



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

ΜΕ ΘΕΜΑ

ΣΤΟΧΑΣΤΙΚΗ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΟΥ ΠΑΓΚΟΣΜΙΟΥ
ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ

ΤΟΥ

Παναγιώτη Β. Φράγκου

Αθήνα, Φεβρουάριος 2016



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

ΣΤΟΧΑΣΤΙΚΗ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΟΥ ΠΑΓΚΟΣΜΙΟΥ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

ΤΟΥ

Παναγιώτη Β. Φράγκου

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

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

.....
Π. Κάπρος,
Καθηγητής ΕΜΠ

.....
Κ. Βουρνάς,
Καθηγητής ΕΜΠ

.....
Γ. Κορρές,
Καθηγητής ΕΜΠ

.....
Γ. Παπαβασιλόπουλος,
Καθηγητής ΕΜΠ

.....
Δ. Διακουλάκη,
Καθηγήτρια ΕΜΠ

.....
Ι. Ψαρράς,
Καθηγητής ΕΜΠ

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

Αθήνα, Φεβρουάριος 2016

.....
Παναγιώτης Β. Φράγκος

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

Copyright © Παναγιώτης Β. Φράγκος, 2016

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

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

Στην Οικογένειά μου και στην Ελευθερία

Πρόλογος

Η διδακτορική διατριβή εκπονήθηκε στη Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Εθνικού Μετσοβίου Πολυτεχνείου, στο εργαστήριο Ενέργειας-Οικονομίας-Περιβάλλοντος (E3MLab), το διάστημα Οκτώβρης 2009-Φεβρουάριος 2016. Φτάνοντας στο τέλος αυτής της διαδρομής, που δεν είναι παρά η αρχή της επόμενης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους ανθρώπους που συνέβαλλαν με ποικίλους τρόπους στην πραγματοποίησή της.

Η διατριβή πραγματοποιήθηκε υπό την επίβλεψη και καθοδήγηση του Καθηγητή κ. Π. Κάπρου, στον οποίο θα ήθελα να εκφράσω τις πιο θερμές μου ευχαριστίες για το ενδιαφέρον που έδειξε στην παρακολούθηση της εξέλιξης της διατριβής, τη συνεχή καθοδήγηση που προσέφερε, την συμπαράστασή του στις δυσκολίες και την συμβολή του στην ολοκλήρωση της διατριβής. Θα ήθελα, να ευχαριστήσω τους Καθηγητές κκ. Βουρνά και Κορρέ που αποτέλεσαν μέλη της τριμελούς συμβουλευτικής επιτροπής. Θα ήθελα, ακόμα, να ευχαριστήσω τον Καθηγητή Γ. Παπαβασιλόπουλο, την Καθηγήτρια Δ. Διακουλάκη, τον Καθηγητή Ι. Ψαρρά και τον Αν. Καθηγητή Σ. Παπαθανασίου για την τιμή που μου έκαναν να είναι μέλη της εφταμελούς επιτροπής εξέτασης της διατριβής.

Θα ήθελα να εκφράσω τις θερμότερες ευχαριστίες μου σε όλα τα μέλη του εργαστηρίου που συνέβαλαν στην επίτευξη αυτού του αποτελέσματος. Ιδιαίτερες ευχαριστίες θα ήθελα να δώσω στον Ν. Κουβαριτάκη για την ιδιαίτερα σημαντική βοήθειά του σε όλα τα στάδια της διατριβής και τις χρήσιμες συμβουλές του. Επιπλέον, ένα ευχαριστώ για τις συζητήσεις και την άψογη συνεργασία αξίζει στους Λ. Παρούσο, Ν. Τασιό, Π. Σίσκο, Κ. Φραγκιαδάκη, Π. Καρκατσούλη, Σ. Τσάνη, Β. Πάνο και Α. De Vita.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους δικούς μου ανθρώπους που παρείχαν αμέριστη υποστήριξη. Θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου που με υποστήριξε όλα αυτά τα χρόνια και με βοήθησε καθοριστικά να φτάσω στην ολοκλήρωση αυτού του κεφαλαίου της ζωής μου. Κλείνοντας θα ήθελα να δώσω ένα μεγάλο ευχαριστώ στην Ελευθερία για την συνεχή στήριξη και την κατανόησή της, καθώς επίσης και φίλους εκτός εργασίας με τα οποία μοιραστήκαμε ευχάριστες στιγμές και δυσάρεστες στιγμές μέσα στα χρόνια και συγκεκριμένα στους Θοδωρή, Παύλο, Μάρω, Μαρίνα και Μάνο.

Αθήνα, Φεβρουάριος 2016,

Παναγιώτης Φράγκος

Περίληψη

Η παρούσα διατριβή αφορά τον σχεδιασμό και την ανάπτυξη ενός πρωτότυπου ολοκληρωμένου ενεργειακού-οικονομικού μοντέλου για το παγκόσμιο ενεργειακό σύστημα στην προοπτική εξέλιξής του μέχρι το 2050, στο οποίο συστηματικά ενσωματώνεται αναπαράσταση της αβεβαιότητας σχετικά με όλες τις παραμέτρους του μοντέλου. Υπάρχουν μοντέλα του παγκόσμιου ενεργειακού συστήματος που έχουν μελετήσει παράγοντες αβεβαιότητας, αλλά οι παράγοντες αυτοί είναι περιορισμένοι τον αριθμό. Η σημαντικότερη πρωτοτυπία της διατριβής έγκειται στο ότι δεν υπάρχει στη βιβλιογραφία μοντέλο ενεργειακού συστήματος το οποίο να ενσωματώνει σε πλήρη έκταση και σε όλες τις παραμέτρους την αβεβαιότητα.

Το θεωρητικό υπόβαθρο του προτεινόμενου μοντέλου συνδυάζει τον κλάδο της ενεργειακής οικονομίας, της μαθηματικής μοντελοποίησης και τη στατιστική, ειδικότερα τους κλάδους της οικονομετρίας (προηγμένες τεχνικές στατιστικής εκτίμησης παραμέτρων μαθηματικών μοντέλων) και της στοχαστικής προσομοίωσης. Η μοντελοποίηση αφορά στις συμπεριφορές καταναλωτών και παραγωγών ενέργειας (όλες οι μορφές) και ηλεκτρικής ενέργειας, καθώς και τη διαμόρφωση οικονομικής ισορροπίας στις ενεργειακές αγορές σε εθνικό και παγκόσμιο επίπεδο. Η ισορροπία προσφοράς και ζήτησης των ενεργειακών προϊόντων επιτυγχάνεται στο μοντέλο μέσω των τιμών αγοράς οι οποίες επηρεάζονται από το κόστος παραγωγής, τους ενεργειακούς πόρους και την εξέλιξη των ενεργειακών τεχνολογιών. Οι αποφάσεις είναι δυναμικές μέσα στον χρόνο και προσομοιώνονται με βάση αναπροσαρμοζόμενες μωπικές προσδοκίες. Οι αλγεβρικές μορφές που προσομοιώνουν τις αποφάσεις των καταναλωτών σχετικά με την επιλογή τεχνολογίας και μορφής ενέργειας βασίζονται στη θεωρία διακριτών επιλογών η οποία είναι κατάλληλη για αναπαράσταση αποφάσεων όταν υφίσταται σημαντική ετερογένεια μεταξύ των αποφασιζόντων. Οι δυναμικές σχέσεις του μοντέλου προσομοιώνουν τη χρονική πορεία των εξοπλισμών ενεργειακών τεχνολογιών που μπορούν να αντικαθίστανται δυναμικά με βάση οικονομικά κριτήρια. Οι αποφάσεις για επενδύσεις σε τεχνολογίες ηλεκτροπαραγωγής εξαρτώνται από την χρήση του υπάρχοντος εξοπλισμού εργοστασίων, επηρεάζονται από την εξέλιξη του κόστους των τεχνολογιών καθώς και από παράγοντες πολιτικής. Η διαμόρφωση των διεθνών τιμών των ορυκτών καυσίμων είναι ενδογενής και εξαρτώνται από την εξέλιξη της παγκόσμιας ζήτησης και προσφοράς και τα κοιτάσματα στα οποία περιλαμβάνονται τα μη συμβατικά κοιτάσματα. Η δυναμική εξέλιξη του συστήματος επηρεάζεται στο μοντέλο από ενεργειακές και κλιματικές πολιτικές, όπως η επιβολή φόρου στις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα, η διαθεσιμότητα νέων ενεργειακών μορφών, οι πολιτικές προώθησης των ΑΠΕ, οι τυχόν προδιαγραφές ενεργειακής απόδοσης τεχνολογιών και η κατασκευή νέων υποδομών. Επηρεάζεται επίσης από την εξέλιξη των τεχνολογιών η οποία είναι ενδογενής στο μοντέλο εξαρτώμενη από τις δαπάνες σε έρευνα και την εκμάθηση (σχέση που συνδέει τη μείωση του κόστους νέων τεχνολογιών με τη διάδοσή τους στην αγορά).

Το μοντέλο επιλύεται σε Η/Υ χρησιμοποιώντας παράλληλη επεξεργασία για την εκτέλεση στοχαστικών πειραμάτων Monte Carlo. Το μοντέλο αναπτύχθηκε και εκτιμήθηκε στατιστικά σε ειδικό περιβάλλον λογισμικού (EViews) το οποίο παρέχει τους πλέον σύγχρονους αλγορίθμους στατιστικής εκτίμησης. Το μοντέλο επιλύεται αριθμητικά με επιτυχία σε πλήρη κλίμακα ώστε να παρέχει προβολές στο μέλλον για το παγκόσμιο ενεργειακό σύστημα και έχει δοκιμασθεί και χρησιμοποιηθεί σε πληθώρα πραγματικών εφαρμογών μεγάλης κλίμακας για ανάγκες της Ευρωπαϊκής Επιτροπής. Στις εφαρμογές δόθηκε ιδιαίτερη έμφαση στην διερεύνηση της σημασίας των κοιτασμάτων των υδρογονανθράκων και της εξέλιξης των διεθνών τιμών στο πλαίσιο της μακροχρόνιας εξέλιξης του ενεργειακού συστήματος των χωρών και περιοχών που περιλαμβάνονται στο μοντέλο. Το μοντέλο εφαρμόστηκε σε πληθώρα μελετών σχετικά με τον μετασχηματισμό του παγκόσμιου ενεργειακού συστήματος για τον μετριασμό της κλιματικής αλλαγής σε μακροπρόθεσμο ορίζοντα μέσω της δραστηρικής μείωσης των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα. Το μοντέλο αναπαριστά αλληλεπιδράσεις μεταξύ κλιματικών και ενεργειακών πολιτικών, διεθνών τιμών ενέργειας και τεχνολογικής προόδου καθώς και τις επιπτώσεις τους σε όλους τους κλάδους της ενέργειας κατά χώρα ή περιοχή, καλύπτοντας το σύνολο του πλανήτη και χρονικό ορίζοντα ως το 2050.

Η κύρια προσπάθεια της έρευνας ήταν η συστηματική ενσωμάτωση της αβεβαιότητας σε όλους τους παράγοντες από τους οποίους εξαρτάται η προβολή στο μέλλον του ενεργειακού συστήματος. Η λεπτομερής κάλυψη της αβεβαιότητας σε ένα ολοκληρωμένο μεγάλης κλίμακας μοντέλο του παγκόσμιου ενεργειακού συστήματος επιτρέπει την ποσοτικοποίηση όλων των αποτελεσμάτων και προβολών με τη μορφή κατανομών πιθανοτήτων που παράγονται ενδογενώς από το μοντέλο και οι οποίες δεν λαμβάνουν προ-καθορισμένη μορφή. Το ενδιαφέρον αποτέλεσμα του μοντέλου είναι ακριβώς η μορφή της κατανομής πιθανοτήτων που το μοντέλο παράγει για κάθε μέγεθος που προβάλλεται στο μέλλον. Η μορφή αυτή μπορεί να αξιολογηθεί από τον χρήστη του μοντέλου ώστε να προκύψουν συμπεράσματα σχετικά με το εύρος της αβεβαιότητας για κάθε προβολή στο μέλλον. Για παράδειγμα το μοντέλο παράγει πιθανολογικές εκτιμήσεις για την εξέλιξη σημαντικών μεταβλητών του συστήματος (π.χ. η πιθανότητα ότι οι παγκόσμιες εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα δεν θα υπερβούν ένα συγκεκριμένο όριο το 2050) ως αποτέλεσμα της λειτουργίας του ενεργειακού συστήματος υπό αβεβαιότητα. Η πληροφορία σχετικά με την αβεβαιότητα των προβολών στο μέλλον αποτελεί κρίσιμη παράμετρο στον σχεδιασμό αποτελεσματικών πολιτικών και επομένως η ολοκληρωμένη ποσοτικοποίηση του κινδύνου που παρέχει το μοντέλο είναι στρατηγικής σημασίας.

Κατά την κατασκευή του στοχαστικού μοντέλου, η κύρια προσπάθεια είναι η ενδεδειγμένη κάλυψη της αβεβαιότητας με την εισαγωγή της στην δημιουργία των κατανομών πιθανοτήτων για όλες τις παραμέτρους εισόδου. Συνεπώς, το μοντέλο ενσωματώνει με ρητό και αμερόληπτο τρόπο τις κυριότερες κατηγορίες αβεβαιοτήτων που αναγνωρίζονται στην διεθνή βιβλιογραφία και συγκεκριμένα την έλλειψη γνώσης για την εξέλιξη των εξωγενών υποθέσεων του μοντέλου, την αβεβαιότητα από ατελή γνώση του συστήματος για την τιμή των παραμέτρων του μοντέλου (παραμετρική

αβεβαιότητα) και την διακύμανση από μεταβλητές που δεν έχουν ενσωματωθεί ρητά στο μοντέλο (υπολείμματα εξισώσεων). Τα παραπάνω εισάγονται με τη μορφή κατανομών πιθανοτήτων. Το αντίστροφο της ισοδύναμης αθροιστικής των κατανομών χρησιμοποιείται στη συνέχεια για να παράγει πειραματικές τιμές με την μέθοδο "Monte Carlo" και το μοντέλο επιλύεται για 2000 πειράματα παρέχοντας κατανομές πιθανοτήτων για ενδογενείς μεταβλητές.

Για την παραγωγή των κατάλληλων κατανομών για τις παραμέτρους και τις υποθέσεις που εισάγονται στο μοντέλο, χρησιμοποιούνται εκτενώς οικονομετρικές εκτιμήσεις που χρησιμοποιούν παρατηρημένες χρονολογικές σειρές, οι οποίες συλλέχθηκαν στο πλαίσιο της διατριβής. Η στατιστική επεξεργασία παρέχει βάση για την επιλογή των κατανομών και για ανάλυση διακύμανσης και συνδιακύμανσης. Οι εκτιμήτριες των παραμέτρων βασίζονται σε μεθόδους αμερόληπτης εκτίμησης με χρήση κατάλληλων μεθόδων παλινδρόμησης και στατιστικού μετασχηματισμού χρονοσειρών. Η ανάλυση δίνει ιδιαίτερη προσοχή στη στατιστική εξάρτηση των παραμέτρων που εισάγονται στο μοντέλο, δεδομένου ότι η συνδιακύμανση διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στον προσδιορισμό της κατανομής των ενδογενών μεταβλητών και ιδιαίτερα των αθροιστικών. Ενώ αναγνωρίζονται οι δυσκολίες στον καθορισμό της μεταβλητότητας των παραμέτρων και του υποκειμενικού χαρακτήρα ορισμένων υποθέσεων, η προσπάθεια στην δημιουργία τόσο του μοντέλου όσο και των κατανομών για τις παραμέτρους βασίστηκε σε αμερόληπτα μέτρα αβεβαιότητας στον βαθμό που τα ιστορικά στοιχεία χρονοσειρών το επιτρέπουν.

Στο πλαίσιο της διατριβής αναπτύχθηκε επίσης και η βάση δεδομένων του μοντέλου σε πλήρη κλίμακα, η οποία είναι ιδιαίτερα εκτενής καθώς περιλαμβάνει το σύνολο των δεδομένων για το παγκόσμιο ενεργειακό σύστημα, τις ενεργειακές τεχνολογίες κάθε είδους, αλλά και τα ιστορικά δεδομένα που χρησιμοποιούνται για οικονομετρικές εκτιμήσεις.

