-2002. Εξίσωση για την εκτιμώμενη καμπύλη: $P_{av}(LF) = 8.08(20.3)^{LF}$. [4]



Σχήμα-5.7: Εκτιμώμενα και πραγματικά δεδομένα για την σχέση μεταξύ της τυπικής απόκλισης στην τιμή του Nord pool συστήματος, σ_s , και στην μέση τιμή του συστήματος P_{av} , 1993-2002. Εξίσωση για την εκτιμώμενη καμπύλη: $\sigma_s(P_{av}) = 26.6(1.004)^{P_{av}}$. [4]

Σημειώστε ότι χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα φορτίου και παραγωγής μόνο για τη Νορβηγία, ενώ η τιμή του συστήματος αφορά την τιμή για όλο το Nord pool power exchange. Αυτό εν μέρει οφείλεται στο ότι το Nord pool έχει διευρυνθεί πολλές φορές κατά την περίοδο από την οποία αντλούμε τα στοιχεία (1993-2002), και η Νορβηγία είναι η μόνη χώρα που αποτελεί μέρος του Nord pool καθ' όλη την περίοδο. Επίσης, η Νορβηγία έχει περισσότερο από το 60% της υδροηλεκτρικής παραγωγής και σχεδόν το 70% της εφεδρείας στην Nord pool περιοχή. Συνεπώς, η τιμή του συστήματος βρίσκεται σε μεγάλη εξάρτηση από την διαθεσιμότητα της υδροηλεκτρικής ενέργειας, και εμμέσως του συντελεστή φορτίου στη Νορβηγία.

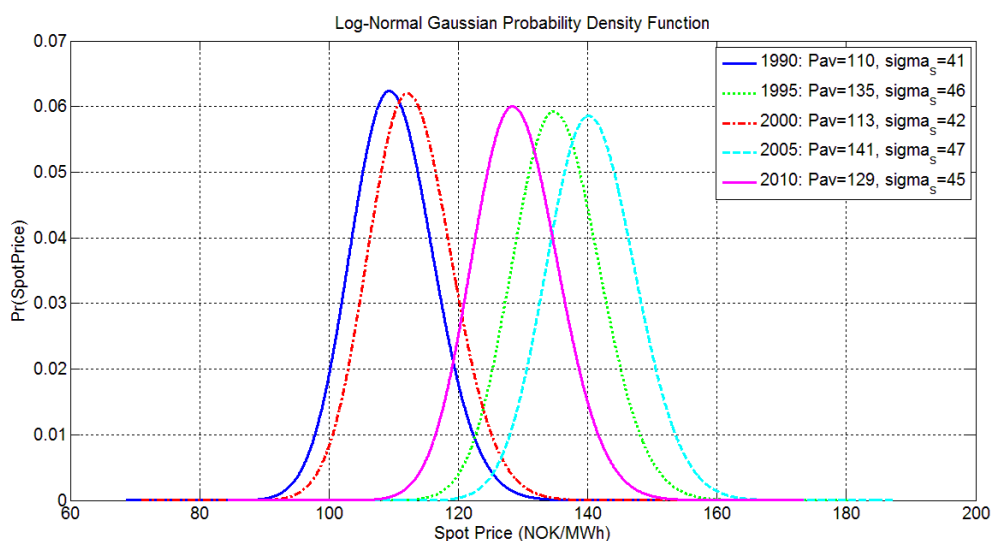
Σύμφωνα με τα παραπάνω και με δεδομένη την καμπύλη του συντελεστή φορτίου του σχήματος-5.5 μπορούμε να πάρουμε από το μοντέλο μας τις τελικές τιμές της spot αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας. Οι τιμές αυτές παρουσιάζονται στο σχήμα-5.8.



Σχήμα-5.8: Τιμή της spot αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας της Νορβηγίας για την περίοδο 1990-2010.

Στο σχήμα-5.8 γίνεται πλέον φανερό το πότε η spot τιμή ξεπερνά τα 150 NOK/MWh, δηλαδή την τιμή εισόδου νέων επενδύσεων στην αγορά. Παρατηρούμε όπως αναμενόταν ότι κατά την επόμενη περίοδο, περίοδο κατά την οποία γίνεται διαθέσιμη η νέα δυναμικότητα στην αγορά, υπάρχει σημαντική μείωση της τιμής.

Στο σχήμα-5.9 παρουσιάζονται οι συναρτήσεις πυκνότητας πιθανότητας της spot τιμής με τις παραμέτρους τους P_{av} και σ_s για πέντε έτη.



Σχήμα-5.9: Συναρτήσεις πυκνότητας πιθανότητας τιμής spot αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΠΡΟΒΛΕΨΗ ΕΞΕΛΙΞΗΣ ΤΙΜΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΜΕ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΜΕΘΟΔΩΝ ΜΑΘΗΣΗΣ

Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο γίνεται χρήση των μεθόδων μάθησης με χρήση αναδρομικών ελαχίστων τετραγώνων που παρουσιάστηκαν στην ενότητα 4.4 για πρόβλεψη τιμών μιας αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας. Σαν πραγματικά δεδομένα της αγοράς θεωρούμε τις τιμές που δημιουργήσαμε με το μοντέλο παραγωγής τιμών που περιγράφεται στο 5^ο κεφάλαιο. Επίσης στην ενότητα 6.2 χρησιμοποιούμε μία τυπική μέθοδο πρόβλεψης χρονοσειρών, όπως το μοντέλο γραμμικής τάσης και στη συνέχεια εφαρμόζουμε ένα είδος μάθησης στην συγκεκριμένη μέθοδο.

6.1 Πρόβλεψη τιμών με χρήση αναδρομικών ελαχίστων τετραγώνων

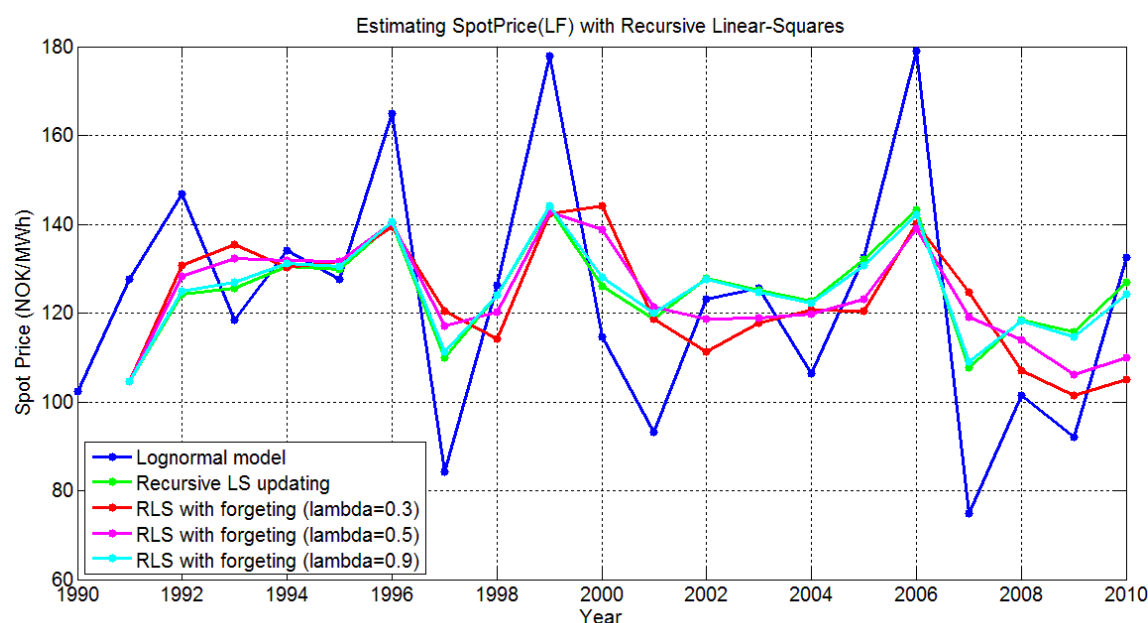
Στην συγκεκριμένη ενότητα κάναμε χρήση της αναδρομικής αναπροσαρμογής συντελεστών με τη μέθοδο ελαχίστων τετραγώνων που περιγράφεται στην ενότητα 4.4.2, αλλά και της μεθόδου αναδρομικών ελαχίστων τετραγώνων με απώλεια μνήμης που παρουσιάστηκε στην ενότητα 4.4.3.