Στο πλαίσιο της διατριβής πραγματοποιήθηκαν εφαρμογές μεγάλης κλίμακας και τα αποτελέσματα έγιναν αντικείμενο ελέγχου από εμπειρογνώμονες, επειδή χρησιμοποιήθηκαν εκτενώς από την Ευρωπαϊκή Επιτροπή. Στις εφαρμογές, δόθηκε ιδιαίτερη έμφαση στις επιπτώσεις εναλλακτικών ενεργειακών και κλιματικών πολιτικών στην εξέλιξη του παγκόσμιου συστήματος ενέργειας καθώς και στην εξέταση της σημασίας των υποθέσεων για τα παγκόσμια κοιτάσματα υδρογονανθράκων για την διαμόρφωση των διεθνών τιμών ενέργειας και μίγματος καυσίμων. Η σημασία της αβεβαιότητας αναλύθηκε εκτενώς και παρήχθησαν αμερόληπτες κατανομές πιθανοτήτων για το σύνολο των ενδογενών μεταβλητών του μοντέλου που μπορούν να δώσουν πιθανοτικές εκτιμήσεις για εναλλακτικά ενδεχόμενα. Η ανάλυση επεκτάθηκε σε στοχαστικά σενάρια κλιματικών πολιτικών και εκμετάλλευσης του σχιστολιθικού αερίου σε παγκόσμια κλίμακα και μελέτησε τις διαφορές στις κατανομές πιθανοτήτων των μεταβλητών και στις πιθανοτικές εκτιμήσεις που προκύπτουν. Τέλος, εξετάστηκε η βέλτιστη κατανομή των επενδύσεων σε τεχνολογίες ηλεκτροπαραγωγής με βάση την ελαχιστοποίηση του κινδύνου υποθέτοντας ότι οι επενδυτές αποστρέφονται τον κίνδυνο. Η μοντελοποίηση αυτή βασίστηκε σε μεθόδους μεικτού ακεραίου γραμμικού

προγραμματισμού και τα δεδομένα για την αβεβαιότητα του κόστους τεχνολογικών επιλογών, των κλιματικών πολιτικών και της τιμής πώλησης της ηλεκτρικής ενέργειας τροφοδοτούνται από το στοχαστικό ενεργειακό μοντέλο.

Το κύριο πλεονέκτημα του μοντέλου έναντι της βιβλιογραφίας, έγκειται στην ολοκληρωμένη και συστηματική αναπαράσταση της αβεβαιότητας που περιβάλλει την εξέλιξη των κύριων συστατικών του ενεργειακού συστήματος και στην ολοκληρωμένη μοντελοποίηση των αλληλεπιδράσεων μεταξύ των ενεργειακών και κλιματικών πολιτικών, της εξέλιξης του παγκόσμιου ενεργειακού συστήματος και διεθνών τιμών πετρελαίου, φυσικού αερίου και άνθρακα. Επίσης εκτενώς μοντελοποιούνται οι αναδράσεις του συστήματος με την ανάπτυξη των αναγκαίων υποδομών και με την τεχνολογική πρόοδο κυρίως για τις τεχνολογίες χαμηλών και μηδενικών εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα.

Λέξεις-κλειδιά: μοντέλο ενεργειακής οικονομίας, ενσωμάτωση αβεβαιότητας σε μοντέλα ενέργειας, αξιολόγηση ενεργειακών πολιτικών, κλιματική αλλαγή, μακροχρόνιος ενεργειακός σχεδιασμός, διαμόρφωση διεθνών τιμών, προσομοιώσεις Monte Carlo, κλιματικές πολιτικές

Πίνακας περιεχομένων

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1	25
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	25
1.1 ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΚΑΙ ΚΛΙΜΑΤΙΚΗ ΑΛΛΑΓΗ	25
1.2 ΣΚΟΠΟΣ ΤΗΣ ΔΙΑΤΡΙΒΗΣ.....	28
1.3 ΠΡΩΤΟΤΥΠΙΑ- ΣΥΝΕΙΣΦΟΡΑ ΔΙΑΤΡΙΒΗΣ	30
1.4 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΟΥ ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΟΥ ΥΠΟΔΕΙΓΜΑΤΟΣ	33
1.5 ΔΟΜΗ ΤΗΣ ΔΙΑΤΡΙΒΗΣ	35
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2	38
2. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ ΤΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ–ΟΙΚΟΝΟΜΙΑΣ ΚΑΙ ΚΡΙΤΙΚΗ ΤΩΝ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΚΩΝ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΕΩΝ	38
2.1 ΜΟΝΤΕΛΑ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ-ΟΙΚΟΝΟΜΙΑΣ.....	38
2.1.1 Μοντέλα προσομοίωσης του ενεργειακού συστήματος	42
2.1.2 Μοντέλα γενικής ισορροπίας	44
2.1.3 Μοντέλα ολοκληρωμένης ανάλυσης.....	45
2.1.4 Αντιμετώπιση της αβεβαιότητας με ντετερμινιστικά μοντέλα	47
2.2 ΣΤΟΧΑΣΤΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ	49
2.2.1 Σημασία των στοχαστικών μοντέλων	49
2.2.2 Ορισμοί της αβεβαιότητας και της πιθανότητας	50
2.2.3 Έννοιες της πιθανότητας.....	52
2.2.4 Μέθοδος Μόντε Κάρλο	57
2.2.5 Είδη στοχαστικών μοντέλων	59
2.3 ΣΤΟΧΑΣΤΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ	60
2.4 ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΕ ΤΗΝ ΜΕΘΟΔΟ ΜΟΝΤΕ ΚΑΡΛΟ ΣΕ ΜΟΝΤΕΛΑ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ-ΟΙΚΟΝΟΜΙΑΣ ..	65
2.4.1 Πρώτες προσπάθειες (1980s)	66
2.4.2 Ανάλυση αβεβαιότητας με μοντέλα γενικής ισορροπίας	66
2.4.3 Ανάλυση αβεβαιότητας με μοντέλα ολοκληρωμένης ανάλυσης	68
2.4.4 Ανάλυση αβεβαιότητας με μοντέλα ενεργειακής ανάλυσης.....	71
2.5 ΚΡΙΤΙΚΗ ΣΤΟΧΑΣΤΙΚΩΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΚΑΙ ΠΡΩΤΟΤΥΠΙΑ ΤΗΣ ΔΙΑΤΡΙΒΗΣ	73
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3	78
3. ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΤΟΥ ΠΑΓΚΟΣΜΙΟΥ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΠΡΟΜΗΘΕΑΣ	78
3.1 ΓΕΝΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΤΟΥ ΠΡΟΜΗΘΕΑΣ.....	78
3.2 ΒΑΣΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΟΥ ΠΡΟΜΗΘΕΑΣ.....	80
3.3 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΖΗΤΗΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ.....	84
3.3.1 Ζήτηση ενέργειας για βιομηχανία και νοικοκυριά.....	84
3.3.2 Ζήτηση ενέργειας για μεταφορές	88
3.4 Ο ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΣ ΥΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ.....	93
3.5 ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΗΛΕΚΤΡΙΣΜΟΥ.....	98
3.6 ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΚΑΙ ΥΠΟΔΟΜΕΣ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ	103

3.7	ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΥΔΡΟΓΟΝΑΝΘΡΑΚΩΝ ΚΑΙ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ ΔΙΕΘΝΩΝ ΤΙΜΩΝ ΟΡΥΚΤΩΝ ΚΑΥΣΙΜΩΝ	105
3.7.1	Κατηγοριοποίηση των κοιτασμάτων υδρογονανθράκων.....	105
3.7.2	Μοντελοποίηση των κοιτασμάτων και η επίδρασή τους στην εξέλιξη των διεθνών τιμών	110
3.8	ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΗ ΠΡΟΟΔΟΣ	114
3.8.1	Μοντελοποίηση της τεχνολογικής προόδου.....	114
3.8.2	Προσαρμογή των τεχνο-οικονομικών στοιχείων στο μοντέλο.....	120
3.9	ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΩΝ ΚΑΙ ΚΛΙΜΑΤΙΚΩΝ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ.....	121
3.9.1	Εσωτερικοποίηση του εξωτερικού κόστους των εκπομπών (φόρος στο διοξείδιο του άνθρακα).....	121
3.9.2	Αναπαράσταση εναλλακτικών ενεργειακών και κλιματικών πολιτικών	124
3.10	ΕΙΔΙΚΑ ΘΕΜΑΤΑ	128
3.10.1	Μοντελοποίηση προεξοφλητικού επιτοκίου	128
3.10.2	Η συνάρτηση επιλογής ενεργειακών τεχνολογιών	130
	ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4	135
4.	ΟΙΚΟΝΟΜΕΤΡΙΚΕΣ ΕΚΤΙΜΗΣΕΙΣ ΚΑΙ ΕΝΣΩΜΑΤΩΣΗ ΤΗΣ ΑΒΕΒΑΙΟΤΗΤΑΣ	135
4.1	ΣΚΟΠΟΣ ΤΗΣ ΣΤΟΧΑΣΤΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ	135
4.2	ΠΗΓΕΣ ΑΒΕΒΑΙΟΤΗΤΑΣ.....	137
4.3	Η ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ MONTE CARLO.....	138
4.3.1	Στατιστικές ιδιότητες της Monte Carlo	139
4.3.2	Εκτίμηση του σφάλματος της μεθόδου	141
4.3.3	Η μέθοδος του Αντίστροφου Μετασχηματισμού.....	143
4.3.4	Εφαρμογή της μεθόδου Monte Carlo στο μοντέλο.....	144
4.4	Η ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ LATIN HYPERCUBE.....	145
4.5	ΟΙΚΟΝΟΜΕΤΡΙΚΗ ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΤΩΝ ΚΑΤΑΝΟΜΩΝ ΠΙΘΑΝΟΤΗΤΩΝ ΓΙΑ ΤΙΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΥΣ ΕΙΣΟΔΟΥ	149
4.5.1	Χρήση οικονομετρικών εκτιμήσεων στο μοντέλο	149
4.5.2	Προσδιορισμός εξισώσεων σε δυναμική μορφή	152
4.5.3	Διανυσματικές αυτοπαλινδρομήσεις και έλεγχος αιτιότητας	157
4.5.4	Έλεγχος συν-ολοκλήρωσης (cointegration).....	159
4.5.5	Παραγωγή στοχαστικών δεδομένων με βάση οικονομετρικές εκτιμήσεις	163
4.6	ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΤΗΣ ΚΑΤΑΝΟΜΗΣ ΤΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ.....	167
4.6.1	Παράδειγμα οικονομετρικής εκτίμησης.....	167
4.6.2	Αναλυτικό παράδειγμα κατασκευής κατανομών παραμέτρων.....	171
4.7	ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΝΣΩΜΑΤΩΣΗΣ ΤΗΣ ΑΒΕΒΑΙΟΤΗΤΑΣ	174
4.7.1	Κατανομές συμβατικών κοιτασμάτων υδρογονανθράκων.....	174
4.7.2	Κοιτάσματα μη συμβατικού φυσικού αερίου.....	175
4.7.3	Κατανομές κλιματικών πολιτικών	180
4.7.4	Στοχαστικές μεταβάσεις.....	184
	ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5	188
5.	ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΕΠΕΝΔΥΣΕΩΝ ΣΤΗΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΗΛΕΚΤΡΙΣΜΟΥ ΥΠΟ ΑΒΕΒΑΙΟΤΗΤΑ	188
5.1	ΣΚΟΠΟΣ ΚΑΙ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ	188
5.2	ΕΝΣΩΜΑΤΩΣΗ ΤΗΣ ΑΒΕΒΑΙΟΤΗΤΑΣ ΣΤΗΝ ΛΗΨΗ ΑΠΟΦΑΣΕΩΝ	191

5.3	ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ.....	193
5.4	ΣΤΟΧΑΣΤΙΚΑ ΠΟΣΟΣΤΑ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΤΩΝ ΕΠΕΝΔΥΣΕΩΝ.....	195
5.5	ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΤΗΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΕΠΕΝΔΥΣΕΩΝ	200
5.5.1	Αλγεβρική αναπαράσταση της μεθοδολογίας.....	200
5.5.2	Μη γραμμικός προσδιορισμός του υποδείγματος	202
5.5.3	Προσδιορισμός προβλήματος με Μικτό Ακέραιο Προγραμματισμό	203
5.5.4	Ανάλυση αποτελεσμάτων	206
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6		213
6.	ΑΙΤΙΟΚΡΑΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ	213
6.1	ΣΚΟΠΟΣ ΤΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ.....	213
6.2	ΤΟ ΣΕΝΑΡΙΟ ΑΝΑΦΟΡΑΣ.....	214
6.2.1	Δημογραφία, μακρο-οικονομία και κλιματικές πολιτικές.....	214
6.2.2	Εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα.....	217
6.2.3	Ζήτηση Ενέργειας και Δομή Ηλεκτροπαραγωγής	218
6.3	ΣΕΝΑΡΙΑ ΥΨΗΛΩΝ-ΧΑΜΗΛΩΝ ΤΙΜΩΝ ΚΑΥΣΙΜΩΝ.....	224
6.3.1	Τιμές καυσίμων στο σενάριο αναφοράς.....	225
6.3.2	Τα σενάρια υψηλών και χαμηλών διεθνών τιμών.....	227
6.3.3	Οι επιπτώσεις των διεθνών τιμών στο ενεργειακό σύστημα.....	230
6.4	ΣΕΝΑΡΙΟ ΜΟΝΟΜΕΡΟΥΣ ΜΕΙΩΣΗΣ ΕΚΠΟΜΠΩΝ ΑΠΟ ΤΗΝ ΕΕ.....	232
6.4.1	Σχεδιασμός του σεναρίου.....	232
6.4.2	Επιπτώσεις στο ενεργειακό σύστημα της Ευρωπαϊκής Ένωσης	233
6.4.3	Επιπτώσεις στην δομή της ηλεκτροπαραγωγής στην Ευρώπη.....	234
6.4.4	Διαρροή άνθρακα σε περιοχές εκτός ΕΕ	236
6.5	ΣΕΝΑΡΙΟ ΠΑΓΚΟΣΜΙΑΣ ΠΡΟΣΠΑΘΕΙΑΣ ΜΕΤΡΙΑΣΜΟΥ ΤΗΣ ΚΛΙΜΑΤΙΚΗΣ ΑΛΛΑΓΗΣ....	238
6.5.1	Σχεδιασμός του σεναρίου.....	238
6.5.2	Επιπτώσεις στο παγκόσμιο ενεργειακό σύστημα	239
6.5.3	Ανάλυση αποσύνθεσης και κόστος μείωσης εκπομπών ανά περιοχή	241
6.6	ΣΕΝΑΡΙΟ ΑΒΕΒΑΙΟΤΗΤΑΣ ΓΙΑ ΤΙΣ ΚΛΙΜΑΤΙΚΕΣ ΠΟΛΙΤΙΚΕΣ	246
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7		258
7.	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΣΤΟΧΑΣΤΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ	258
7.1	ΣΚΟΠΟΣ ΤΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ.....	258
7.2	ΕΞΩΓΕΝΕΙΣ ΜΕΤΑΒΛΗΤΕΣ	259
7.3	ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ ΣΤΟ ΣΕΝΑΡΙΟ ΑΝΑΦΟΡΑΣ	263
7.3.1	Πρωτογενής ζήτηση ενέργειας.....	263
7.3.2	Τελική κατανάλωση ενέργειας στη βιομηχανία και στα νοικοκυριά	269
7.3.3	Κατανάλωση ενέργειας για μεταφορές.....	272
7.4	ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΤΟ ΣΕΝΑΡΙΟ ΑΝΑΦΟΡΑΣ.....	275
7.5	ΕΚΠΟΜΠΕΣ ΔΙΟΞΕΙΔΙΟΥ ΤΟΥ ΑΝΘΡΑΚΑ ΣΤΟ ΣΕΝΑΡΙΟ ΑΝΑΦΟΡΑΣ	281
7.6	ΔΙΕΘΝΕΙΣ ΤΙΜΕΣ ΤΩΝ ΚΑΥΣΙΜΩΝ ΣΤΟ ΣΕΝΑΡΙΟ ΑΝΑΦΟΡΑΣ	284
7.7	ΣΕΝΑΡΙΟ ΦΙΛΟΔΟΞΗΣ ΚΛΙΜΑΤΙΚΗΣ ΠΟΛΙΤΙΚΗΣ	288
7.8	ΣΕΝΑΡΙΟ ΕΚΜΕΤΑΛΛΕΥΣΗΣ ΤΟΥ ΜΗ ΣΥΜΒΑΤΙΚΟΥ ΑΕΡΙΟΥ.....	306
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8		321
8.	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ-ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ	321
8.1	ΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΟ ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΤΗΣ ΔΙΑΤΡΙΒΗΣ.....	321

8.2	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	325
8.2.1	Ο ρόλος των κλιματικών πολιτικών και τεχνολογικών επιλογών για την μετάβαση σε οικονομία χαμηλών εκπομπών.....	325
8.2.2	Επιπτώσεις των κοιτασμάτων υδρογονανθράκων για την εξέλιξη του ενεργειακού συστήματος και των διεθνών τιμών καυσίμων.....	328
8.2.3	Η σημασία της αβεβαιότητας για την προσομοίωση του ενεργειακού συστήματος	329
8.2.4	Εξέλιξη του παγκόσμιου ενεργειακού συστήματος υπό αβεβαιότητα ..	331
8.2.5	Βέλτιστες επενδύσεις στην ηλεκτροπαραγωγή υπό αβεβαιότητα	335
8.3	ΣΥΝΟΨΗ ΚΑΙ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ	336

Κατάλογος γραφημάτων

Γράφημα 3-1: Συνοπτικό διάγραμμα ροής των υπομοντέλων του ΠΡΟΜΗΘΕΑ.....	83
Γράφημα 3-2: Γενική μορφή της καμπύλης S που χρησιμοποιείται εκτενώς στο μοντέλο	89
Γράφημα 3-3: Μοντελοποίηση τεχνολογικού ανταγωνισμού στις επιβατικές μεταφορές.....	91
Γράφημα 3-4: Επισκόπηση του συστήματος υποδομών μεταφοράς και διανομής υδρογόνου όπως αναπαρίσταται στο μοντέλο.....	105
Γράφημα 3-5: Ταξινόμηση των παγκόσμιων κοιτασμάτων υδρογονανθράκων (πηγή: ΔΟΕ).....	106
Γράφημα 3-6: Πιθανότητα εκμετάλλευσης των κατηγοριών κοιτασμάτων υδρογονανθράκων ανάλογα με την κατηγοριοποίησή τους.....	107
Γράφημα 3-7: Διάκριση μεταξύ των πόρων και αποθεμάτων υδρογονανθράκων (πηγή UNECE).....	108
Γράφημα 3-8: Μέσο κόστος παραγωγής πετρελαίου σε διάφορες χώρες σε \$/ βαρέλι (ΔΟΕ [38]).....	109
Γράφημα 3-9: Μηχανισμοί τεχνολογικής προόδου στο μοντέλο	115
Γράφημα 3-10: Επίδραση της ελαστικότητας στην επιλογή νέων ενεργειακών τεχνολογιών	131
Γράφημα 3-11: Μεταβολές στο ποσοστό των τεχνολογιών όταν το κόστος της 1ης αυξάνεται κατά 20% (για διαφορετικές τιμές ελαστικότητας).....	132
Γράφημα 4-1: Διαστρωματοποίηση κανονικής κατανομής σε 5 ισοπίθανα διαστήματα.....	147
Γράφημα 4-2: Αθροιστική συνάρτηση πιθανότητας για δειγματοληψία για 100 πειράματα με 2 εναλλακτικές μεθόδους (τυχαία Monte Carlo και δειγματοληψία με Latin Hypercube).....	148
Γράφημα 4-3: Δειγματοληψία για 2048 πειράματα της τυπικής κανονικής κατανομής με τυχαία μέθοδο Monte Carlo και διαστρωματοποιημένη δειγματοληψία με Latin Hypercube	148
Γράφημα 4-4: Κατανομή της ελαστικότητας της διεθνούς τιμής του πετρελαίου ως προς τον λόγο RP (παγκόσμια αποθέματα προς παραγωγή) που χρησιμοποιείται σαν είσοδος στο μοντέλο.....	166
Γράφημα 4-5: Όροι σφάλματος της οικονομετρικά εκτιμημένης εξίσωσης.....	169
Γράφημα 4-6: Τιμές των παραμέτρων (είσοδος στο μοντέλο) στα 2048 πειράματα Monte Carlo στην εξίσωση τελικής βιομηχανικής ζήτησης στην Β. Αμερική (κατανομές εισόδου).....	173
Γράφημα 4-7: Τιμές των ελαστικότητων τιμής και εισοδήματος στα 2048 πειράματα Monte Carlo (χρησιμοποιούνται σαν είσοδος στο μοντέλο).....	173
Γράφημα 4-8: Τιμές των παγκόσμιων κοιτασμάτων συμβατικού πετρελαίου και αερίου το 2010 που χρησιμοποιούνται ως παράμετροι εισόδου για το έτος βάσης στο μοντέλο.....	175
Γράφημα 4-9: Κατανομή παγκόσμιων πόρων σχιστολιθικού αερίου (σε tcm) που χρησιμοποιούνται ως είσοδος στο έτος βάσης στον ΠΡΟΜΗΘΕΑ.....	178
Γράφημα 4-10: Πιθανότητες εναλλακτικών σεναρίων κλιματικής πολιτικής την περίοδο 2020-2050 (που χρησιμοποιούνται σαν είσοδος στην στοχαστική ανάλυση).....	183
Γράφημα 4-11: Κατανομή των τιμών άνθρακα στην Ευρώπη που χρησιμοποιούνται σαν είσοδος στο μοντέλο το 2050 (σε € 2010/tn CO2).....	184

Γράφημα 4-12: Παράδειγμα υπολογισμού του παράγοντα λ που καθορίζει την στοχαστική μετάβαση μεταξύ εξισώσεων όταν $\sigma=0.005$ και $M = \omega/2$	187
Γράφημα 4-13: Παράδειγμα υπολογισμού του παράγοντα λ που καθορίζει την στοχαστική μετάβαση μεταξύ εξισώσεων όταν $\sigma=0.005$ και $M = \omega 4$	187
Γράφημα 5-1: Γραφική αναπαράσταση καμπυλών pay-off με βάση την μέση απόδοση και τον κίνδυνο (υποθετικά δεδομένα για να καταδείξει την σημασία του ρίσκου στην λήψη αποφάσεων).	195
Γράφημα 5-2: Πιθανότητα αποτυχίας των επενδύσεων να ξεπεράσουν δεδομένες τιμές κατωφλίου ποσοτών απόδοσης (με βάση τα στοχαστικά αποτελέσματα του μοντέλου).....	200
Γράφημα 5-3: Πιθανότητα επίτευξης ποσοστού απόδοσης 6% σαν συνάρτηση της μέσης απόδοσης της επένδυσης (όπως προκύπτει από την ελαχιστοποίηση κινδύνου).....	207
Γράφημα 5-4: Πιθανότητα αποτυχίας σαν συνάρτηση της μέσης απόδοσης της επένδυσης (όπως προκύπτει από πρόβλημα ελαχιστοποίησης κινδύνου για διάφορα όρια αποτυχίας)	208
Γράφημα 5-5: Βέλτιστο χαρτοφυλάκιο επενδύσεων όταν το όριο αποτυχίας είναι 7% (όπως προκύπτει από το πρόβλημα ελαχιστοποίησης κινδύνου)	209
Γράφημα 5-6: Καμπύλη pay-off που απεικονίζει την πιθανότητα αποτυχίας επίτευξης ποσοστού απόδοσης 6% σαν συνάρτηση της πιθανότητας το ποσοστό απόδοσης της επένδυσης να είναι τουλάχιστον 8.5% (από το πρόβλημα ελαχιστοποίησης κινδύνου)	211
Γράφημα 5-7: Βέλτιστο χαρτοφυλάκιο επενδύσεων όταν το όριο αποτυχίας είναι 6% (όπως προκύπτει από το πρόβλημα ελαχιστοποίησης κινδύνου)	211
Γράφημα 5-8: Πιθανότητα αποτυχίας σαν συνάρτηση πιθανότητας επιτυχίας της επένδυσης (όπως προκύπτει από το πρόβλημα ελαχιστοποίησης κινδύνου για διάφορα όρια αποτυχίας).....	212
Γράφημα 6-1: Προέκταση του μοντέλου για την πρωτογενή ζήτηση ενέργειας (σε Gtoe). Οι διακεκομμένες γραμμές παριστάνουν το σενάριο της ΔΟΕ-2013	220
Γράφημα 6-2: Προέκταση του μοντέλου για την παγκόσμια ζήτηση ενέργειας (σε Gtoe)	221
Γράφημα 6-3: Διάγραμμα του ποσοστού ιδιοκτησίας επιβατικών αυτοκινήτων και του ΑΕΠ ανά κάτοικο στις περιοχές του μοντέλου το 2010 (αριστερά) και προέκταση αναφοράς το 2050 (δεξιά)	222
Γράφημα 6-4: Προέκταση του μοντέλου στο σενάριο αναφοράς για τα ποσοστά των τεχνολογιών στην παγκόσμια παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας την περίοδο 2010-2050	224
Γράφημα 6-5: Προεκτάσεις του μοντέλου για την εξέλιξη των διεθνών τιμών των καυσίμων στο σενάριο αναφοράς την περίοδο 2010-2050	226
Γράφημα 6-6: Δείκτες τιμών φυσικού αερίου προς πετρέλαιο και φυσικού αερίου προς άνθρακα στα εναλλακτικά σενάρια (με βάση τις προεκτάσεις του μοντέλου για εναλλακτικά σενάρια).....	230
Γράφημα 6-7: Προεκτάσεις του μοντέλου για τα ποσοστά των καυσίμων στην παγκόσμια ζήτηση ενέργειας στα εναλλακτικά σενάρια (περίοδος 2010-2050).....	231
Γράφημα 6-8: Προεκτάσεις του μοντέλου για τα μερίδια καυσίμων στην ηλεκτροπαραγωγή στην Ευρώπη στα σενάρια που εξετάστηκαν (περίοδος 2010-2050).....	236
Γράφημα 6-9: Αποτελέσματα του μοντέλου για τα ποσοστά των διαφόρων περιοχών στην διαρροή άνθρακα εξαιτίας της μονομερούς κλιματικής δράσης της ΕΕ.....	238

Γράφημα 6-10: Ανάλυση αποσύνθεσης μεταβολών στις εκπομπές στο σενάριο 450 σε σύγκριση με το σενάριο αναφοράς όπως προέκυψαν από το μοντέλο- αθροιστική μείωση εκπομπών (αριστερός άξονας) και κόστος σεναρίου 450 σαν ποσοστό του ΑΕΠ (δεξιός άξονας) 2010-2050	245
Γράφημα 6-11: Σχηματικό διάγραμμα της διαδικασίας σχεδίασης σεναρίων που ακολουθήθηκε.....	251
Γράφημα 6-12: Εξέλιξη της παγκόσμιας τιμής άνθρακα στα σενάρια	253
Γράφημα 6-13: Αθροιστικό κόστος των 5 εναλλακτικών σεναρίων (σε % του παγκόσμιου ΑΕΠ) με βάση τα αποτελέσματα του μοντέλου για την περίοδο 2010-2050.....	255
Γράφημα 7-1: Κατανομή των τιμών άνθρακα στην Ευρώπη που χρησιμοποιούνται σαν είσοδος στο μοντέλο το 2050 (σε € 2010/tn CO ₂).....	263
Γράφημα 7-2: Κατανομή της μέσης ετήσιας βελτίωσης της παγκόσμιας ενεργειακής έντασης του ΑΕΠ (σε %) με βάση την στοχαστική ανάλυση του μοντέλου στο σενάριο αναφοράς	265
Γράφημα 7-3: Πιθανότητα του έτους στο οποίο η Κίνα θα ξεπεράσει τις αθροιστικές τιμές της Βόρειας Αμερικής και της Ευρώπης με βάση την στοχαστική ανάλυση με το μοντέλο.....	266
Γράφημα 7-4: Στοχαστικές προβολές του μοντέλου για τις κατανομές των ποσοστών των καυσίμων στο παγκόσμιο ενεργειακό μίγμα το 2050 στο σενάριο αναφοράς (σε %).....	269
Γράφημα 7-5: Ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας από νοικοκυριά κατά κεφαλή στις περιοχές του μοντέλου σε kWh ανά κάτοικο. Οι διακεκομμένες γραμμές αναπαριστούν τα 5% και 95% εκατοστημόρια της κατανομής των αποτελεσμάτων όπως προέκυψαν από το σεναρίου αναφοράς με το μοντέλο.....	271
Γράφημα 7-6: Στοχαστικές προβολές του μοντέλου για το ποσοστό ιδιοκτησίας αυτοκινήτων ανά χίλιους κατοίκους στην Ευρώπη και στην Κίνα (οι διακεκομμένες γραμμές αναπαριστούν τα άνω και κάτω 5% εκατοστημόρια της κατανομής των αποτελεσμάτων του μοντέλου)	274
Γράφημα 7-7: Εξέλιξη της παγκόσμιας παραγωγής ηλεκτρισμού σε TWh με βάση στοχαστική ανάλυση (οι διακεκομμένες γραμμές αναπαριστούν άνω και κάτω 5% εκατοστημόρια κατανομής).....	277
Γράφημα 7-8: Κατανομές των αποτελεσμάτων του μοντέλου για τα ποσοστά των τεχνολογιών ΑΠΕ στην παγκόσμια ηλεκτροπαραγωγή το 2050 στο σενάριο αναφοράς (σε %).....	280
Γράφημα 7-9: Στοχαστικές προβολές του μοντέλου για τις παγκόσμιες εκπομπές CO ₂ την περίοδο 2010-2050 στο σενάριο αναφοράς	283
Γράφημα 7-10: Στοχαστική προβολή του μοντέλου στο σενάριο αναφοράς για την κατανομή της ατμοσφαιρικής συγκέντρωσης CO ₂ το 2050 (σε ppm).....	284
Γράφημα 7-11: Κατανομή του λόγου των διεθνών τιμών ενέργειας (αριστερό σχήμα: πετρέλαιο προς αέριο, δεξιό: αέριο προς άνθρακα) όπως προέκυψαν από το στοχαστικό μοντέλο το 2050.....	286
Γράφημα 7-12: Στοχαστικές προβολές του μοντέλου για τις κατανομές των παγκόσμιων εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα στα δυο εναλλακτικά σενάρια σε Gtn CO ₂	290
Γράφημα 7-13: Στοχαστικές προβολές του μοντέλου για την εξέλιξη των παγκόσμιων εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα στα δυο εναλλακτικά σενάρια σε Gtn CO ₂ (οι διακεκομμένες γραμμές αναπαριστούν τα 10% εκατοστημόρια).....	291
Γράφημα 7-14: Πιθανότητα μείωσης των παγκόσμιων εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα από τα επίπεδα του 2010 με βάση την στοχαστική ανάλυση του μοντέλου για τα 2 εναλλακτικά σενάρια	292