Θεωρούμε ότι οι πραγματικές τιμές της αγοράς είναι αυτές που δημιουργήσαμε με το μοντέλο παραγωγής τιμών στο κεφάλαιο 5. Σκοπός της χρήσης των συγκεκριμένων μεθόδων είναι να γίνεται μια πρόβλεψη της τιμής της ερχόμενης περιόδου, και μόλις η πραγματική τιμή γίνεται διαθέσιμη να επαναξιολογούνται οι συντελεστές του μοντέλου και να παράγεται η πρόβλεψη για τη νέα περίοδο ενσωματώνοντας έτσι την νέα πληροφορία.

Σαν ενδογενή μεταβλητή y_t θεωρούμε τη spot τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας, ενώ για την εξωγενή μεταβλητή x_t έχουμε προχωρήσει σε δύο υλοποιήσεις. Στην πρώτη υλοποίηση θεωρούμε σαν εξωγενή μεταβλητή τον συντελεστή φορτίου LF, ενώ στην δεύτερη θεωρούμε σαν εξωγενείς μεταβλητές τόσο το φορτίο όσο και την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, δηλαδή το διάνυσμα x_t είναι δισδιάστατο.

6.1.1 Αποτελέσματα υλοποίησης θεωρώντας σαν εξωγενή μεταβλητή το συντελεστή φορτίου LF

Στην συγκεκριμένη υλοποίηση θεωρούμε σαν εξωγενή μεταβλητή τον συντελεστή φορτίου LF. Έχουμε προχωρήσει στην παραγωγή τεσσάρων χρονοσειρών πρόβλεψης, όπου η μία αναφέρεται στη χρήση της μεθόδου αναδρομικής αναπροσαρμογής συντελεστών με τη μέθοδο ελαχίστων τετραγώνων ($\lambda=1$) και οι άλλες τρεις στη χρήση της μεθόδου αναδρομικών ελαχίστων τετραγώνων με απώλεια μνήμης με διαφορετικό παράγοντα λ . Υπενθυμίζουμε ότι $0 < \lambda < 1$, και ότι όσο μικρότερος είναι ο παράγοντας λ , τόσο μικρότερο βάρος δίνεται σε παλαιότερα δεδομένα. Στο σχήμα-6.1 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της υλοποίησης. Παρατηρούμε ότι όλες οι παραγόμενες χρονοσειρές πρόβλεψης ακολουθούν τη γενική μορφή της καμπύλης της τιμής και ανταποκρίνονται στις αυξομειώσεις που παρατηρούνται λόγω της εισόδου νέων επενδύσεων στην αγορά.



Σχήμα-6.1: Χρονοσειρές πρόβλεψης τιμής spot αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας με χρήση αναδρομικών ελαχίστων τετραγώνων θεωρώντας σαν εξωγενή μεταβλητή το φορτίο.

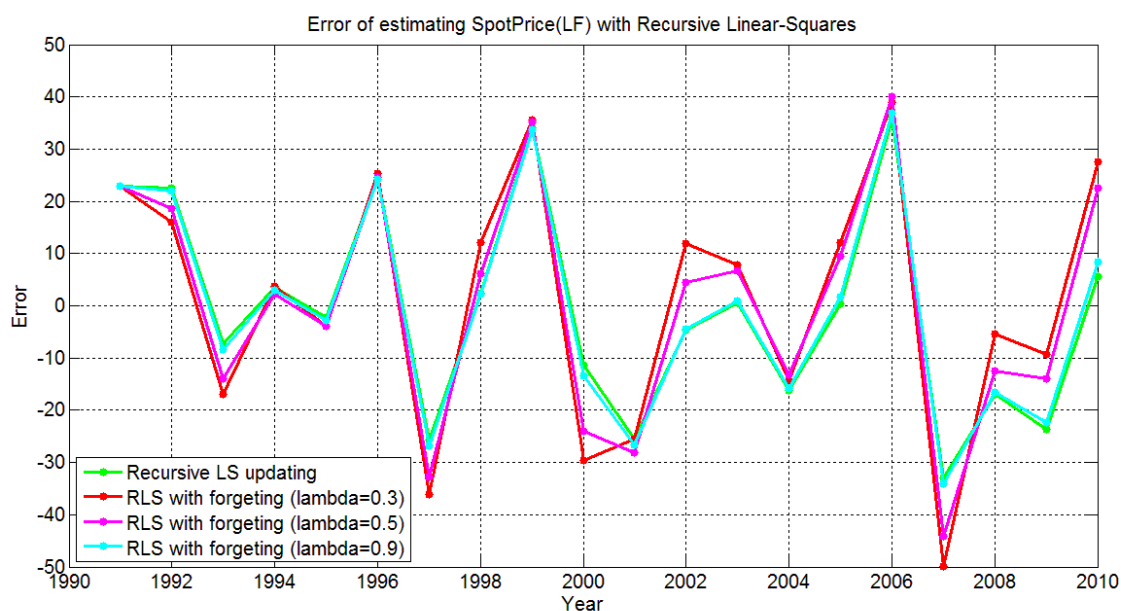
Στο σχήμα-6.2 παρουσιάζονται τα σφάλματα (διαφορά μεταξύ πραγματικής τιμής και πρόβλεψης) για τις τέσσερις χρονοσειρές πρόβλεψης, ενώ στο σχήμα-6.3

παρουσιάζεται το πώς μεταβάλλονται το μέσο τετραγωνικό (MSE) και το μέσο απόλυτο σφάλμα (MAE) σε σχέση με τον παράγοντα λ .