Γράφημα 7-15: Κατανομή πιθανοτήτων για την ατμοσφαιρική συγκέντρωση CO ₂ το 2050 όπως προέκυψε από στοχαστική ανάλυση (οι διαδεδομένες γραμμές αναπαριστούν το σενάριο 450)	293
Γράφημα 7-16: Γράφημα αθροιστικής πιθανότητας της ετήσιας βελτίωσης της μέσης ενεργειακής έντασης του ΑΕΠ σε παγκόσμιο επίπεδο στα 2 σενάρια με βάση τα αποτελέσματα του μοντέλου	294
Γράφημα 7-17: Στοχαστικές προβολές του μοντέλου για τις κατανομές των ποσοστών των καυσίμων στο παγκόσμιο ενεργειακό μίγμα το 2050 στο σενάριο κλιματικής πολιτικής (σε %)	295
Γράφημα 7-18: Γράφημα αθροιστικής πιθανότητας της μέσης ετήσιας βελτίωσης της παγκόσμιας ενεργειακής έντασης στα νοικοκυριά στα 2 σενάρια με βάση τα αποτελέσματα του μοντέλου	296
Γράφημα 7-19: Κατανομή του ποσοστού των μη συμβατικών στον παγκόσμιο στόλο αυτοκινήτων το 2050 στο σενάριο κλιματικής πολιτικής όπως προέκυψε από το στοχαστικό μοντέλο	297
Γράφημα 7-20: Αθροιστική πιθανότητα του λόγου κόστους των ηλεκτρικών αυτοκινήτων σε σύγκριση με τα αυτοκίνητα diesel στην ΕΕ το 2050 στα 2 σενάρια με βάση τα αποτελέσματα του μοντέλου	298
Γράφημα 7-21: Στοχαστικές προεκτάσεις του μοντέλου για το ποσοστό ΑΠΕ στην παγκόσμια παραγωγή ηλεκτρισμού (εξαιρείται η υδροηλεκτρική). Οι διακεκομμένες γραμμές αναπαριστούν τα άνω και κάτω 5% εκατοστημόρια της κατανομής πιθανοτήτων όπως προέκυψε από το στοχαστικό μοντέλο.	299
Γράφημα 7-22: Συσχετίσεις της διεύθυνσης τεχνολογιών στην ηλεκτροπαραγωγή στην Κίνα με την τιμή εκπομπών άνθρακα το 2030 με βάση το στοχαστικό μοντέλο για το σενάριο κλιματικής πολιτικής	300
Γράφημα 7-23: Αθροιστική πιθανότητα του λόγου κόστους του συνδυασμένου κύκλου αερίου προς άνθρακα στην ΕΕ το 2050 στα 2 σενάρια με βάση τα αποτελέσματα του μοντέλου	301
Γράφημα 7-24: Κατανομή αθροιστικού κόστους 2010-2050 του παγκόσμιου ενεργειακού συστήματος στα 2 σενάρια (σαν % του ΑΕΠ) όπως προέκυψε από την ανάλυση με το στοχαστικό μοντέλο.....	304
Γράφημα 7-25: Συσχέτιση μεταξύ της τιμής του ηλεκτρισμού για τη βιομηχανία στην ΕΕ, της διεθνούς τιμής αερίου (αριστερό γράφημα) και της τιμής εκπομπών άνθρακα (δεξιά).....	305
Γράφημα 7-26: Κατανομή τιμής ηλεκτρισμού στην ΕΕ για βιομηχανικές χρήσεις όπως προέκυψε από την ανάλυση με το στοχαστικό μοντέλο (σε € 2010/toe).....	305
Γράφημα 7-27: Κατανομή των παγκόσμιων κοιτασμάτων σχιστολιθικού αερίου (δεδομένα εισόδου στο μοντέλο το έτος βάσης)	307
Γράφημα 7-28: Κατανομή του συντελεστή ανάκτησης σχιστολιθικού αερίου το 2050, όπως προκύπτει από την στοχαστική ανάλυση του PROMHΘΕΑ στο σενάριο μη συμβατικού αερίου	308
Γράφημα 7-29: Στοχαστικές προβολές του μοντέλου για την διάμεσο της διεθνούς τιμής αερίου για τα δυο εναλλακτικά σενάρια την περίοδο 2010-2050 (10% εκατοστημόρια με διακεκομμένη γραμμή)..	309
Γράφημα 7-30: Στοχαστικές προβολές του μοντέλου για την τιμή εισαγωγής αερίου στην Ευρώπη στα δυο εναλλακτικά σενάρια (σε \$ 2010/ boe).....	310
Γράφημα 7-31: Στοχαστικές προβολές του μοντέλου για το ποσοστό φυσικού αερίου στη παγκόσμια ζήτηση ενέργειας στο σενάριο αναφοράς (πάνω γράφημα) και στο σενάριο μη συμβατικού αερίου (κάτω διάγραμμα).....	311
Γράφημα 7-32: Διαστήματα εμπιστοσύνης για την παγκόσμια ζήτηση υδρογονανθράκων το 2050 όπως προέκυψαν από την στοχαστική ανάλυση του μοντέλου στα δυο σενάρια.....	312

<i>Γράφημα 7-33: Μέσα ποσοστά των τεχνολογιών στο παγκόσμιο μίγμα ηλεκτροπαραγωγής το 2030 και το 2050 (με βάση την στοχαστική ανάλυση με το μοντέλο για τα σενάρια που εξετάστηκαν).....</i>	<i>314</i>
<i>Γράφημα 7-34: Διαστήματα εμπιστοσύνης για τα ποσοστά τεχνολογιών στην παγκόσμια παραγωγή ηλεκτρισμού το 2050 όπως προέκυψαν από την στοχαστική ανάλυση στα δυο σενάρια.....</i>	<i>315</i>
<i>Γράφημα 7-35: Κατανομές ποσοστών φυσικού αερίου στην παγκόσμια ηλεκτροπαραγωγή το 2050 με βάση τη στοχαστική ανάλυση με το μοντέλο (πάνω: σενάριο αναφοράς, κάτω: σενάριο αερίου)</i>	<i>316</i>
<i>Γράφημα 7-36: Πιθανότητα το ποσοστό του αερίου να ξεπεράσει τα άλλα καύσιμα όπως προέκυψε από την στοχαστική ανάλυση του μοντέλου για τα δυο εξεταζόμενα σενάρια το 2030 και το 2050.....</i>	<i>317</i>
<i>Γράφημα 7-37: Κατανομή τιμής ηλεκτρικής ενέργειας στην ΕΕ για βιομηχανικές χρήσεις το 2050 στα δυο σενάρια που εξετάστηκαν.....</i>	<i>318</i>
<i>Γράφημα 7-38: Πιθανότητα οι παγκόσμιες εκπομπές CO₂ στο σενάριο του μη συμβατικού αερίου να ελαττωθούν σε σύγκριση με το σενάριο αναφοράς την περίοδο 2010-2050 (όπως προέκυψε από τα στοχαστικά αποτελέσματα του μοντέλου).....</i>	<i>319</i>

Κατάλογος πινάκων

Πίνακας 3-1: Δείκτες, βασικές μεταβλητές και παράμετροι του μοντέλου	92
Πίνακας 3-2: Επισκόπηση των τεχνολογιών παραγωγής ηλεκτρισμού του μοντέλου	100
Πίνακας 3-3 Επισκόπηση των τεχνολογιών παραγωγής ηλεκτρισμού του μοντέλου	104
Πίνακας 3-4: Ενεργειακές τεχνολογίες που ανήκουν σε ένα σύμπλεγμα -cluster	117
Πίνακας 3-5: Ο πίνακας τεχνολογικών συμπλεγμάτων W που χρησιμοποιείται στο μοντέλο	118
Πίνακας 3-6: Ρυθμοί εκμάθησης για τις σημαντικότερες τεχνολογίες ηλεκτροπαραγωγής	119
Πίνακας 3-7: Κεφαλαιουχικό κόστος τεχνολογιών ηλεκτροπαραγωγής το 2010	120
Πίνακας 3-8: Υποθέσεις για τα προεξοφλητικά επιτόκια ανά τομέα στον ΠΡΟΜΗΘΕΑ	129
Πίνακας 4-1: Απλοποιημένο παράδειγμα δειγματοληψίας Latin Hypercube για δυο μεταβλητές	146
Πίνακας 4-2: Οριακές τιμές για τον έλεγχο Dickey-Fuller	160
Πίνακας 4-3: Οριακές τιμές για τον έλεγχο υπόθεσης μη συνολοκλήρωσης	162
Πίνακας 4-4: Χαρακτηριστικά των εναλλακτικών μεθόδων παραγωγής τυχαίων αριθμών	165
Πίνακας 4-5: Εκτίμηση εξίσωσης βιομηχανικής ζήτησης ηλεκτρισμού στην Β. Αμερική	167
Πίνακας 4-6: Συσχετίσεις μεταξύ των εκτιμητριών των παραμέτρων της εξίσωσης	168
Πίνακας 4-7: Αποτελέσματα του ελέγχου ετεροσκεδαστικότητας των σφαλμάτων White	170
Πίνακας 4-8: Πίνακας διακύμανσης-συνδιακύμανσης V της εκτιμημένης εξίσωσης	171
Πίνακας 4-9: Πίνακας $V1$ που προκύπτει από κανονικοποίηση του πίνακα V	171
Πίνακας 4-10: Πίνακας $V2$, i για την κατασκευή κατάλληλων κατανομών παραμέτρων	172
Πίνακας 4-11: Πίνακας Pi (μετά από Cholesky decomposition)	172
Πίνακας 4-12: Πόροι σχιστολιθικού, έγκλειστου και συμβατικού αερίου (πηγή: GEA, 2012)	177
Πίνακας 5-1: Αβέβαιοι παράγοντες στο πρόβλημα ελαχιστοποίησης κινδύνου επενδύσεων σε τεχνολογίες ηλεκτροπαραγωγής	197
Πίνακας 5-2: Στατιστικά στοιχεία των ποσοστών απόδοσης των τεχνολογιών (σε %) όπως προκύπτουν από την στοχαστική ανάλυση του μοντέλου	198
Πίνακας 5-3: Συσχετίσεις μεταξύ των ποσοστών απόδοσης των εναλλακτικών τεχνολογιών ηλεκτροπαραγωγής (όπως προκύπτουν από την στοχαστική ανάλυση του ΠΡΟΜΗΘΕΑ)	198
Πίνακας 6-1: Προεκτάσεις για την αύξηση του ΑΕΠ μέχρι το 2050 (% ετήσια αύξηση) που χρησιμοποιούνται σαν είσοδος στο μοντέλο	215
Πίνακας 6-2: Υποθέσεις εισόδου για τις κλιματικές πολιτικές στο σενάριο αναφοράς	216
Πίνακας 6-3: Προέκταση σεναρίου αναφοράς του μοντέλου για εκπομπές CO_2 (σε Gtn CO_2)	218
Πίνακας 6-4: Προέκταση του μοντέλου στο σενάριο αναφοράς για την εξέλιξη της παγκόσμιας τελικής ζήτησης ενέργειας ανά τομέα και ανά καύσιμο την περίοδο 2010-2050 (σε Mtoe και ποσοστά)	221

Πίνακας 6-5: Υποθέσεις για τα παγκόσμια κοιτάσματα πετρελαίου και φυσικού αερίου το έτος βάσης στα εναλλακτικά σενάρια.....	227
Πίνακας 6-6: Προεκτάσεις του μοντέλου για τις διεθνείς τιμές υδρογονανθράκων στα σενάρια υψηλών και χαμηλών τιμών την περίοδο 2010-2050	229
Πίνακας 6-7: Ενεργειακοί και κλιματικοί δείκτες για το 2030 και το 2050 (όπως προκύπτουν από τις προεκτάσεις του μοντέλου για τα σενάρια που εξετάστηκαν).....	234
Πίνακας 6-8: Αποτελέσματα του μοντέλου για τις διεθνείς τιμές καυσίμων (ποσοστιαίες αποκλίσεις του σεναρίου δράσης της ΕΕ από το σενάριο αναφοράς)	237
Πίνακας 6-9: Κυριότερες επιπτώσεις του σεναρίου 450 στο παγκόσμιο ενεργειακό σύστημα σε σύγκριση με το σενάριο αναφοράς (όπως ποσοτικοποιήθηκαν με το μοντέλο).....	241
Πίνακας 6-10: Κατανομή των παγκόσμιων αθροιστικών εκπομπών ανά χρονική περίοδο στα σενάρια τέλει πληροφόρησης (σε Gtn εκπομπών CO ₂).....	250
Πίνακας 6-11: Κατανομή των παγκόσμιων αθροιστικών εκπομπών ανά χρονική περίοδο στα σενάρια ατελούς πληροφόρησης (σε Gtn) με βάση τις εναλλακτικές υποθέσεις.....	251
Πίνακας 6-12: Μέσος Παγκόσμιος φόρος άνθρακα στα 10 εναλλακτικά σενάρια/ενδεχόμενα όπως προέκυψε από την ανάλυση με το μοντέλο ΠΡΟΜΗΘΕΑΣ (σε €/tn CO ₂).....	252
Πίνακας 6-13: Κόστος του παγκόσμιου ενεργειακού συστήματος (σαν % του παγκόσμιου ΑΕΠ) με βάση τα αποτελέσματα του μοντέλου για τα εναλλακτικά σενάρια που μελετήθηκαν	254
Πίνακας 7-1: Ταξινόμηση των σημαντικότερων ενδογενών μεταβλητών και παραμέτρων εισόδου (στοχαστικές) που χρησιμοποιούνται στο στοχαστικό μοντέλο	260
Πίνακας 7-2: Στατιστικά στοιχεία των υποθέσεων για αύξηση του ΑΕΠ/κάτοικο (περίοδος 2010-2050)	262
Πίνακας 7-3: Μερίδια περιοχών στην παγκόσμια πρωτογενή ζήτηση ενέργειας το 2030 και το 2050 (αποτελέσματα στοχαστικής ανάλυσης με το μοντέλο).....	264
Πίνακας 7-4: Στατιστικά στοιχεία για τον ετήσιο ρυθμό μεταβολής του δείκτη ενεργειακής έντασης του ΑΕΠ (στοχαστικές προβολές του μοντέλου) στις περιοχές την περίοδο 2010-2050.....	264
Πίνακας 7-5: Ποσοστά ενεργειακών μορφών στην παγκόσμια ζήτηση ενέργειας το 2030 και το 2050 με βάση τις στοχαστικές προεκτάσεις του μοντέλου	267
Πίνακας 7-6: Στοχαστικές προεκτάσεις του μοντέλου στο σενάριο αναφοράς για τα μερίδια των καυσίμων στην παγκόσμια ζήτηση ενέργειας στη βιομηχανία το 2050 (σε %).....	270
Πίνακας 7-7: Στοχαστικές προβολές του μοντέλου για τα ποσοστά των ενεργειακών τεχνολογιών στην παγκόσμια ωφέλιμη ζήτηση ενέργειας για οικιακή θέρμανση το 2030 και το 2050.....	272
Πίνακας 7-8: Στατιστικά στοιχεία για την μέση αύξηση της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας ανά περιοχή με βάση τα στοχαστικά αποτελέσματα του μοντέλου (σε %).....	276
Πίνακας 7-9: Προεκτάσεις του μοντέλου για τα ποσοστά εναλλακτικών τεχνολογιών στην παγκόσμια παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας το 2030 και το 2050 (σε %).....	278
Πίνακας 7-10: Συντελεστής συσχέτισης μεταξύ των κατανομών των ποσοστών στην παγκόσμια ηλεκτροπαραγωγή το 2050 (%) όπως προέκυψαν από την στοχαστική ανάλυση του μοντέλου	281

<i>Πίνακας 7-11: Στατιστικά στοιχεία για τις στοχαστικές προβολές του μοντέλου για τις διεθνείς τιμές των ορυκτών καυσίμων (σε € 08 ανά βαρέλι ισοδυνάμου πετρελαίου)</i>	<i>285</i>
<i>Πίνακας 7-12: Πίνακας συσχέτισης μεταξύ των διεθνών τιμών των καυσίμων και του παγκόσμιου ΑΕΠ το 2050 όπως προκύπτουν από την στοχαστική ανάλυση του ΠΡΟΜΗΘΕΑ</i>	<i>287</i>
<i>Πίνακας 7-13: Στοχαστικές προβολές του μοντέλου για το ποσοστό των μη συμβατικών κοιτασμάτων στην παγκόσμια παραγωγή πετρελαίου το 2030 και το 2050</i>	<i>287</i>
<i>Πίνακας 7-14: Στατιστικά στοιχεία για τις τιμές άνθρακα που χρησιμοποιούνται σαν είσοδος στο μοντέλο στις περιοχές του μοντέλου στα εναλλακτικά σενάρια (€ 2010/tn CO₂)</i>	<i>289</i>
<i>Πίνακας 7-15: Στατιστικά στοιχεία για την παγκόσμια κατανάλωση υδρογονανθράκων (σε Mtoe) στα εναλλακτικά σενάρια που εξετάστηκαν με το μοντέλο το 2030 και το 2050.....</i>	<i>294</i>
<i>Πίνακας 7-16: Στοχαστικές προεκτάσεις του μοντέλου για τις διεθνείς τιμές των υδρογονανθράκων στα δυο εξεταζόμενα σενάρια το 2030 και το 2050</i>	<i>303</i>
<i>Πίνακας 7-17: Παγκόσμια ζήτηση για υδρογονάνθρακες με βάση τις στοχαστικές προεκτάσεις του μοντέλου στα δυο εναλλακτικά σενάρια το 2030 και το 2050 (σε Mtoe).....</i>	<i>310</i>
<i>Πίνακας 7-18: Στοχαστικές προεκτάσεις του μοντέλου για τις διεθνείς τιμές των υδρογονανθράκων στα 2 εναλλακτικά σενάρια την περίοδο 2010-2050.....</i>	<i>313</i>
<i>Πίνακας 7-19: Πιθανότητα το κόστος του συνδυασμένου κύκλου αερίου να είναι χαμηλότερο από ανταγωνιστικές τεχνολογίες με βάση τα στοχαστικά αποτελέσματα του μοντέλου</i>	<i>317</i>

Κεφάλαιο 1

1. Εισαγωγή

1.1 Ενεργειακό σύστημα και κλιματική αλλαγή

Το 2007 η διακυβερνητική επιτροπή για την αλλαγή του κλίματος- IPCC [2] ανέλυσε ένα ιδιαίτερα μεγάλο πλήθος ερευνών και επιστημονικών εργασιών και μελετών και τεκμηρίωσε ότι υψηλό ποσοστό της παρατηρούμενης αύξησης της μέσης θερμοκρασίας της γης από τα μέσα του 20ου αιώνα και έπειτα οφείλεται στην αύξηση των παγκόσμιων εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου και συγκεκριμένα του διοξειδίου του άνθρακα CO₂ που προκύπτει από ανθρωπογενείς δραστηριότητες. Η μη έγκαιρη και αποτελεσματική αντιμετώπιση του φαινομένου της κλιματικής αλλαγής ενδέχεται να έχει σημαντικές επιπτώσεις για τις ανθρώπινες κοινωνίες (υγεία, μεταναστευτικές ροές), το περιβάλλον (απώλεια βιοποικιλότητας, ρύπανση, αύξηση της στάθμης της θάλασσας, υποβάθμιση των οικοσυστημάτων, ξηρασία, αύξηση των ακραίων καιρικών φαινομένων κ.α.) και την οικονομία (γεωργία, αλιεία, υποδομές, ποιότητα και διαθεσιμότητα των υδάτινων πόρων, καταστροφική επενδύσεων και υποδομών).