Υπενθυμίζουμε ότι

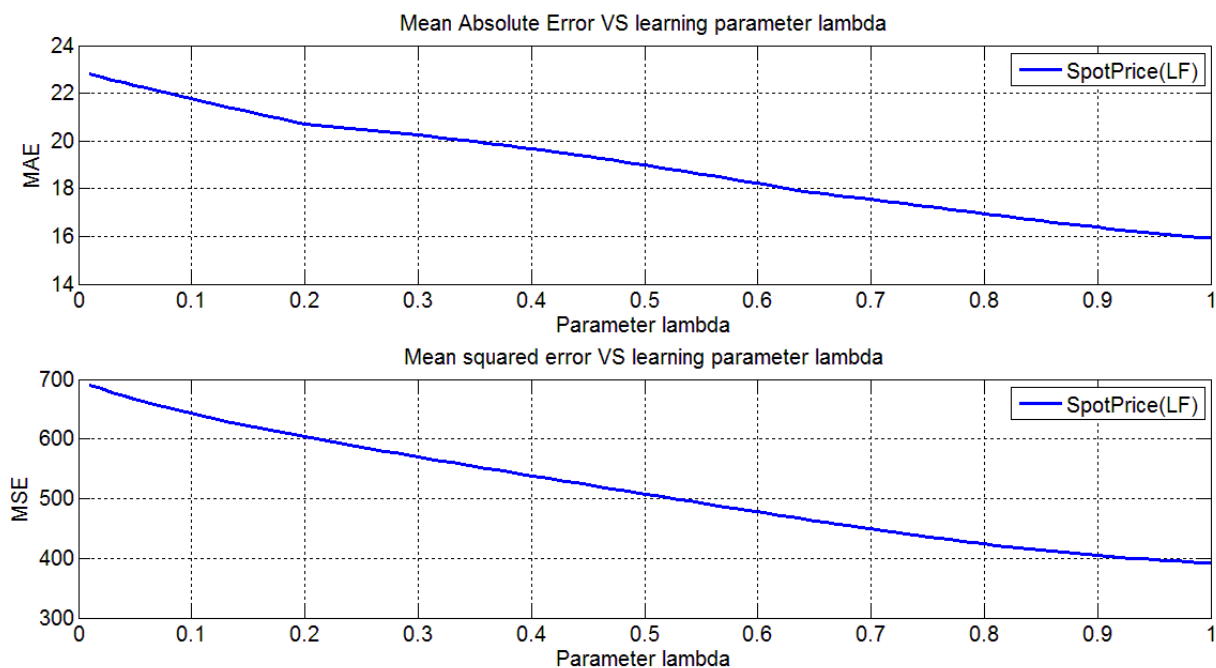
$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Y_i - F_i)^2, \text{ και } MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |Y_i - F_i|$$

όπου Y_i η πραγματική τιμή της περιόδου i και F_i η πρόβλεψη.



Σχήμα-6.2: Σφάλματα χρονοσειρών πρόβλεψης

Παρατηρούμε ότι τόσο το MSE όσο και το MAE μειώνονται καθώς αυξάνεται ο παράγοντας λ . Επίσης οι μέθοδοι με μεγάλο λ εμφανίζουν καλύτερη προσαρμοστικότητα μετά από απότομες μεταβολές της τιμής (είσοδος νέων επενδυτών).

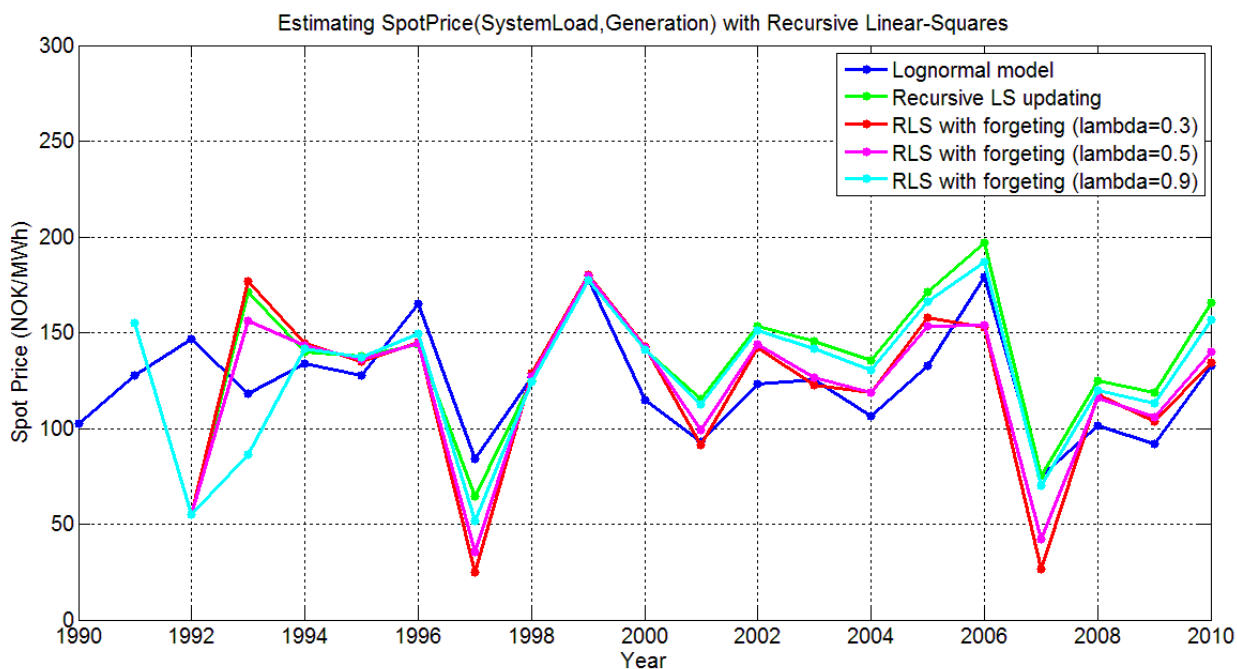


Σχήμα-6.3: Μεταβολή MSE και MAE σε σχέση με τον παράγοντα λ.

6.1.2 Αποτελέσματα υλοποίησης θεωρώντας σαν εξωγενείς μεταβλητές τόσο το φορτίο όσο και την παραγωγή

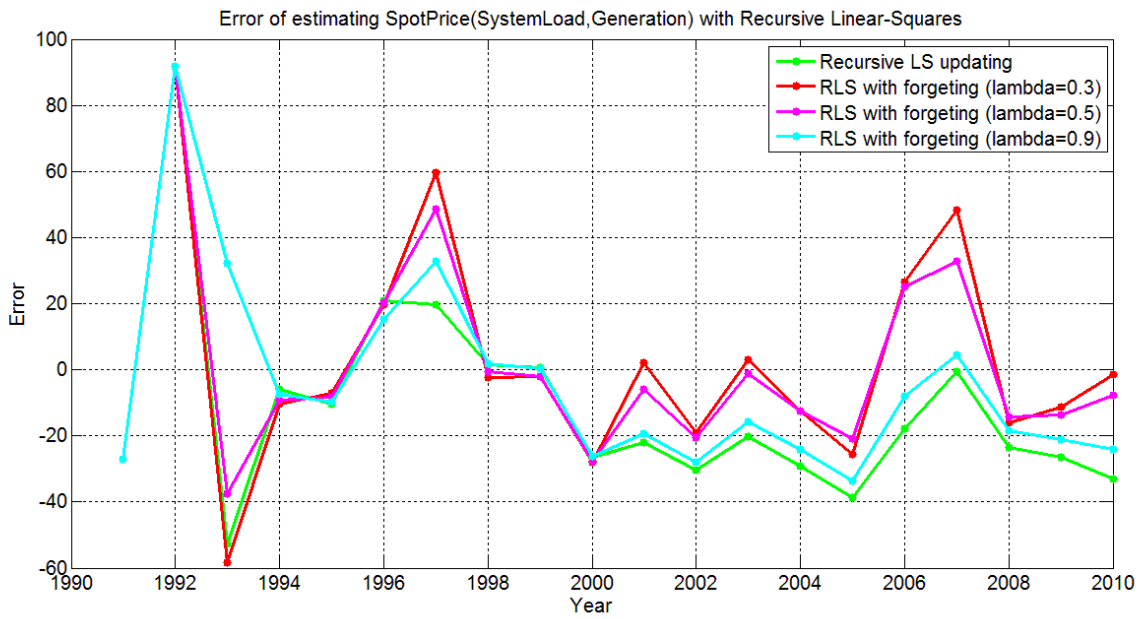
Στην συγκεκριμένη υλοποίηση θεωρούμε σαν εξωγενείς μεταβλητές τόσο το φορτίο όσο και την παραγωγή. Όπως και προηγουμένως, έχουμε προχωρήσει στην παραγωγή τεσσάρων χρονοσειρών πρόβλεψης, όπου η μία αναφέρεται στη χρήση της μεθόδου αναδρομικής αναπροσαρμογής συντελεστών με τη μέθοδο ελαχίστων τετραγώνων και οι άλλες τρεις στη χρήση της μεθόδου αναδρομικών ελαχίστων τετραγώνων με απώλεια μνήμης με διαφορετικό παράγοντα λ.

Στο σχήμα-6.4 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της υλοποίησης. Παρατηρούμε ότι όλες οι παραγόμενες χρονοσειρές πρόβλεψης ακολουθούν τη γενική μορφή της καμπύλης με τιμές αρκετά κοντά στις πραγματικές, με εξαίρεση τις τιμές που σχετίζονται με την είσοδο νέων επενδύσεων, στις οποίες η μείωση που προβλέπεται είναι αρκετά μεγαλύτερη από την πραγματική. Αυτό συμβαδίζει ως ένα βαθμό και με τη γενική αίσθηση ότι μια μεγάλη αύξηση της διατιθέμενης ηλεκτρικής ενέργειας θα οδηγήσει σε μεγάλες μειώσεις της τιμής, χωρίς όμως στην πραγματικότητα αυτό να συμβαίνει στον αναμενόμενο βαθμό.

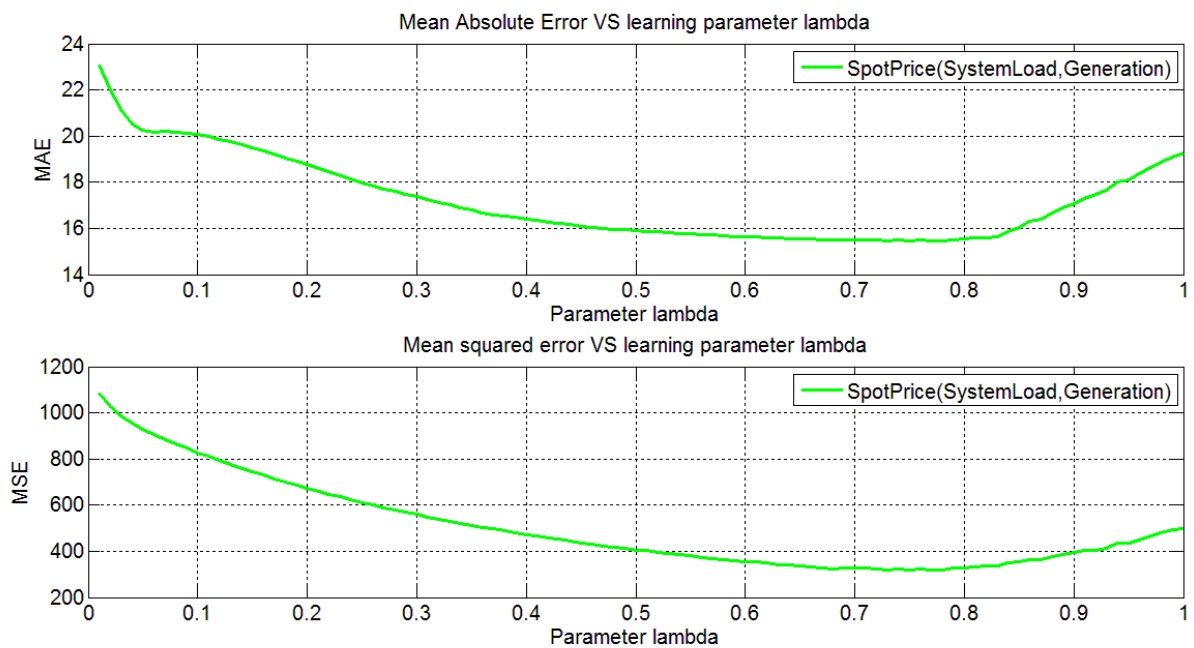


Σχήμα-6.4: Χρονοσειρές πρόβλεψης τιμής spot αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας με χρήση αναδρομικών ελαχίστων τετραγώνων θεωρώντας σαν εξωγενή μεταβλητή το φορτίο

Στο σχήμα-6.5 παρουσιάζονται τα σφάλματα για τις τέσσερις χρονοσειρές πρόβλεψης, ενώ στο σχήμα-6.6 παρουσιάζεται το πώς μεταβάλλονται το μέσο τετραγωνικό (MSE) και το μέσο απόλυτο σφάλμα (MAE) σε σχέση με τον παράγοντα λ . Παρατηρούμε ότι η μέθοδος για ακραίες τιμές του λ , τόσο κοντά στο 0 όσο και κοντά στο 1 παρουσιάζει μεγαλύτερα σφάλματα, και βελτιστοποιείται σε ενδιάμεσες τιμές.



Σχήμα-6.5: Σφάλματα χρονοσειρών πρόβλεψης



Σχήμα-6.6: Μεταβολή MSE και MAE σε σχέση με τον παράγοντα λ

6.2 Πρόβλεψη τιμών με το μοντέλο γραμμικής τάσης

Τα μοντέλα που παρουσιάστηκαν στην ενότητα 6.1 στηρίζονται στην βασική υπόθεση ότι υπάρχει μία σταθερή σχέση μεταξύ του υπό πρόβλεψη μεγέθους (εξαρτημένη μεταβλητή) και ορισμένων παραμέτρων (ανεξάρτητες μεταβλητές) που το επηρεάζουν. Αυτά τα μοντέλα ονομάζονται αιτιοκρατικά.

Στο συγκεκριμένο σημείο κρίνεται σκόπιμο να εφαρμόσουμε και ένα ποσοτικό μοντέλο πρόβλεψης χρονοσειρών το οποίο βασίζεται στην υπόθεση ότι η μεταβολή της τιμής του μεγέθους ακολουθεί ένα συγκεκριμένο λανθάνον πρότυπο που επαναλαμβάνεται στο χρόνο και μένει σταθερό. Οι προβλέψεις πραγματοποιούνται με την αναγνώριση του ακολουθούμενου προτύπου και την προέκταση του στο μέλλον. Επειδή θεωρούμε ότι το πρότυπο εξέλιξης της spot τιμής με εξαίρεση κάποιο ειδικό γεγονός (είσοδος νέων επενδύσεων) είναι γραμμικά αυξητικό λόγω της σχεδόν γραμμικής αύξησης της ζήτησης, χρησιμοποιήσαμε σαν μέθοδο πρόβλεψης το Μοντέλο Γραμμικής Τάσης (Holt Exponential Smoothing).

6.2.1 Μοντέλο Γραμμικής Τάσης (Holt Exponential Smoothing)

Το μοντέλο εξομάλυνσης για γραμμική τάση είναι μια επέκταση της απλής εκθετικής εξομάλυνσης η οποία μπορεί επιπρόσθετα να διαχειριστεί τη συνιστώσα της τάσης, η οποία συχνά παρατηρείται στα επιχειρησιακά δεδομένα. Η επέκταση αυτή προτάθηκε από τον Holt το 1957 και για το λόγο αυτό η μέθοδος διατηρεί μέχρι και σήμερα το όνομά του. Το μοντέλο εξομάλυνσης γραμμικής τάσης περιγράφεται από τις εξισώσεις:

$$e_t = Y_t - F_t$$

$$S_t = S_{t-1} + T_{t-1} + \alpha e_t$$

$$T_t = T_{t-1} + \beta e_t$$

$$F_{t+m} = S_t + mT_t$$

Όπου e δηλώνει το σφάλμα (απόκλιση πραγματικής τιμής από πρόβλεψη), S το επίπεδο, T την τάση, F την πρόβλεψη, t την χρονική περίοδο και m τον χρονικό

ορίζοντα της πρόβλεψης. Η παράμετρος α αποτελεί το συντελεστή εξομάλυνσης για το επίπεδο ενώ η παράμετρος β είναι ο συντελεστής εξομάλυνσης της τάσης. Και οι δύο παράμετροι λαμβάνουν τιμές στο διάστημα $[0,1]$.