Κατά την τελευταία εικοσαετία, η αντιμετώπιση της κλιματικής αλλαγής έχει αναδειχθεί σε ένα από τα σημαντικότερα παγκόσμια προβλήματα με τις διεθνείς διαπραγματεύσεις να διεξάγονται στα πλαίσια του ΟΗΕ με βάση την Σύμβαση-Πλαίσιο των Ηνωμένων Εθνών για την Κλιματική Αλλαγή UNFCCC (United Nations Framework Convention on Climate Change). Σημαντικές διεθνείς πρωτοβουλίες για την μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου αποτελούν το Πρωτόκολλο του Κιότο που υπεγράφη το 1997 [1] καθώς και οι δεσμεύσεις των χωρών για την περίοδο μέχρι το 2020 στην συνδιάσκεψη της Κοπεγχάγης το 2009. Το Πρωτόκολλο του Κιότο αποτελεί μια διεθνή συνθήκη που έθεσε δεσμευτικές υποχρεώσεις στις ανεπτυγμένες οικονομίες ώστε να μειώσουν τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου για την αντιμετώπιση της κλιματικής αλλαγής και του φαινομένου του θερμοκηπίου. Σήμερα, η συγκεκριμένη προβληματική είναι στο επίκεντρο των διεθνών διαπραγματεύσεων για το κλίμα καθώς έχει αποφασιστεί ότι οι κλιματικές δεσμεύσεις των χωρών χρειάζεται να ενισχυθούν για την περίοδο μετά το 2020 [3] με συγκεκριμένους ποσοτικούς στόχους στην συνδιάσκεψη του Παρισιού τον Δεκέμβρη του 2015.

Η Ευρωπαϊκή Ένωση (Ε.Ε.) αποτελεί την πλέον φιλόδοξη περιοχή του κόσμου στο ζήτημα αντιμετώπισης της κλιματικής αλλαγής μέσω του περιορισμού των

εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα. Μέσω του προγράμματος δράσης για το περιβάλλον η Ε.Ε. υιοθέτησε συγκεκριμένους κλιματικούς στόχους και δεσμεύτηκε να μειώσει τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου κατά 8% την περίοδο 2008-2012 σε σχέση με τα επίπεδα του 1990 (στόχος ο οποίος επετεύχθη). Επιπρόσθετα τον Ιανουάριο του 2009 η Ευρωπαϊκή επιτροπή υιοθέτησε ένα πακέτο για τις κλιματικές πολιτικές μέχρι το 2020 [48], σύμφωνα με το οποίο η Ε.Ε. αναλαμβάνει να μειώσει τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου κατά 20% στην περίοδο 1990-2020 και να αυξήσει το ποσοστό των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ) στην συνολική ακαθάριστη κατανάλωση ενέργειας στο 20% μέχρι το 2020. Επιπλέον, η Ε.Ε. έχει διακηρύξει τον μακροπρόθεσμο στόχο της για μείωση των αερίων του θερμοκηπίου κατά τουλάχιστον 80% μέχρι το 2050 και έχει πραγματοποιήσει αναλύσεις για τις πιθανές επιπτώσεις για το ενεργειακό σύστημα, το περιβάλλον, την οικονομία και την κοινωνία από την μετάβαση σε μια οικονομία χαμηλών εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα [8].

Σύμφωνα με την διεθνή επιστημονική κοινότητα, η αύξηση των παγκόσμιων εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα CO₂ είναι η κυριότερη αιτία της κλιματικής αλλαγής. Με δεδομένη την ολοένα αυξανόμενη κατανάλωση ενέργειας εξαιτίας της οικονομικής ανάπτυξης ιδιαίτερα στις αναπτυσσόμενες οικονομίες, οι παγκόσμιες εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα αναμένεται να αυξηθούν στο μέλλον παρά την υλοποίηση από αρκετές χώρες πολιτικών μείωσης των εκπομπών και αύξησης της διείσδυσης των ΑΠΕ στο ενεργειακό σύστημα. Επιπλέον, λόγω της αδράνειας του κλιματικού συστήματος, ακόμα και αν η παγκόσμια συγκέντρωση των αερίων του θερμοκηπίου παρέμενε αμετάβλητη στα επίπεδα του 2000, η μέση θερμοκρασία θα συνέχιζε να αυξάνει κατά 0.2°C ανά δεκαετία, σύμφωνα με το IPCC, 2007 [2].

Από την άλλη πλευρά, προκειμένου να αντιμετωπιστεί αποτελεσματικά το φαινόμενο της κλιματικής αλλαγής θα πρέπει να σχεδιαστούν και να εφαρμοστούν αποτελεσματικά μέτρα και πολιτικές μακροπρόθεσμου ορίζοντα τα οποία θα εξασφαλίζουν την συμμετοχή όλων των χωρών με τρόπο δίκαιο και οικονομικά αποδοτικό. Η φύση του φαινομένου της κλιματικής αλλαγής (δημόσιο αγαθό που όμως προκαλείται από ατομικές επιλογές) σε συνδυασμό με τη δυσκολία αποτίμησης του κοινωνικοοικονομικού της κόστους καθιστούν ιδιαίτερα πολύπλοκο τον σχεδιασμό αποτελεσματικών μέτρων μείωσης των αερίων του θερμοκηπίου. Ένα αποτελεσματικό και αποδοτικό σχέδιο αντιμετώπισης της κλιματικής αλλαγής θα πρέπει να έχει δύο βασικά χαρακτηριστικά: i) να επιτυγχάνει την συμμετοχή όλων των χωρών και των τομέων που διαδραματίζουν καθοριστικό ρόλο στις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου και ii) να προσδιορίζει την πολιτικές μείωσης των εκπομπών άνθρακα με τρόπο ώστε να αποτυπώνεται το κοινωνικοοικονομικό κόστος τους με πληρότητα και συνέπεια. Οι οικονομικοί παράγοντες κάθε οικονομίας πρέπει να έχουν μία σωστή και αξιόπιστη εκτίμηση και ορθές προσδοκίες για τις τιμές του άνθρακα (σαν συνολικό μέτρο έντασης των κλιματικών πολιτικών) προκειμένου να λάβουν ορθολογικές αποφάσεις σχετικά με την ενεργειακή κατανάλωση, τις επενδύσεις σε εναλλακτικές ενεργειακές μορφές και σε εξοικονόμηση ενέργειας, την προώθηση τεχνολογιών χαμηλού και μηδενικού άνθρακα κ.α.

Από την εποχή των πετρελαϊκών κρίσεων των δεκαετιών του 1970 και 1980, αναγνωρίζεται η ανάγκη για μετάβαση του ενεργειακού συστήματος προς ενεργειακές μορφές καθαρές για το περιβάλλον με παράλληλη μείωση της εξάρτησης από ορυκτά καύσιμα. Η ανάγκη αυτή είναι ακόμα μεγαλύτερη για τις περιοχές που εισάγουν ενέργεια (όπως η Ε.Ε., στην οποία το ποσοστό εξάρτησης από εισαγωγές ενέργειας είναι 53% το 2010) καθώς είναι ιδιαίτερα ευάλωτες σε απότομες μεταβολές των διεθνών τιμών του πετρελαίου και του φυσικού αερίου που συχνά προκαλούνται από αστάθμητους παράγοντες πολιτικής ή κοινωνικής φύσεως, ιδιαίτερα σε περιοχές όπως η Μ. Ανατολή, η Β. Αφρική και η Ρωσία. Ωστόσο, το παγκόσμιο ενεργειακό σύστημα δεν έχει αλλάξει δραστικά καθώς εξακολουθεί να στηρίζεται στην διαρκώς αυξανόμενη κατανάλωση ορυκτών καυσίμων, παρά την αύξηση της ενεργειακής αποδοτικότητας και την σταδιακή διείδυση των ΑΠΕ στην ηλεκτροπαραγωγή ιδίως μετά το 2000.

Είναι φανερό ότι η υλοποίηση των στόχων περιορισμού των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου που έχουν τεθεί από την διεθνή κοινότητα και από την Ε.Ε. θα οδηγήσει σε σημαντικές μεταβολές του παγκόσμιου ενεργειακού συστήματος, όπως βελτίωση ενεργειακής απόδοσης και ανάπτυξη τεχνολογιών χαμηλού άνθρακα (ΑΠΕ, δέσμευση διοξειδίου του άνθρακα, ηλεκτρικά αυτοκίνητα, υδρογόνο, βιοκαύσιμα), παράλληλα με μεταβολές στις προτιμήσεις των ενεργειακών καταναλωτών. Ωστόσο, ο τριπλός ρόλος της ενέργειας (κλάδος παραγωγής, προϊόν για κατανάλωση και εμπόριο και πρωταρχικός συντελεστής παραγωγής) σημαίνει ότι παρά το σχετικά μικρό μέγεθος του κλάδου της ενέργειας, ο οποίος αποτελεί συνήθως το 5-8% του ΑΕΠ των χωρών, η ενέργεια έχει ιδιαίτερη σημασία για την οικονομική ανάπτυξη, την δημιουργία θέσεων εργασίας και γενικά για την ποιότητα ζωής και το βιοτικό επίπεδο. Γι' αυτό το λόγο, οι πολιτικές μείωσης των εκπομπών άνθρακα θα πρέπει να αναλύονται μέσα από ένα ολιστικό πρίσμα που περιλαμβάνει τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ του ενεργειακού συστήματος, της οικονομίας και του περιβάλλοντος και μια σειρά στόχων-ορόσημων όπως η καταπολέμηση της παγκόσμιας φτώχειας, η δίκαιη κατανομή του πλούτου, ο περιορισμός της κλιματικής αλλαγής, η μείωση της ενεργειακής εξάρτησης, η εξάλειψη της ενεργειακής φτώχειας, η διατήρηση της ποιότητας του αέρα και γενικά η επίτευξη ενός αειφόρου (sustainable) ενεργειακού συστήματος. Γενικά, αειφόρος θεωρείται η ανάπτυξη η οποία ικανοποιεί τις ανάγκες του παρόντος χωρίς να διακυβεύεται η ικανότητα των επόμενων γενιών να ικανοποιήσουν τις δικές τους ανάγκες.

Τα μοντέλα ανάλυσης του ενεργειακού και οικονομικού συστήματος αποτελούν σημαντικά εργαλεία για την συστηματική και ποσοτική αξιολόγηση των ενεργειακών και κλιματικών πολιτικών ιδιαίτερα στον μέσο- και μακροπρόθεσμο ορίζοντα. Ο κύριος σκοπός για την ανάπτυξη ενεργειακών μοντέλων μεγάλης κλίμακας είναι η μελέτη της εξέλιξης του παγκόσμιου συστήματος «ενέργεια-οικονομία-περιβάλλον», η αξιολόγηση του ενεργειακού σχεδιασμού και η ποσοτικοποίηση του κόστους των εναλλακτικών ενεργειακών και κλιματικών πολιτικών. Τα πιο σημαντικά χαρακτηριστικά των μοντέλων ενεργειακής οικονομίας που οδηγούν σε τεκμηριωμένες και ολοκληρωμένες αναλύσεις αφορούν: την αναπαράσταση των αλληλεπιδράσεων μεταξύ διαφορετικών συστατικών του συστήματος και των σχέσεων αλληλεξάρτησης μεταξύ των χωρών, τον

βαθμό λεπτομέρειας που εμπεριέχεται και την αυστηρή θεωρητική θεμελίωση του μοντέλου με σεβασμό στις βασικές αρχές της οικονομικής θεωρίας.

1.2 Σκοπός της διατριβής

Ο σκοπός της παρούσας διατριβής είναι η θεμελίωση, η ανάπτυξη και η εφαρμογή ενός πρωτότυπου και ολοκληρωμένου ενεργειακού-οικονομικού μοντέλου το οποίο εξετάζει την αβεβαιότητα για την εξέλιξη του παγκόσμιου ενεργειακού συστήματος μέχρι το 2050. Το μοντέλο ονομάζεται PROMHΘΕΑΣ και έχει σχεδιαστεί με σκοπό την μελέτη με συνέπεια και συνοχή θεμάτων που αφορούν το παγκόσμιο ενεργειακό σύστημα και των αλληλεπιδράσεων μεταξύ του κλάδου της ενέργειας, του περιβάλλοντος και των διεθνών τιμών των ορυκτών καυσίμων. Η ανάπτυξη του προτεινόμενου υποδείγματος έχει ως σκοπό την ποσοτικοποίηση των αβεβαιοτήτων για την μελλοντική εξέλιξη σημαντικών μεταβλητών του ενεργειακού συστήματος και την μελέτη των επιπτώσεων συγκεκριμένων κλιματικών πολιτικών στο πλαίσιο του σχεδιασμού σεναρίων για την μετάβαση σε μια οικονομία χαμηλών εκπομπών άνθρακα (απανθρακοποίηση του ενεργειακού συστήματος) μέχρι το 2050.

Η ενδεδειγμένη αναπαράσταση της αβεβαιότητας που περιβάλλει την εξέλιξη των κυριότερων συστατικών του ενεργειακού συστήματος καθώς και οι επιπτώσεις για τον αποτελεσματικό σχεδιασμό πολιτικών ενσωματώνονται με συστηματικό τρόπο σε ένα ενιαίο και ολοκληρωμένο πλαίσιο στο προτεινόμενο υπόδειγμα. Αυτή η μεθοδολογική προσέγγιση επιτρέπει την συνεπή διερεύνηση του συνόλου των αλληλεπιδράσεων μεταξύ των διαφορετικών τομέων της ενέργειας που αναπαρίστανται στο μοντέλο και προκαλούνται από την μετακίνηση του συστήματος από το αρχικό σημείο (έτος βάσης) ή από το σενάριο αναφοράς. Οι κλάδοι του παγκόσμιου ενεργειακού συστήματος αναπαρίστανται εξ' ολοκλήρου και με την μεγαλύτερη δυνατή λεπτομέρεια, ενώ δίνεται ιδιαίτερη έμφαση στους τομείς της ηλεκτροπαραγωγής, των μεταφορών, της τελικής ζήτησης ενέργειας, της παραγωγής υδρογονανθράκων και της διαμόρφωσης των διεθνών και εγχώριων τιμών ενέργειας.

Το θεωρητικό υπόβαθρο του προτεινόμενου μοντέλου βασίζεται στις αρχές της μακρο-οικονομετρίας και εξετάζει τον κλάδο της ενέργειας ως ένα μεμονωμένο σύστημα εντός της οικονομίας (με ορισμένες εξαιρέσεις στις οποίες μοντελοποιείται η εξάρτηση μεταξύ ενέργειας και οικονομίας). Η μεθοδολογική προσέγγιση του μοντέλου βασίζεται στο πλαίσιο ανάλυσης μερικής ισορροπίας (partial equilibrium) σύμφωνα με το οποίο διερευνώνται οι αλληλεπιδράσεις εντός του υπό εξέταση συστήματος (ενεργειακός κλάδος) δίχως όμως να λαμβάνονται υπόψη οι αλληλεξαρτήσεις με τους υπόλοιπους κλάδους της οικονομίας (όπως γίνεται στο πλαίσιο της γενικής ισορροπίας, general equilibrium). Τα μοντέλα μερικής ισορροπίας συνήθως χαρακτηρίζονται από την λεπτομερή αναπαράσταση του συστήματος, την ενσωμάτωση οικονομικών και τεχνικών στοιχείων στην ανάλυση, τον σαφή προσδιορισμό των παραγόντων του συστήματος, την ρητή μοντελοποίηση συγκεκριμένων τεχνολογιών και διεργασιών και την αναπαράσταση συγκεκριμένων μέτρων πολιτικής.

Τα τελευταία χρόνια, η ανάγκη για ποσοτική διερεύνηση του ενεργειακού συστήματος και της σχέσης του με την κλιματική αλλαγή οδήγησε στην ανάπτυξη μοντέλων ενεργειακής-οικονομικής ανάλυσης με παγκόσμια κάλυψη και μακροχρόνιο ορίζοντα. Ωστόσο, τα περισσότερα μοντέλα ενεργειακής οικονομίας υπόκεινται σε σημαντικούς περιορισμούς, όπως π.χ. η απουσία αναπαράστασης των τεχνολογικών επιλογών (όπως τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα, οι τεχνολογίες κυψελών υδρογόνου, heat-pumps) κυρίως στην πλευρά της ζήτησης ενέργειας και των μεταφορών, η μη μοντελοποίηση της τεχνολογικής προόδου και η απουσία πλαισίου για την ενδογενή διαμόρφωση των διεθνών τιμών των καυσίμων, οι οποίες αποτελούν καθοριστικό παράγοντα για την μελλοντική εξέλιξη του ενεργειακού συστήματος σε παγκόσμιο επίπεδο. Στα πλαίσια της μακροχρόνιας ενεργειακής ανάλυσης, η έλλειψη ρητής κάλυψης των τεχνολογικών επιλογών ή η απουσία αναπαράστασης μετασχηματισμών του παγκόσμιου ενεργειακού συστήματος, όπως η μετάβαση προς ένα εξ-ηλεκτρισμένο παγκόσμιο πρότυπο ή προς μια οικονομία υδρογόνου, αποτελεί μειονέκτημα ορισμένων μοντέλων. Επιπλέον, ο περιορισμένος χρονικός ορίζοντας και η έλλειψη αναπαράστασης της τεχνολογικής προόδου καθιστά τα μοντέλα ακατάλληλα για την διεξαγωγή μακροπρόθεσμων αναλύσεων, καθώς δεν μπορούν με ακρίβεια και αξιοπιστία να ποσοτικοποιήσουν τις επιπτώσεις από μεγάλης κλίμακας ανάπτυξη τεχνολογιών που δεν είναι ακόμα εμπορικά διαθέσιμες ή οικονομικά αποδοτικές (π.χ. δέσμευση διοξειδίου του άνθρακα, ηλεκτρικά αυτοκίνητα, κυψέλες υδρογόνου, ηλιακά θερμικά κ.α.), αλλά είναι πιθανό να διαδραματίσουν σημαντικό ρόλο κατά την πιθανή μετάβαση σε μια οικονομία χαμηλών εκπομπών άνθρακα σε παγκόσμιο επίπεδο.

Η κλασική μέθοδος για την ανάλυση του συστήματος «ενέργεια-οικονομία-περιβάλλον» και την ποσοτικοποίηση των επιπτώσεων από την εφαρμογή κλιματικών και ενεργειακών πολιτικών συνίσταται στον σχεδιασμό και στην εφαρμογή ντετερμινιστικών/ αιτιοκρατικών μοντέλων, τα οποία παρέχουν ένα συνεκτικό πλαίσιο για την εξερεύνηση της μελλοντικής εξέλιξης του παγκόσμιου ενεργειακού συστήματος. Τα ντετερμινιστικά μοντέλα έχουν τα πλεονεκτήματα της σαφήνειας και της διαφάνειας και έχουν δώσει απαντήσεις τόσο ποιοτικής όσο και ποσοτικής φύσης στην ανάλυση πολιτικών σε ένα ευρύ πεδίο τομέων. Ωστόσο, σε αυτά τα μοντέλα η αβεβαιότητα, η οποία είναι ιδιαίτερα σημαντικός παράγοντας για τις μελλοντικές οικονομικές αποφάσεις στα πλαίσια του ενεργειακού συστήματος (πχ επενδύσεις σε τεχνολογίες παραγωγής ηλεκτρισμού, αποφάσεις για την βέλτιστη κατανομή του R&D, ασφάλεια ενεργειακού εφοδιασμού), δεν μπορεί να αντιμετωπιστεί συστηματικά.

Οι συνηθισμένοι τρόποι εξέτασης της αβεβαιότητας στα ντετερμινιστικά μοντέλα ενεργειακής ανάλυσης είναι μέσω της ανάλυσης των επιπτώσεων από διαφορετικά σενάρια, μέσω εκτέλεσης ανάλυσης ευαισθησίας σε ένα υποσύνολο παραμέτρων του μοντέλου, είτε μέσω της χρησιμοποίησης πολλαπλών μοντέλων ενέργειας-οικονομίας. Οι παραπάνω τρόποι ωστόσο είναι ανεπαρκείς όσον αφορά την ποσοτικοποίηση της αβεβαιότητας για την μελλοντική εξέλιξη του ενεργειακού συστήματος καθώς ο αριθμός των σεναρίων και των αναλύσεων ευαισθησίας που μπορούν να πραγματοποιηθούν είναι περιορισμένος και οι μέθοδοι αυτοί είναι

συγκεκριμένου σκοπού (ad-hoc). Η ανάλυση με πολλαπλά μοντέλα επιτρέπει την εξερεύνηση σειράς πιθανών αποτελεσμάτων και το σχετικό εύρος των αβεβαιοτήτων. Ωστόσο, το μεγάλο εύρος των μοντέλων και των υποθέσεων που χρησιμοποιούνται σε αυτές τις μελέτες/αναλύσεις δεν καλύπτει κατ' ανάγκη το σύνολο των πιθανοτήτων για τις μελλοντικές εξελίξεις, ενώ τα ντετερμινιστικά μοντέλα αποτυγχάνουν επίσης στο να παρέχουν μια ποσοτική ένδειξη για το πόσο πιθανό είναι ένα συγκεκριμένο αποτέλεσμα καθώς και την συσχέτιση μεταξύ των μεταβλητών.

1.3 Πρωτοτυπία- Συνεισφορά διατριβής

Στα πλαίσια της παρούσας διατριβής, ο σχεδιασμός και η υλοποίηση του μοντέλου ΠΡΟΜΗΘΕΑΣ έχει ως κύριο στόχο την δημιουργία ενός αξιόπιστου και αποτελεσματικού εργαλείου για την ποσοτική μακροχρόνια ανάλυση του παγκόσμιου ενεργειακού συστήματος και την εξέταση των αβεβαιοτήτων που περιβάλλουν τις κυριότερες μεταβλητές του. Οι σημαντικότερες πρωτοτυπίες που εισάγονται στο προτεινόμενο στοχαστικό υπόδειγμα αφορούν την ενδελεχή ποσοτικοποίηση του συνόλου των αβεβαιοτήτων για την εξέλιξη του συστήματος μέχρι το 2050 καθώς και την ενσωμάτωση σημαντικών χαρακτηριστικών και παραγόντων που συνήθως λείπουν από υπάρχοντα μοντέλα ενεργειακής ανάλυσης στην διεθνή βιβλιογραφία.

Το μοντέλο περιέχει ένα πλήθος τεχνολογικών λεπτομερειών σχετικών με τις διάφορες ενεργειακές τεχνολογίες και με εναλλακτικά καύσιμα και ενεργειακές μορφές (ηλεκτρισμός, υδρογόνο, βιοκαύσιμα), γεγονός που το καθιστά ικανό να διερευνήσει μια σειρά εναλλακτικούς και συχνά διαφοροποιημένους μετασχηματισμούς του παγκόσμιου ενεργειακού συστήματος. Ένα χαρακτηριστικό του μοντέλου αποτελεί η εξάρτηση των αποφάσεων των ενεργειακών καταναλωτών τόσο από οικονομικούς (όπως συμβαίνει στα περισσότερα μοντέλα ενεργειακής ανάλυσης) όσο και από μη οικονομικούς παράγοντες. Οι τελευταίοι αναπαρίστανται συνήθως με την εισαγωγή κατάλληλων συντελεστών στον μηχανισμό απόφασης για νέες επενδύσεις, οι οποίοι αντανακλούν την σχετική «ωριμότητα» κάθε τεχνολογίας από την άποψη τόσο της τεχνολογικής ωριμότητας όσο και της προθυμίας και ετοιμότητας των ενεργειακών καταναλωτών να την υιοθετήσουν. Συνεπώς, ο βαθμός διείσδυσης των τεχνολογιών εξαρτάται άμεσα τόσο από οικονομικούς (κόστος κεφαλαίου, κόστος καυσίμου, απόδοση), όσο και από μη οικονομικούς παράγοντες, συμπεριλαμβανομένων του μιμητισμού, της διάχυσης πληροφορίας, ανάπτυξης υποδομών και των αποτελεσμάτων δικτύου (“*network effects*”). Με αυτόν τον τρόπο, το μοντέλο προσομοιώνει με μεγαλύτερο ρεαλισμό τις αποφάσεις των καταναλωτών, που στην πραγματικότητα δεν βασίζονται αποκλειστικά σε οικονομική ανάλυση, αλλά επηρεάζονται καθοριστικά από ένα πλήθος παραγόντων, που πρέπει να ληφθούν υπόψη στην μοντελοποίηση.

Η κύρια προσπάθεια της έρευνας και η πλέον σημαντική συνεισφορά του προτεινόμενου υποδείγματος αποτελεί η συστηματική ενσωμάτωση της αβεβαιότητας σε όλους τους παράγοντες από τους οποίους εξαρτάται η προβολή στο μέλλον του ενεργειακού συστήματος και η ποσοτικοποίηση των αλληλεπιδράσεων μεταξύ κλάδων (π.χ. μεταξύ διεθνών τιμών και ζήτησης ενέργειας, μεταξύ κλιματικών πολιτικών και

μίγματος καυσίμων και μεταξύ τεχνολογικής προόδου και διεύθυνσης τεχνολογιών χαμηλού άνθρακα) στο πλαίσιο της εγγενούς αβεβαιότητας. Η λεπτομερής κάλυψη της αβεβαιότητας σε ένα ολοκληρωμένο μεγάλης κλίμακας μοντέλο του παγκόσμιου ενεργειακού συστήματος επιτρέπει την ποσοτικοποίηση όλων των αποτελεσμάτων και προβολών με τη μορφή κατανομών πιθανοτήτων που παράγονται ενδογενώς από το μοντέλο και δεν λαμβάνουν προ-καθορισμένη μορφή. Το ενδιαφέρον αποτέλεσμα του μοντέλου είναι ακριβώς η μορφή της κατανομής πιθανοτήτων που το μοντέλο παράγει για κάθε μέγεθος που προβάλλεται στο μέλλον. Η μορφή αυτή μπορεί να αξιολογηθεί από τον χρήστη του μοντέλου ώστε να προκύψουν συμπεράσματα σχετικά με το εύρος της αβεβαιότητας για κάθε προβολή στο μέλλον. Για παράδειγμα, το μοντέλο παράγει πιθανολογικές εκτιμήσεις για την εξέλιξη σημαντικών μεταβλητών του συστήματος (π.χ. η πιθανότητα ότι οι παγκόσμιες εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα θα υπερβούν ένα συγκεκριμένο όριο το 2050) ως αποτέλεσμα της αναπαράστασης του ενεργειακού συστήματος υπό αβεβαιότητα. Η πληροφορία σχετικά με την αβεβαιότητα των προβολών στο μέλλον αποτελεί κρίσιμη παράμετρο στον σχεδιασμό αποτελεσματικών πολιτικών και επομένως η ολοκληρωμένη ποσοτικοποίηση του κινδύνου που παρέχει το μοντέλο είναι στρατηγικής σημασίας και αποτέλεσε τον κύριο στόχο κατά την κατασκευή και εφαρμογή του μοντέλου. Η ανάλυση στοχαστικών αποτελεσμάτων του μοντέλου προσθέτει μια καινούργια διάσταση στην συνηθισμένη ποσοτική ανάλυση με μοντέλα ενέργειας-οικονομίας, ενώ παράλληλα ενισχύει την αξιοπιστία της.

Κατά την κατασκευή του στοχαστικού υποδείγματος, η κύρια προσπάθεια είναι η ενδελεχής κάλυψη της αβεβαιότητας με την εισαγωγή της στην δημιουργία των κατανομών πιθανοτήτων για όλες τις παραμέτρους εισόδου. Συνεπώς, στην κατασκευή του μοντέλου έγινε προσπάθεια ενσωμάτωσης των περισσότερων κατηγοριών αβεβαιοτήτων που αναγνωρίζονται στην διεθνή βιβλιογραφία και συγκεκριμένα το προτεινόμενο υπόδειγμα αναγνωρίζει:

- Αβεβαιότητα σχετικά με τις υποθέσεις και την εξέλιξη των εξωγενών μεταβλητών
- Διακύμανση στις μεταβλητές που δεν έχουν μοντελοποιηθεί ρητά καθώς δεν θεωρούνται σημαντικές, αλλά μπορούν αθροιστικά να προκαλέσουν αποκλίσεις
- Οι αβεβαιότητες που προκύπτουν από την ατελή γνώση του συστήματος και κυρίως από την τιμή των παραμέτρων που περιλαμβάνονται στο μοντέλο.
- Η αβεβαιότητα σχετικά με τον προσδιορισμό των εξισώσεων και την δομή του μοντέλου (που υλοποιείται με στοχαστικές μεταβάσεις).
- Στατιστικά σφάλματα κατά την ποσοτικοποίηση των δεδομένων και των παρατηρήσεων (π.χ. υπολογιστικά σφάλματα, αριθμητικές προσεγγίσεις κλπ.)

Τα παραπάνω εισάγονται στο μοντέλο με τη μορφή κατανομών πιθανοτήτων. Το αντίστροφο της ισοδύναμης αθροιστικής αυτών των κατανομών χρησιμοποιείται στη συνέχεια για να παράγει πειραματικές τιμές με την ευρέως χρησιμοποιούμενη μέθοδο "Monte Carlo". Η παραγωγή των κατανομών για αυτές τις παραμέτρους αποτελεί τον κεντρικό σκοπό της έρευνας που σχετίζεται με τον σχεδιασμό, την κατασκευή και τη χρήση του μοντέλου ΠΡΟΜΗΘΕΑΣ.