Αρχικό επίπεδο και αρχική τάση

Όπως εύκολα αντιλαμβάνεται κανείς από την αναδρομικότητα του μοντέλου, είναι αναγκαίο να οριστεί ένα αρχικό επίπεδο (S_0) και μία αρχική τάση (T_0) προκειμένου να ξεκινήσει η διαδικασία υπολογισμού του μοντέλου πρόβλεψης αρχικά και κατόπιν των ζητούμενων σημειακών προβλέψεων, δεδομένου χρονικού ορίζοντα. Το αρχικό επίπεδο υπολογίζεται όπως και στην απλή εκθετική εξομάλυνση:

- Ο μέσος όρος όλων των παρατηρήσεων
- Ο μέσος όρος των n πρώτων παρατηρήσεων
- Η πρώτη παρατήρηση
- Το σταθερό επίπεδο από το μοντέλο της απλής γραμμικής παλινδρόμησης

Ως αρχική τάση συνήθως χρησιμοποιείται:

- Διαφορά δεύτερης και πρώτης παρατήρησης ($Y_2 - Y_1$)
- Διαφορά n -στης και πρώτης παρατήρησης διαιρεμένες με $n-1$
- Η σταθερά της κλίσης από το μοντέλο της απλής γραμμικής παλινδρόμησης

Επαναλαμβάνεται πως απαιτείται προσεκτική επιλογή τόσο του αρχικού επιπέδου όσο και της αρχικής τάσης καθώς οι τιμές αυτές θα επηρεάσουν το μοντέλο της πρόβλεψης και κατ' επέκταση τις σημειακές προβλέψεις. Η τελική επιλογή συνήθως γίνεται σύμφωνα με τα ποιοτικά χαρακτηριστικά των διαθέσιμων ιστορικών δεδομένων όπου θέλουμε να εφαρμόσουμε το εκάστοτε μοντέλο.

Συντελεστές εξομάλυνσης

Η διαδικασία εύρεσης του βέλτιστου συνδυασμού τιμών για τους συντελεστές εξομάλυνσης βασίζεται στην ελαχιστοποίηση του μέσου τετραγωνικού σφάλματος

(MSE). Η πιο διαδεδομένη μέθοδος υπολογισμού των βέλτιστων παραμέτρων εξομάλυνσης είναι η αναζήτηση αυτών οι οποίοι ελαχιστοποιούν το μέσο τετραγωνικό σφάλμα (MSE), έχοντας θέσει εξαρχής την ακρίβεια της αναζήτησης. Για παράδειγμα, θέτοντας την ακρίβεια στο εκατοστό, και δεδομένου ότι οι παράμετροι μπορούν να λάβουν τιμές στο διάστημα [0,1]. η διαδικασία ολοκληρώνεται μετά από μεγάλο αριθμό επαναλήψεων. Σε κάθε επανάληψη υπολογίζεται η στατιστική ακρίβεια του μοντέλου με τον τρέχοντα συνδυασμό τιμών για τις παραμέτρους μέσω του δείκτη MSE και γίνεται ορισμός των βέλτιστων παραμέτρων σε περίπτωση που υπολογισθεί ελάχιστη ποσότητα MSE, εφαρμόζοντας με τον τρόπο αυτό ένα είδος μάθησης. Ο αλγόριθμος που υλοποιεί την παραπάνω βελτιστοποίηση παρουσιάζεται στον πίνακα-6.1.

```

Dim current_MSE As Single
Dim best_MSE AS Single = 1000000000
Dim best_a As Single = -1
Dim best_b As Single = -1
For a As Single = 0 To 1 Step 0.05
    For b As Single = 0 To 1 Step 0.05
        Current_MSE=Calculate_MSE(a,b)
        If current_MSE<best_MSE Then
            best_MSE=current_MSE
            best_a=a
            best_b=b
        End_If
    Next
Next
Next

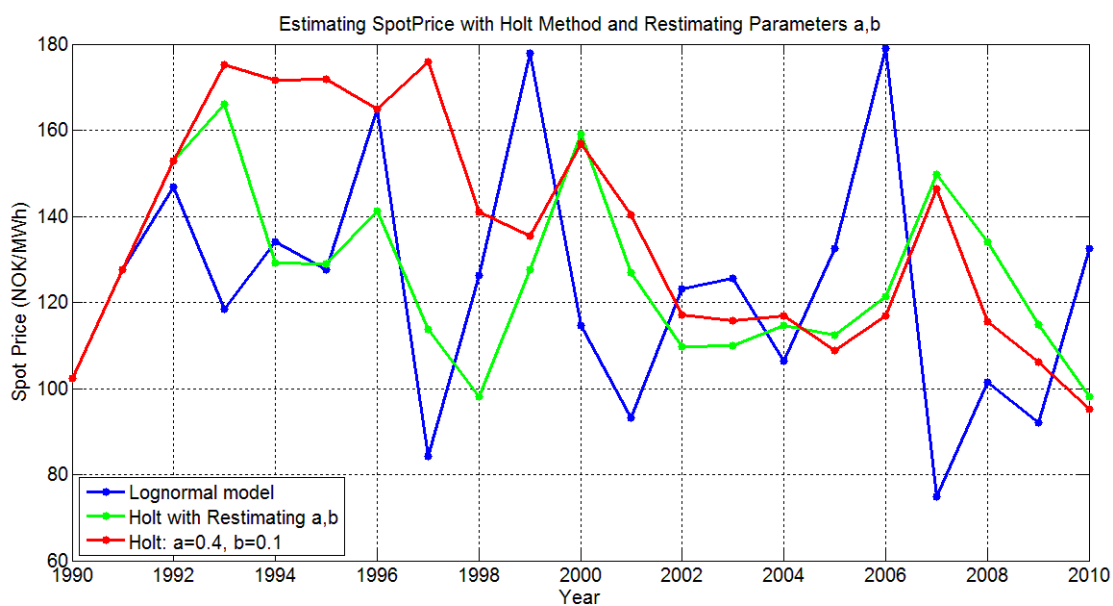
```

Πίνακας-6.1: Αλγόριθμος υπολογισμού βέλτιστων συντελεστών εξομάλυνσης α και β που ελαχιστοποιούν το MSE [2].