Για την παραγωγή των κατάλληλων κατανομών για τις παραμέτρους και τις υποθέσεις που εισάγονται στο μοντέλο, χρησιμοποιούνται εκτενώς οικονομετρικές εκτιμήσεις, οι οποίες παρέχουν ένα στοιχείο αντικειμενικότητας, αναγκάζουν τον αναλυτή να διερευνήσει τη φύση και την έκταση των στοχαστικών στοιχείων (γιατί υπήρχε μεταβλητότητα στο παρελθόν) και επιδέχονται ανάλυση της συνδιακύμανσης για τις εκτιμημένες παραμέτρους. Το κύριο μειονέκτημα των οικονομετρικών μεθόδων είναι η υπερβολική εξάρτησή τους από τα ιστορικά δεδομένα. Ωστόσο, δεν είναι σαφές αν αυτή η εξάρτηση οδηγεί σε υπερεκτίμηση ή υποεκτίμηση της μεταβλητότητας. Ως εκ τούτου, η μέθοδος δεν παράγει συστηματική μεροληψία, ενώ οι οικονομετρικές εκτιμήσεις πραγματοποιούνται σε μακριές χρονολογικές σειρές, που περιλαμβάνουν περιόδους αλλαγών στο παγκόσμιο ενεργειακό σύστημα και στις τιμές των καυσίμων και ως εκ τούτου η αβεβαιότητα που προέρχεται από τις στατιστικές εκτιμήσεις δεν είναι ιδιαίτερα μικρή και δεν υποεκτιμά την συνολική μεταβλητότητα που έχει παρατηρηθεί ιστορικά. Συνεπώς, οι εκτιμώμενες κατανομές των παραμέτρων αναπαριστούν με συνεπή τρόπο την αβεβαιότητα για την εξέλιξη του ενεργειακού συστήματος συμπεριλαμβανομένων και πιθανοτήτων για γρήγορες και ριζικές αλλαγές (π.χ. πετρελαϊκές κρίσεις των δεκαετιών 1970 και 1980).

Η κατασκευή κατανομών με βάση τις οικονομετρικές εκτιμήσεις συνήθως συμπληρώνεται από εναλλακτικές μεθόδους για την αξιολόγηση αβεβαιοτήτων. Στις περιπτώσεις όπου εξωγενείς πληροφορίες για την αβεβαιότητα εισάγονται στο μοντέλο, αφιερώνεται ιδιαίτερη φροντίδα στην ενσωμάτωση ενός ευρέος φάσματος επιστημονικής και πολιτικής εμπειρογνωμοσύνης. Στον ΠΡΟΜΗΘΕΑ είναι σημαντικό ότι η διακύμανση και η συνδιακύμανση των εξωγενών μεταβλητών και παραμέτρων εισόδου να είναι αμερόληπτες στο μέτρο του δυνατού και στον βαθμό που η εξειδικευμένη κρίση των εμπειρογνομόνων και τα στατιστικά δεδομένα το επιτρέπουν. Σε αντίθετη περίπτωση, οι πιθανοτικές εκτιμήσεις με βάση τα αποτελέσματα του μοντέλου είναι πολύ πιθανό να είναι μεροληπτικές. Η ανάλυση αβεβαιότητας για εξωγενείς υποθέσεις βασίζεται είτε σε εξειδικευμένες μελέτες (π.χ. κοιτάσματα ορυκτών καυσίμων, ποσοστά εκμάθησης των ενεργειακών τεχνολογιών, δυναμικότητα ανανεώσιμων πηγών ανά περιοχή) είτε σε μεθόδους Delphi (χρήση ερωτηματολογίων) για τον καθορισμό των μελλοντικών πολιτικών για το κλίμα.

Τέλος, ιδιαίτερη προσοχή δίνεται στη στατιστική εξάρτηση των παραμέτρων που εισάγονται στο προτεινόμενο υπόδειγμα, δεδομένου ότι η συνδιακύμανση είναι πιθανό να διαδραματίσει σημαντικό ρόλο στον προσδιορισμό της κατανομής των ενδογενών μεταβλητών και ιδιαίτερα των αθροιστικών (πχ. παγκόσμια ζήτηση ηλεκτρισμού ή εκπομπές άνθρακα). Ενώ αναγνωρίζονται οι δυσκολίες στον καθορισμό της μεταβλητότητας των παραμέτρων εισόδου και του υποκειμενικού χαρακτήρα ορισμένων υποθέσεων, η προσπάθεια στην δημιουργία τόσο του μοντέλου όσο και των κατανομών για τα δεδομένα και τις παραμέτρους εισόδου υπήρξε πάντα προς την απόκτηση αμερόληπτων μέτρων αβεβαιότητας στον βαθμό που τα ιστορικά στοιχεία και η εξειδικευμένη κρίση των εμπειρογνομόνων το επιτρέπουν.

1.4 Εφαρμογές του προτεινόμενου υποδείγματος

Οι κύριες εφαρμογές του προτεινόμενου υποδείγματος που παρουσιάζονται στην παρούσα διατριβή επιχειρούν να παρουσιάσουν μια τεκμηριωμένη ανάλυση σε θέματα ενεργειακής και κλιματικής πολιτικής μακροπρόθεσμα σε παγκόσμιο επίπεδο υπό το πρίσμα της αβεβαιότητας. Οι εφαρμογές και τα εναλλακτικά σενάρια που εξετάζονται με το μοντέλο PROMHΘΕΑΣ βασίζονται σε συνδυασμούς υποθέσεων για πολιτικές και εξωγενείς παραμέτρους με σκοπό την άντληση συμπερασμάτων.

Η παγκόσμια ζήτηση ενέργειας αυξάνεται διαρκώς εξαιτίας της οικονομικής ανάπτυξης, της αύξησης του πληθυσμού και των τάσεων αστικοποίησης ειδικά στις αναπτυσσόμενες περιοχές. Τα ορυκτά καύσιμα αποτελούν το 80% της παγκόσμιας πρωτογενούς κατανάλωσης ενέργειας και προκαλούν αύξηση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου. Επιπλέον, η συνεχιζόμενη εξάρτηση από τα ορυκτά καύσιμα καθιστά ευάλωτες, στις διακυμάνσεις της τιμής και τροφοδοσίας τους, τις περιοχές που είναι καθαροί εισαγωγείς ενέργειας. Έτσι ο ρόλος της εξοικονόμησης ενέργειας και της εκτεταμένης διείσδυσης τεχνολογιών χαμηλού και μηδενικού άνθρακα καθίσταται ιδιαίτερα σημαντικός για την αντιμετώπιση της κλιματικής αλλαγής και τον ενεργειακό σχεδιασμό κάθε χώρας. Ωστόσο, η εξέλιξη του παγκόσμιου ενεργειακού συστήματος χαρακτηρίζεται από ιδιαίτερα μεγάλη αβεβαιότητα η οποία προκύπτει από την αβέβαιη εξέλιξη των υποθέσεων και των εξωγενών μεταβλητών του μοντέλου (π.χ. πληθυσμός, οικονομική δραστηριότητα), την διακύμανση που προκαλείται από μεταβλητές που δεν έχουν μοντελοποιηθεί ρητά και από αβεβαιότητες που σχετίζονται με τις παραμέτρους των εξισώσεων, την δομή του μοντέλου και από την στοχαστική αβεβαιότητα (για παράδειγμα ραγδαίες μεταβολές στην εξέλιξη της διεθνούς τιμής του πετρελαίου, αβεβαιότητα για τις κλιματικές πολιτικές κ.α.). Εισάγοντας την λεπτομερή κάλυψη της αβεβαιότητας σε ένα ολοκληρωμένο μεγάλης κλίμακας μοντέλο του παγκόσμιου ενεργειακού συστήματος, ο PROMHΘΕΑΣ μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την αξιόπιστη ποσοτικοποίηση πιθανολογικών εκτιμήσεων για την εξέλιξη ενδογενών μεταβλητών.

Αρχικά, εξετάζονται οι ιδιότητες του μοντέλου καθώς και η ευστάθεια των αποτελεσμάτων του (*robustness*) χρησιμοποιώντας την ντετερμινιστική εκδοχή του. Συγκεκριμένα πραγματοποιείται ποσοτική εξέταση σεναρίων με φιλόδοξες κλιματικές πολιτικές και μελετώνται οι επιπτώσεις των σεναρίων για το παγκόσμιο ενεργειακό σύστημα και το κόστος της μείωσης των εκπομπών ανά περιοχή. Επιπλέον, μελετώνται οι επιπτώσεις διαφοροποιημένων υποθέσεων για τα παγκόσμια κοιτάσματα και την εκμετάλλευση υδρογονανθράκων για το ενεργειακό σύστημα. Τα σενάρια ενεργειακής και κλιματικής πολιτικής που καταστρώνονται επικεντρώνονται στη χρονική περίοδο 2020-2030 και στο μακροπρόθεσμο ορίζοντα μέχρι το 2050.

Η ανάπτυξη ενός συνεκτικού σεναρίου αναφοράς είναι ιδιαίτερα σημαντική για την αξιολόγηση πολιτικών καθώς αυτό χρησιμοποιείται ως σημείο αναφοράς σε σχέση με το οποίο τα εναλλακτικά σενάρια πολιτικής μπορούν να συγκριθούν. Το σενάριο αναφοράς αποτελεί μια συνεκτική, ρεαλιστική και συναφής πολιτικά «προέκταση» των σημερινών τάσεων στο παγκόσμιο οικονομικό και ενεργειακό σύστημα, η οποία

ενσωματώνει τις ήδη αποφασισμένες πολιτικές και βασίζεται σε προηγούμενες συμπεριφορές (ιστορικά δεδομένα), σε συνεπείς κοινωνικοοικονομικές προβλέψεις και σε συγκεκριμένες εκτιμήσεις ειδικών έως το 2050. Η σύγκριση των εναλλακτικών σεναρίων με το σενάριο αναφοράς επιτρέπει την εξαγωγή συμπερασμάτων και την ενδεδειγμένη ποσοτικοποίηση του κόστους εναλλακτικών πολιτικών.

Πιο συγκεκριμένα, καταστρώνονται τέσσερα εναλλακτικά σενάρια ενεργειακής πολιτικής μέχρι το 2050. Στα δυο από αυτά, γίνεται η υπόθεση ότι τα παγκόσμια κοιτάσματα ορυκτών καυσίμων καθώς και οι προοπτικές παραγωγής μη συμβατικού φυσικού αερίου και πετρελαίου διαφοροποιούνται σε σύγκριση με το σενάριο αναφοράς. Έτσι, αναλύονται οι επιπτώσεις εναλλακτικών υποθέσεων και πολιτικών για το παγκόσμιο ενεργειακό σύστημα και κυρίως για την εξέλιξη των διεθνών τιμών πετρελαίου, φυσικού αερίου και άνθρακα και για την παγκόσμια ενεργειακή κατανάλωση και την δομή του μίγματος καυσίμων. Η πρωτοτυπία της συγκεκριμένης εφαρμογής έγκειται στο γεγονός ότι πραγματοποιείται για πρώτη φορά η διεξαγωγή ανάλυσης που συσχετίζει με περιεκτικό και αξιόπιστο τρόπο την επίπτωση των παγκόσμιων κοιτασμάτων ορυκτών καυσίμων στην εξέλιξη των διεθνών τιμών ενέργειας και του παγκόσμιου ενεργειακού συστήματος και των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα. Το μεθοδολογικό πλαίσιο που χρησιμοποιείται είναι πρωτότυπο, δεδομένου ότι πραγματοποιείται διασύνδεση του μηχανισμού διαμόρφωσης των διεθνών τιμών υδρογονανθράκων με τις επιπτώσεις στα ενεργειακά συστήματα των περιοχών του μοντέλου συμπεριλαμβανομένων και των αλληλεπιδράσεων μεταξύ τους και με την παγκόσμια αγορά ενέργειας.

Επιπλέον, παρουσιάζεται ένα σενάριο μονομερούς κλιματικής δράσης της Ευρώπης στο οποίο εξετάζεται η μακροπρόθεσμη αναδιάρθρωση του Ευρωπαϊκού ενεργειακού συστήματος προς μια οικονομία χαμηλών εκπομπών άνθρακα, καθώς και η διαρροή άνθρακα προς τις υπόλοιπες οικονομίες μέσω της μείωσης των διεθνών τιμών του πετρελαίου, του φυσικού αερίου και του άνθρακα. Τέλος, εξετάζεται ένα σενάριο παγκόσμιας συντονισμένης δράσης για τον μετριασμό της κλιματικής αλλαγής και ποσοτικοποιούνται οι επιπτώσεις του για τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα, τον ριζικό μετασχηματισμό του παγκόσμιου ενεργειακού συστήματος και την αύξηση του ενεργειακού κόστους ανά περιοχή. Με αυτόν τον τρόπο και με το μεθοδολογικό πλαίσιο, πραγματοποιείται διερεύνηση της σημασίας διαφορετικών ενεργειακών επιλογών (βελτίωση της ενεργειακής αποδοτικότητας, ανάπτυξη τεχνολογιών ΑΠΕ, διεύθυνση ηλεκτρικών αυτοκινήτων) στο πλαίσιο της παγκόσμιας προσπάθειας μετριασμού της κλιματικής αλλαγής. Το σενάριο υποθέτει επιτάχυνση της τεχνολογικής πρόοδου για τις καθαρές τεχνολογίες και επιτυχή συντονισμό των εμπλεκόμενων παραγόντων του ενεργειακού συστήματος (κατασκευαστές τεχνολογιών, επενδυτές, φορείς χάραξης πολιτικής, πάροχοι υποδομών και δικτύων και τελικοί καταναλωτές).

Εξετάζονται επίσης εναλλακτικά σενάρια υπό το καθεστώς αβεβαιότητας με την χρήση της στοχαστικής εκδοχής του PROMHΘEA. Η ανάλυση ποσοτικοποιεί δυο κύρια σενάρια. Στο πρώτο, αυξάνεται υποκειμενικά η πιθανότητα για παγκόσμια, συντονισμένη και φιλόδοξη προσπάθεια για περιορισμό της κλιματικής αλλαγής και

μελετώνται οι επιπτώσεις του στην εξέλιξη του παγκόσμιου ενεργειακού συστήματος. Συγκεκριμένα, παρουσιάζονται οι διαφοροποιήσεις των πιθανολογικών εκτιμήσεων για μια σειρά σημαντικών μεταβλητών του μοντέλου (π.χ. παγκόσμιες καταναλώσεις καυσίμων, δομή ηλεκτροπαραγωγής, διεθνείς τιμές ενέργειας) σε σύγκριση με το σενάριο αναφοράς. Στο δεύτερο στοχαστικό σενάριο, μελετώνται οι επιπτώσεις από την εισαγωγή του μηχανισμού για τα κοιτάσματα και την παραγωγή μη συμβατικού αερίου. Οι εκτιμήσεις για την παγκόσμια παραγωγή σχιστολιθικού αερίου έχουν ιδιαίτερα υψηλή αβεβαιότητα, η οποία οδηγεί σε αύξηση της αβεβαιότητας για την εξέλιξη των διεθνών τιμών ενέργειας (και κυρίως του φυσικού αερίου). Τα μεγαλύτερα διαθέσιμα κοιτάσματα αερίου οδηγούν σε σημαντική μείωση της μέσης τιμής του και σε εκτεταμένες μεταβολές στο ενεργειακό μίγμα, με το φυσικό αέριο να υποκαθιστά τόσο τα υπόλοιπα ορυκτά καύσιμα που έχουν υψηλότερη ένταση άνθρακα όσο και τις ενεργειακές μορφές χαμηλού άνθρακα (ΑΠΕ και πυρηνική ενέργεια) κυρίως μετά το 2030. Το μεθοδολογικό πλαίσιο της εξέτασης σεναρίων είναι ιδιαίτερα πρωτότυπο καθώς ενσωματώνει την ανάλυση αβεβαιότητας στα πλαίσια της ολοκληρωμένης αναπαράστασης του παγκόσμιου ενεργειακού συστήματος. Η ανάπτυξη εναλλακτικών σεναρίων με βάση αυτό το πλαίσιο αποτελεί επίσης μια πρωτότυπη εφαρμογή καθώς δεν έχει πραγματοποιηθεί στην παγκόσμια βιβλιογραφία.

Τέλος, περιλαμβάνεται μια εφαρμογή για την λήψη αποφάσεων στον τομέα της ηλεκτροπαραγωγής υπό καθεστώς αβεβαιότητας για την τιμή πώλησης της ηλεκτρικής ενέργειας, τις κλιματικές πολιτικές και το κόστος των εναλλακτικών τεχνολογιών. Με βάση τα αποτελέσματα της στοχαστικής ανάλυσης του μοντέλου, υπολογίζεται το ποσοστό απόδοσης για τις επενδύσεις σε τεχνολογίες ηλεκτροπαραγωγής. Η επιλογή του βέλτιστου χαρτοφυλακίου επενδύσεων γίνεται με βάση την ελαχιστοποίηση του κινδύνου, δηλαδή της πιθανότητας το ποσοστό απόδοσης να είναι χαμηλότερο από το προεξοφλητικό επιτόκιο. Η πρωτοτυπία της εφαρμογής έγκειται στην ενδελεχή αναπαράσταση του συνόλου των αβεβαιοτήτων του τομέα της ηλεκτροπαραγωγής καθώς και των συνδιακυμάνσεων μεταξύ των μεταβλητών (που προέρχονται από την ολοκληρωμένη ανάλυση του PROMHΘEA) και είναι ιδιαίτερα σημαντικές για τις τεχνολογικές επιλογές και την μείωση του κινδύνου των επενδύσεων. Η υλοποίηση της εφαρμογής έδειξε ότι η ένταση της κλιματικής πολιτικής θεωρείται ο πιο σημαντικός παράγοντας αβεβαιότητας το 2030 και συνεπώς αποφεύγονται επενδύσεις σε τεχνολογίες ορυκτών καυσίμων, ενώ προτιμώνται η πυρηνική ενέργεια (παρότι η μέση της απόδοση είναι η χαμηλότερη) και ο συνδυασμός τεχνολογιών αερίου συνδυασμένου κύκλου με δέσμευση διοξειδίου του άνθρακα με ανεμογεννήτριες.