6.2.2 Πρόβλεψη τιμών με χρήση του μοντέλου γραμμικής τάσης

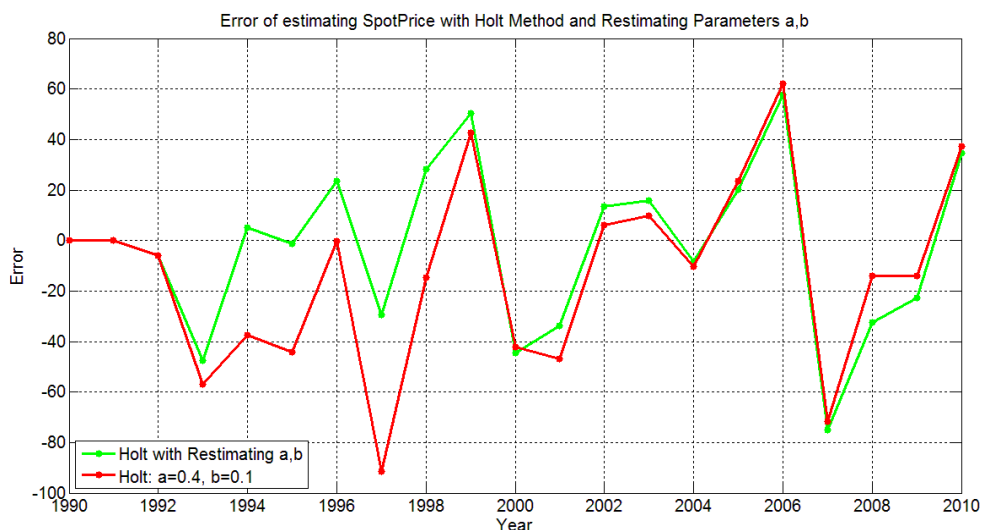
Σε αυτή την ενότητα ακολουθεί η υλοποίηση του μοντέλου γραμμικής τάσης με δύο τρόπους. Στην πρώτη περίπτωση οι συντελεστές εξομάλυνσης α και β λαμβάνουν σταθερές τιμές 0.4 και 0.1, ενώ στην δεύτερη οι τιμές των συντελεστών εξομάλυνσης υπολογίζονται ξανά στο τέλος κάθε περιόδου και χρησιμοποιούνται αυτές που ελαχιστοποιούν το μέσο τετραγωνικό σφάλμα, σύμφωνα με τον αλγόριθμο που περιγράφεται στον πίνακα-6.1. Στην δεύτερη περίπτωση έχουμε φανερά ένα είδος μάθησης, καθώς οι παράμετροι α και β του μοντέλου αναπροσαρμόζονται σε κάθε περίοδο οπότε και γίνεται διαθέσιμη καινούργια πληροφορία. Βέβαια η διαδικασία υπολογισμού των συντελεστών εξομάλυνσης σε κάθε περίοδο αυξάνει κατά πολύ την πολυπλοκότητα του μοντέλου, το οποίο αποτυπώνεται στο χρόνο εκτέλεσης του αλγορίθμου, ο οποίος διαφέρει σημαντικά σε σχέση με την πρώτη περίπτωση. Και στις δύο περιπτώσεις σαν αρχικό επίπεδο και αρχική τάση επιλέχθηκαν το σταθερό επίπεδο και η σταθερά της κλίσης από το μοντέλο της απλής γραμμικής παλινδρόμησης για έναν αριθμό αρχικών παρατηρήσεων.

Στο σχήμα-6.6 παρουσιάζονται οι χρονοσειρές προβλέψεων για τα δύο μοντέλα που αναφέρθηκαν προηγουμένως καθώς και τα πραγματικά δεδομένα



Σχήμα-6.6: Χρονοσειρές πρόβλεψης τιμής spot αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας με χρήση μοντέλου γραμμικής τάσης

Στο σχήμα-6.7 παρουσιάζονται τα σφάλματα των δύο χρονοσειρών πρόβλεψης και στον πίνακα 6.2 τα MSE και MAE για τις δύο μεθόδους.



Σχήμα-6.7: Σφάλματα χρονοσειρών πρόβλεψης

Παρατηρούμε ότι και τα δύο μοντέλα δεν ακολουθούν τη γενική μορφή της καμπύλης τόσο καλά όσο οι μέθοδοι ελαχίστων τετραγώνων της ενότητας 6.1, με έμφαση στις απότομες και ασυνήθιστες μεταβολές της τιμής τις οποίες δεν ακολουθούν καθόλου. Γίνεται λοιπόν φανερή η αδυναμία του μοντέλου των χρονοσειρών να συσχετίσει το υπό πρόβλεψη μέγεθος με τους παράγοντες που επηρεάζουν την τιμή του. Επίσης παρατηρούμε ότι η μέθοδος με επαναπροσδιορισμό των βέλτιστων συντελεστών εξομάλυνσης α και β παρουσιάζει καλύτερα σφάλματα MSE και MAE όπως αναμενόταν, αλλά και οι δύο μέθοδοι παρουσιάζουν πολύ μεγαλύτερες τιμές σε σχέση με τα σφάλματα στα μοντέλα της ενότητας 6.1 ειδικά για τις βέλτιστες παραμέτρους τους λ .

| | Holt a=0.4,b=0.1 | Holt with Restimating a,b |
|------------|-----------------------------------|--|
| MSE | 1550,0000 | 1086,6000 |
| MAE | 30,0628 | 26,1839 |

Πίνακας-6.2: MSE και MAE

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

7.1 Συμβολή της διπλωματικής εργασίας

Στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας ήταν η μοντελοποίηση της τιμής μιας αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας και η εφαρμογή μεθόδων μάθησης για πρόβλεψη της τιμής της αγοράς.

Οι κύριοι άξονες στους οποίους συνεισφέρει η παρούσα διπλωματική εργασία συνοψίζονται στα εξής σημεία:

- Στο πλαίσιο μοντελοποίησης της αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας και συγκεκριμένα στην παρουσίαση ενός πλαισίου μοντελοποίησης βασισμένο στην ανάπτυξη Agent-Based μοντέλων (ABMs).
- Στην μοντελοποίηση της τιμής μιας αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας και πιο συγκεκριμένα στην υλοποίηση μοντελοποίησης για την παραγωγή τιμών για την spot αγορά ηλεκτρικής ενέργειας της Νορβηγίας
- Στον τομέα των αιτιοκρατικών προβλέψεων με την χρήση μεθόδων μάθησης με αναδρομικά ελάχιστα τετράγωνα και αντιπαραβολή με χρήση πρόβλεψης μεθόδου χρονοσειράς.

7.2 Μελλοντικές επεκτάσεις

Οι προτεινόμενες επεκτάσεις της παρούσας διπλωματικής συνοψίζονται ως εξής:

- Χρήση και άλλων μεθόδων μάθησης για πρόβλεψη της τιμής της αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας και σύγκριση αποτελεσμάτων.
- Προσαρμογή και επέκταση των μεθόδων μοντελοποίησης της τιμής της αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας και σε άλλες αγορές, όπως π.χ. η Ελληνική.
- Ενσωμάτωση του μοντέλου παραγωγής τιμών της αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας σε ένα μοντέλο στοχαστικού δυναμικού προγραμματισμού που βελτιστοποιεί κάποιο κριτήριο (π.χ. κριτήριο μεγιστοποίησης κέρδους).

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Gross R, Heptonstall P, Blyth W. (2007). Investment in electricity generation, the role of costs, incentives and risks, London, UK Energy Research Centre
- [2] Φ. Πετρόπουλος & Β. Ασημακόπουλος (2011), *Επιχειρησιακές Προβλέψεις*, Εκδόσεις Συμμετρία, ISBN 978-960-266-333-2
- [3] Klaus-Ole Vogstad (2004). A system dynamics analysis of the Nordic electricity market: The transition from fossil fuelled toward a renewable supply within a liberalized electricity market ISBN 82-471 6890-1 (elektronisk)
- [4] Botterud A. (2003). Long-Term Planning in Restructured Power Systems: Dynamic Modelling of Investments in New Power Generation under Uncertainty, PhD Thesis, Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, Norway. Online: <http://publications.uu.se/ntnu/theses/abstract.xsql?dbid=48>
- [5] Birta, L. G. and Özmizrak, F. N. (1996). A knowledge-based approach for the validation of simulation models: the foundation, ACM Transactions on Modeling and Computer Simulation 6(1): 76–98. 45, 50
- [6] Robinson, S. (2004). Simulation: The Practice of Model Development and Use, Wiley. ISBN 978-0-470-84772-5. 50
- [7] Herder, P. M. (1999). Process Design in a Changing Environment: Identification of Quality Demands Governing the Design Process, PhD thesis, Delft University of Technology, Delft, the Netherlands. 51
- [8] Heath, B., Hill, R. and Ciarallo, F. (2009). A survey of agent-based modeling practices (January 1998 to July 2008), Journal of Artificial Societies and Social Simulation 12(4): 9. 63, 216
- [9] Axelrod, R. (1997b). The Complexity of Cooperation: Agent-Based Models of Competition and Collaboration, Princeton University Press, Princeton, New Jersey. ISBN 0-691-01568-6. 58, 60

- [10] Epstein, J. M. and Axtell, R. (1996). Growing artificial societies: social science from the bottom up, Complex adaptive systems, Brookings Institution Press; MIT Press, Washington, D.C. 63
- [11] Shalizi, C. R. (2006). Chapter 1. methods and techniques of complex systems science: An overview, in T. S. Deisboeck and J. Y. Kresh (eds), Complex Systems Science in Biomedicine, Springer, New York, pp. 33–114. 63
- [12] Chappin, E. J. L. (2011). Simulating Energy Transitions. 42.
- [13] Jennings, N. R. (2000). On agent-based software engineering, Artificial Intelligence 117(2): 277–296. 63
- [14] Georgeff, M. P. and Lansky, A. L. (1987). Reactive reasoning and planning, Proceedings of the Sixth National Conference on Artificial Intelligence (AAAI'87), Seattle, WA, pp. 677– 682. 63
- [15] Weiss, G. (2000). Multiagent systems, a modern approach to distributed artificial intelligence, MIT Press, Cambridge, Mass. ISBN 02-62-73131-2. 63
- [16] Bussmann, S., Jennings, N. R. and Wooldridge, M. (1998). Multiagent Systems for Manufacturing Control, Springer, Berlin. 63
- [17] Nikolic, I., Dijkema, G. P. J., Dam, K. H. v. and Lukszo, Z. (2006). General methodology for action-oriented industrial ecology, IEEE International Conference On Networking, Sensing and Control, Ft. Lauderdale, Florida, USA. 65
- [18] Nikolic, I., Dijkema, G. P. J. and van Dam, K. H. (2009). Understanding and shaping the evolution of sustainable large-scale socio-technical systems – towards a framework for action oriented industrial ecology, in M. Ruth and B. Davidsdottir (eds), The Dynamics of Regions and Networks in Industrial Ecosystems, Edward Elgar. ISBN 978-1-84720-742-5. 14, 65, 73, 193
- [19] van Dam, K. H. (2009). Capturing socio-technical systems with agent-based modelling, PhD thesis, Delft University of Technology, Delft, the Netherlands. ISBN 978-90-79787-12-8.

URL: <https://svn.eeni.tbm.tudelft.nl/KoenVanDam/phd/thesis/KoensPhDThesis.pdf>
9, 13, 58, 65, 73, 75, 193, 236

[20] van Dam, K. H. and Lukszo, Z. (2009). Model factory for socio-technical infrastructure systems, in R. R. Negenborn, Z. Lukszo and J. Hellendoorn (eds), Intelligent Infrastructures, Intelligent Systems, Control and Automation: Science and Engineering, Springer. 65

[21] Fahey, L. and Randall, R. M. (eds) (1998). Learning from the future: competitive foresight scenarios, Business & Economics, John Wiley & Sons, Hoboken, New Jersey. 5, 32, 54, 65, 68

[22] Lejour, A., Veenendaal, P., Verweij, G. and van Leeuwen, N. (2006). WorldScan: a Model for International Economic Policy Analysis, CPB Netherlands Bureau for Economic Policy Analysis, The Hague. 111. 56, 57, 65

[23] Schieritz, N. and Milling, P. M. (2003). Modeling the forest or modeling the trees – a comparison of system dynamics and agent-based simulation, 21st International Conference of the System Dynamics Society, New York. 54, 66

[24] Borshchev, A. and Filippov, A. (2004). From system dynamics and discrete event to practical agent based modeling: Reasons, techniques, tools, The 22nd International Conference of the System Dynamics Society, Oxford, England.

URL: <http://www.xjtek.com/file/142> 54, 66

[25] Kim, J. S. and Kalb, J. W. (1996). Design of experiments: An overview and application example, Medical Device & Diagnostic Industry Magazine 1996(3): 78. 68

[26] Box, G. E., Hunter, W. G. and Hunter, J. S. (2005). Statistics for Experimenters: Design, Innovation, and Discovery, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey. 68

[27] Goupy, J. and Creighton, L. (2007). Introduction to Design of Experiments with JMP Examples, 3rd edn, SAS Press, Cary, NC. 68

- [28] Iman, R. L., Helton, J. C. and Campbell, J. E. (1981). An approach to sensitivity analysis of computer models, part 1. Introduction, input variable selection and preliminary variable assessment, *Journal of Quality Technology* 13(3): 174–183. 68
- [29] McKay, M. D., Conover, W. J. and Beckman, R. J. (1979). A comparison of three methods for selecting values of input variables in the analysis of output from a computer code, *Technometrics* 21: 239–245. 68
- [30] Hardi, P., Zdan, T., “Assessing Sustainable Development: principles in practice”, International Institute for Sustainable Development, 1997.
- [31] Hugney, K., Cullen, R., Kerr, G., Cook, A. “Application of the pressure–state response framework to perceptions reporting of the state of the New Zealand environment”, *Journal of Environmental Management* 70 (2004), 85–93.
- [32] Avinash K. Dixit & Robert S. Pindyck, *Investment under Uncertainty*, Princeton University Press, 1994.
- [33] Blyth, W., “Use of Real Options as a Policy-Analysis Tool”, *Analytical Methods for Energy Diversity & Security: Portfolio Optimization in the Energy Sector: A Tribute to the work of Dr Shimon Awerbuch*, Elsevier, (2008), 69 – 83.
- [34] Gross, R., Blyth, W., Heptonstall, P. “Risks, revenues and investment in electricity generation: Why policy needs to look beyond costs”, *Energy Economics* 32 (2010), 796–80.
- [35] Dixit, A., “Entry and Exit Decisions under Uncertainty”, *Journal of Political Economy* 97, 620–638, 1989
- [36] Frayer, J. and N. Z. Uludere, “What is worth? Applications of Real Options Theory to the Valuation of Generation Assets”, *The Electricity Journal* 14 (8), 40-51, 2001.
- [37] Doug Gardner and Yiping Zhuang, “Valuation of Power Generation Assets: A Real Options Approach”, *Algo Research Quarterly* 9, Vol. 3, No.3, December 2000.

- [38] Botterud, A., “Long-term Planning in Restructured Power Systems. Dynamic Modelling in New Power Generation under Uncertainty”, PhD Thesis, The Norwegian University of Science and Technology (NTNU), 2003.
- [39] Stine Grenaa Jensen and Peter Meibom, “Investments in liberalised power markets: Gas turbine investment opportunities in the Nordic power system”, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems* 30.2 (Feb. 2008), 113–124.
- [40] Weber M. et al., “A multi-actor dynamic integrated assessment model (MADIAM) of induced technological change and sustainable economic growth”, 2005.
- [41] Blyth, W., Yang, M., Bradley, R. “Modelling Investment Risks and Uncertainties with Real Options Approach”, *Climate Policy Uncertainty and Investment Risk*, IEA, 2007. URL: <http://www.iea.org/w/bookshop/add.aspx?id=305>
- [42] Fan, Y., Zhu, L., “A real options based model and its application to China's overseas oil investment decisions”, *Energy Economics* 32 (2010), 627- 637.
- [43] Hickey, E., Lon Carlson, J., Loomis, D., “Issues in the determination of the optimal portfolio of electricity supply options”, *Energy Policy* 38 (2009), 2198-2207.
- [44] Lee, S., Shih, L., “Renewable energy policy evaluation using real option model. The case of Taiwan”, *Energy Economics* 32 (2010), 567-578.
- [45] Stellamszek, F., “Real Options in Strategic Decisions: An empirical case study Analysis of How Companies Integrate Real Options into Strategic Decisions”, (2010).
- [46] Regnier, E., “Oil and Energy price volatility”, *Energy Economics* 29 (2007), 405-427.
- [47] Nassim Taleb, “Dynamic Hedging: Managing Vanilla and Exotic Options”, New York: Wiley, 1997
- [48] Sornette Didier, “Critical Market Crashes”, *Physics Reports* 378, no. 1 (2003): 1–98.

- [49] Fama Eugene, "The Behaviour of Stock-Market Prices". The Journal of Business 38, no. 1 (1965): 34–105.
- [50] Cagan, P., (1956). "The Monetary Dynamics of Hyperinflation", In Friedman, Milton (ed.) "Studies in the Quantity Theory of Money", University of Chicago Press
- [51] Muth, J., F., (1961). "Rational expectations and the theory of price movements", *Econometrica* 29, 315-335
- [52] Sargent, T. J., (1993). *The Conquest of American Inflation*, Princeton University Press, Princeton.
- [53] Taylor, John B. (1977): "Conditions for Unique Solutions in Stochastic Macroeconomic Models with Rational Expectations", *Econometrica*, vol. 45, no. 6, September 1977, pp. 1377-1385.
- [54] Blanchard, Oliver J., and Kahn, Charles M. (1980): "The Solution of Linear Difference Models under Rational Expectations", *Econometrica*, vol. 48, no. 5, July 1980, pp. 1305-1311.
- [55] McCallum, Bennett T. (1999): "Role of the Minimal State Variable Criterion in Rational Expectations Models", *International Tax and Public Finance*, vol. 6, 1999, pp. 621-639.
- [56] McCandless, T. G., (2008) Least squares learning. URL: [http://www.ucema.edu.ar/u/gtm/The ABCs of RBCs/Draft of chapter on Recursive Least Squares Learning.pdf](http://www.ucema.edu.ar/u/gtm/The_ABCs_of_RBCs/Draft_of_chapter_on_Recursive_Least_Squares_Learning.pdf)
- [57] Lindoff, B. (1997) "On the Optimal Choice of the Forgetting Factor in the Recursive Least Squares Estimator," Working paper, Lund Institute of Technology.
- [58] Branch, W., and G. Evans (2005) "A simple recursive forecasting model," *Economic Letters*, 91, p. 158-66.
- [59] Gerlach, P., (2009) Learning Processes of Dynamically Optimizing Heterogeneous Agents, An Examination of Least Squares Learning Approaches by the Example of a Basic Consumption Model

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Λογάριθμο-κανονική κατανομή

Στη θεωρία πιθανοτήτων, μια λογάριθμο-κανονική κατανομή, είναι μια συνεχή κατανομή πιθανότητας μιας τυχαίας μεταβλητής, ο λογάριθμος της οποίας ακολουθεί κανονική κατανομή. Εάν το X είναι μία τυχαία μεταβλητή με κανονική κατανομή, τότε το $Y=\exp(X)$ έχει λογάριθμο-κανονική κατανομή. Ομοίως, αν το Y έχει λογάριθμο-κανονική κατανομή, το $X=\log(Y)$ έχει κανονική κατανομή. Η λογάριθμο-κανονική κατανομή, είναι η κατανομή μιας τυχαίας μεταβλητής που λαμβάνει μόνο θετικές πραγματικές τιμές.

Η κανονική και η λογάριθμο-κανονική κατανομή είναι στενά συνδεδεμένες. Εάν το Y ακολουθεί λογάριθμο-κανονική κατανομή με παραμέτρους μ και σ , τότε το $X=\log(Y)$ ακολουθεί κανονική κατανομή με μέση τιμή μ και τυπική απόκλιση σ . Η μέση τιμή m και η διακύμανση v μιας λογάριθμο-κανονικής μεταβλητής είναι συναρτήσεις των μ και σ και υπολογίζονται ως εξής:

$$m = \exp\left(\mu + \frac{\sigma^2}{2}\right)$$

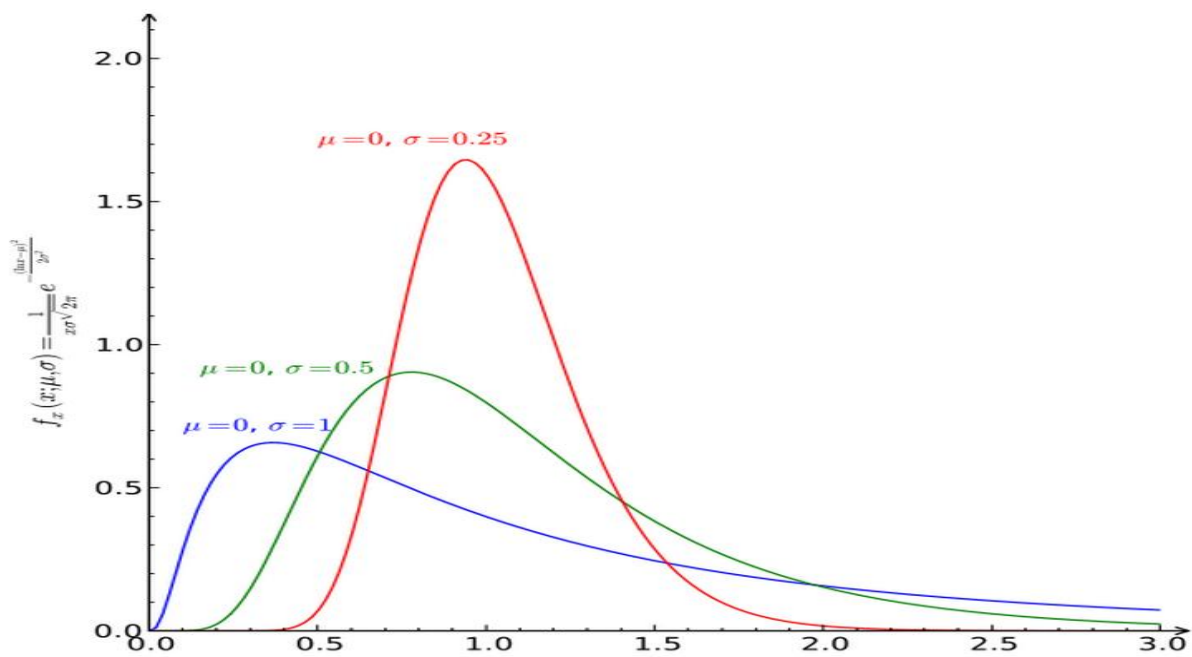
$$v = \exp(2\mu + \sigma^2) (\exp(\sigma^2) - 1)$$

Μια λογάριθμο-κανονική κατανομή με μέση τιμή m και διακύμανση v έχει παραμέτρους:

$$\mu = \log\left(\frac{m^2}{\sqrt{v + m^2}}\right)$$

$$\sigma = \sqrt{\log\left(\frac{v}{m^2} + 1\right)}$$

Η λογάριθμο-κανονική χρησιμοποιείται όταν η τιμή της μεταβλητής που μας ενδιαφέρει πρέπει να είναι θετική, δεδομένου ότι το $\log(Y)$ υπάρχει μόνο όταν το Y είναι θετικό.



0-6.3: Λογάριθμο-κανονικές κατανομές με ίδιες παραμέτρους μ αλλά διαφορετικές παραμέτρους σ^5 .

⁵ «Log-normal distribution», ηλεκτρονική τοποθεσία:
http://en.wikipedia.org/wiki/Lognormal_distribution