1.5 Δομή της διατριβής

Η δομή της παρούσας διδακτορικής διατριβής περιλαμβάνει τα εξής κεφάλαια.

Το πρώτο κεφάλαιο παρουσιάζει το επιστημονικό αντικείμενο και το σκοπό της διατριβής. Επίσης, αναλύεται η συνεισφορά της διατριβής στην διεθνή βιβλιογραφία με βάση την ανάπτυξη ενός πρωτότυπου και περιεκτικού στοχαστικού ενεργειακού μοντέλου και των κύριων εφαρμογών του.

Στο δεύτερο κεφάλαιο γίνεται εισαγωγή στην σημασία της μοντελοποίησης του παγκόσμιου ενεργειακού συστήματος και μια εκτενής ανασκόπηση της ανάπτυξης μοντέλων ενεργειακής-οικονομικής ανάλυσης και των σημαντικότερων εφαρμογών τους για την εξέταση ενεργειακών και κλιματικών πολιτικών. Στη συνέχεια, παρουσιάζεται η ταξινόμηση των μοντέλων ανάλογα με το σύστημα που εξετάζουν, τον μαθηματικό αλγόριθμο επίλυσης, τον τρόπο αναπαράστασης των τεχνολογιών και διαδικασιών και άλλα χαρακτηριστικά. Επιπλέον, παρουσιάζονται οι κύριοι τρόποι ενσωμάτωσης της αβεβαιότητας στα υποδείγματα και εξετάζονται οι σημαντικότερες εφαρμογές ανάλυσης αβεβαιότητας με την μέθοδο Monte Carlo σε μοντέλα ενέργειας-οικονομίας που αναπαριστούν το παγκόσμιο ενεργειακό σύστημα.

Στο τρίτο κεφάλαιο παρουσιάζεται αναλυτικά η δομή του προτεινόμενου μοντέλου ενεργειακής-οικονομικής ανάλυσης, η υλοποίηση του οποίου αποτελεί το βασικό αντικείμενο της διατριβής. Η ντετερμινιστική εκδοχή του μοντέλου είναι ένα ενεργειακό μοντέλο μερικής ισορροπίας και αποτελεί ένα αυτοδύναμο υπόδειγμα που περιγράφει την εξέλιξη του παγκόσμιου ενεργειακού συστήματος, σε συνδυασμό με σημαντικές μεταβλητές της οικονομίας και του περιβάλλοντος. Ο ΠΡΟΜΗΘΕΑΣ περιέχει ένα διαδοχικά δυναμικό (*recursive dynamic*) μοντέλο με ετήσια χρονική ανάλυση μέχρι το 2050 το οποίο έχει τριγωνική δομή και χωρίζεται σε υπο-μοντέλα, που αλληλοεπιδρούν μεταξύ τους (αρθρωτή δομή). Επίσης παρουσιάζεται ο τρόπος αναπαράστασης των εναλλακτικών εξωγενών υποθέσεων και μέτρων πολιτικής, τα οποία αποτελούν το βασικό μηχανισμό για την κατάστρωση εναλλακτικών σεναρίων εξέλιξης του παγκόσμιου ενεργειακού συστήματος και των διεθνών τιμών ενέργειας.

Στο τέταρτο κεφάλαιο παρουσιάζονται οι σημαντικότερες προεκτάσεις του υποδείγματος ώστε να καταστεί εφικτή η ανάλυση και η ποσοτικοποίηση της εγγενούς αβεβαιότητας για την εξέλιξη των μεταβλητών του συστήματος «ενέργεια-οικονομία-περιβάλλον». Αρχικά αναλύεται ο σκοπός της ενσωμάτωσης της αβεβαιότητας σε ένα υπόδειγμα ενεργειακής ανάλυσης, παρουσιάζονται οι πηγές αβεβαιότητας που εξετάζονται στο μοντέλο και γίνεται επισκόπηση της μεθοδολογίας Monte Carlo καθώς και την συγκεκριμένης εφαρμογής της στην διατριβή. Στη συνέχεια, αναλύεται το μεθοδολογικό πλαίσιο κατασκευής των δεδομένων εισόδου με βάση οικονομετρικές εκτιμήσεις αλλά και εναλλακτικές μεθόδους ενσωμάτωσης της αβεβαιότητας.

Το κεφάλαιο πέντε περιέχει την υλοποίηση μιας εφαρμογής για την αξιολόγηση επενδύσεων σε τεχνολογίες ηλεκτροπαραγωγής υπό αβεβαιότητα για τα μελλοντικά κόστη και τιμές των καυσίμων, τις τιμές πώλησης του ηλεκτρισμού και κλιματικές πολιτικές με βάση τα στοχαστικά αποτελέσματα του ΠΡΟΜΗΘΕΑ. Η εφαρμογή έχει ως στόχο την επιλογή τεχνολογιών με βάση την ελαχιστοποίηση του κινδύνου αποτυχίας και την μεγιστοποίηση της αναμενόμενης απόδοσης των επενδύσεων, υποθέτοντας ότι οι επενδυτές αποστρέφονται τον κίνδυνο.

Το έκτο κεφάλαιο περιέχει ανάλυση σεναρίων με την ντετερμινιστική εκδοχή του προτεινόμενου υποδείγματος στην οποία εξετάζονται οι επιπτώσεις στην εξέλιξη του παγκόσμιου ενεργειακού συστήματος από εναλλακτικές κλιματικές πολιτικές και

υποθέσεις για τα κοιτάσματα υδρογονανθράκων. Συγκεκριμένα, αναλύεται το σενάριο αναφοράς που ενσωματώνει τις κύριες τάσεις του συστήματος και αποτελεί την βάση για την ποσοτικοποίηση των επιπτώσεων των σεναρίων. Στη συνέχεια, εξετάζονται σενάρια με μεταβολές στις υποθέσεις για τα κοιτάσματα και τις προοπτικές παραγωγής υδρογονανθράκων και παρουσιάζονται οι επιπτώσεις για την εξέλιξη των διεθνών τιμών, την παγκόσμια ζήτηση και τις εκπομπές άνθρακα. Επιπλέον, αναλύονται οι επιπτώσεις ενός σεναρίου με φιλόδοξη αλλά μονομερή δράση της ΕΕ για το κλίμα όσον αφορά το μίγμα καυσίμων, την διάρθρωση της ηλεκτροπαραγωγής και την διαρροή άνθρακα σε περιοχές εκτός ΕΕ. Τέλος, εξετάζονται οι επιπτώσεις ενός σεναρίου παγκόσμιας συντονισμένης δράσης ενάντια στην κλιματική αλλαγή. Σε αυτό το πλαίσιο, το παγκόσμιο ενεργειακό σύστημα μετασχηματίζεται προς μια οικονομία χαμηλού άνθρακα με μείωση της παγκόσμιας ζήτησης ενέργειας, μεγάλη διείσδυση τεχνολογιών χαμηλού άνθρακα, σημαντικές μεταβολές στο μίγμα καυσίμων και στην δομή της ηλεκτροπαραγωγής, χαμηλότερες εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα και αύξηση του συνολικού κόστους του ενεργειακού συστήματος σε όλες τις περιοχές.

Στο έβδομο κεφάλαιο γίνεται μια εκτενής παρουσίαση του σεναρίου αναφοράς που αναπτύχθηκε με την στοχαστική έκδοση του μοντέλου και παρουσιάζεται η περιεκτική ανάλυση αβεβαιότητας για τις κυριότερες μεταβλητές του παγκόσμιου ενεργειακού και κλιματικού συστήματος την περίοδο 2020-2050. Επίσης εξετάζει τις επιπτώσεις εναλλακτικών σεναρίων στις στοχαστικές ιδιότητες των κυριότερων μεταβλητών του συστήματος και ιδιαίτερα στις καταναλώσεις καυσίμων ανά τομέα, την διείσδυση νέων τεχνολογιών, τις διεθνείς τιμές καυσίμων και τέλος τις εκπομπές και ατμοσφαιρικές συγκεντρώσεις διοξειδίου του άνθρακα την περίοδο μέχρι το 2050. Συγκεκριμένα παρουσιάζονται οι επιπτώσεις δυο εναλλακτικών σεναρίων; ενός που υποθέτει μεγαλύτερη πιθανότητα για συντονισμένη παγκόσμια δράση για το κλίμα και ενός που εξετάζει τις επιπτώσεις από εκμετάλλευση των παγκόσμιων κοιτασμάτων μη συμβατικού φυσικού αερίου. Τέλος, εξετάζεται ένα πλαίσιο πιθανοτικής ανάλυσης για την εύρεση της βέλτιστης διαχρονικής κατανομής των παγκόσμιων εκπομπών CO₂ υπό την παρουσία αβεβαιότητας για τις κλιματικές πολιτικές που επιλύεται το 2030 με την εξέταση σεναρίων διαφοροποιημένων κλιματικών πολιτικών την περίοδο 2010-2050.

Η διατριβή καταλήγει (Κεφάλαιο 8) με την εξαγωγή γενικών συμπερασμάτων σχετικών με την μεθοδολογία κατασκευής στοχαστικών μοντέλων ενεργειακής-οικονομικής ανάλυσης και τα σενάρια πολιτικής/εφαρμογές που εξεταστήκαν. Τέλος προτείνονται συγκεκριμένες προοπτικές μελλοντικής έρευνας για την βελτίωση του μεθοδολογικού πλαισίου των στοχαστικών ενεργειακών μοντέλων μεγάλης κλίμακας.

Κεφάλαιο 2

2. Βιβλιογραφική επισκόπηση των μοντέλων ενέργειας–οικονομίας και κριτική των μεθοδολογικών προσεγγίσεων

Ο στόχος του κεφαλαίου είναι η παρουσίαση της βιβλιογραφικής επισκόπησης αναφορικά με τις κύριες μεθοδολογίες μοντελοποίησης του ενεργειακού συστήματος σε παγκόσμιο επίπεδο ειδικότερα στα πλαίσια της μακροχρόνιας ενεργειακής οικονομικής ανάλυσης. Αρχικά παρουσιάζεται μια σύντομη παρουσίαση της σημασίας της ανάπτυξης και υλοποίησης ενεργειακών-οικονομικών μοντέλων μακροχρόνιας ανάλυσης και γίνεται μια ιστορική αναδρομή στις πρώτες προσπάθειες μοντελοποίησης του ενεργειακού συστήματος. Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι κυριότερες ταξινομήσεις των νετερμινιστικών μοντέλων ενεργειακής-οικονομικής ανάλυσης. Επιπλέον, επεξηγείται η σημασία της ανάπτυξης στοχαστικών μοντέλων που μπορούν να αναπαριστούν την αβεβαιότητα και παρουσιάζονται οι σημαντικότερες μεθοδολογίες. Τέλος, γίνεται εκτενής αναφορά στις αναλύσεις αβεβαιότητας με μεγάλης κλίμακας μοντέλα ενεργειακής-οικονομικής ανάλυσης και σε κάποιες εγγενείς αδυναμίες τους και παρουσιάζεται η πρωτοτυπία του προτεινόμενου υποδείγματος.

2.1 Μοντέλα ενέργειας-οικονομίας

Στη διάρκεια των τελευταίων δεκαετιών και ειδικότερα μετά την υπογραφή του Πρωτοκόλλου του Κιότο το 1997 [1], το φαινόμενο της κλιματικής αλλαγής αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα παγκόσμια προβλήματα, καθώς όλο και περισσότερο αναγνωρίζεται (σε επιστημονικό, κοινωνικό και πολιτικό επίπεδο) ότι η κλιματική αλλαγή μπορεί να οδηγήσει σε καταστροφικές επιπτώσεις στις ανθρώπινες κοινωνίες και στο περιβάλλον [2]. Παράλληλα, η σχετικά αργή πρόοδος στις διεθνείς διαπραγματεύσεις για το κλίμα έχει προκαλέσει σκεπτικισμό για την προοπτική μιας παγκόσμιας συνεργατικής δράσης για την αντιμετώπιση της κλιματικής αλλαγής [3].

Κεντρικό ζήτημα των διεθνών διαπραγματεύσεων στα πλαίσια του ΟΗΕ¹ είναι η μείωση των παγκόσμιων εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα, οι οποίες αποτελούν το 78% των συνολικών εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου [27] και είναι η βασική ανθρωπογενής αιτία της αύξησης της παγκόσμιας μέσης θερμοκρασίας. Η συνεχιζόμενη αύξηση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα οφείλεται τόσο στην ραγδαία αύξηση της ζήτησης ενέργειας όσο και στο χρησιμοποιούμενο παγκόσμιο μείγμα καυσίμων, το οποίο κυριαρχείται από τα ορυκτά καύσιμα σε ποσοστό ανώτερο του 81% [38]. Η καύση πετρελαίου, φυσικού αερίου και άνθρακα οδηγεί σε απελευθέρωση διοξειδίου του άνθρακα στην ατμόσφαιρα, ενώ οι Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (αιολική, ηλιακή, υδροηλεκτρική και βιομάζα) και η πυρηνική ενέργεια θεωρούνται «καθαρές» μορφές ενέργειας και δεν εκπέμπουν άνθρακα. Η αύξηση της ζήτησης και παραγωγής ενέργειας είναι αποτέλεσμα της παγκόσμιας οικονομικής μεγέθυνσης, της αύξησης του πληθυσμού και της τάσης αστικοποίησης ιδιαίτερα στις αναδυόμενες οικονομίες (π.χ. Κίνα, Ινδία). Από την άλλη, η υλοποίηση κλιματικών πολιτικών (με στόχο τον μετριασμό της κλιματικής αλλαγής) θα έχει επιπτώσεις τόσο στην διάρθρωση του παγκόσμιου ενεργειακού συστήματος όσο στην εξέλιξη της συνολικής οικονομικής δραστηριότητας και στην δομή της οικονομικής παραγωγής και της απασχόλησης ανά κλάδο. Η άμεση συσχέτιση και οι αλληλεπιδράσεις μεταξύ των συστημάτων ενέργειας, οικονομίας και περιβάλλοντος έχει κάνει επιτακτική την ανάγκη ανάπτυξης ολοκληρωμένων μοντέλων για την μελέτη της κλιματικής αλλαγής τα οποία περιλαμβάνουν την ενσωματωμένη αναπαράσταση και των τριών τομέων.

Το κύριο αντικείμενο και στόχος της ενεργειακής ανάλυσης είναι η μελέτη των επιπτώσεων εναλλακτικών πολιτικών στο σύστημα «ενέργεια-οικονομία-περιβάλλον». Τα πλέον συνηθισμένα μεθοδολογικά εργαλεία που χρησιμοποιούνται στην ενεργειακή και οικονομική ανάλυση είναι τα μοντέλα ενέργειας-οικονομίας, τα οποία αποτελούνται από ένα μαθηματικό σύστημα εξισώσεων με βάση σχέσεις αιτίας-αποτελέσματος. Τα μοντέλα αποτελούν μια «αφαίρεση»/ απλούστευση των συστημάτων του πραγματικού κόσμου. Από την άλλη πλευρά, η χρήση μοντέλων αποτελεί ένα ιδιαίτερα σημαντικό εργαλείο για την αξιολόγηση αποφάσεων σε πολλούς επιστημονικούς τομείς. Η χρήση αξιόπιστων δεδομένων και μεθοδολογιών, η επικέντρωση στους καθοριστικούς παράγοντες για τις αποφάσεις και η εμπειριστατωμένη και αποτελεσματική κατασκευή του υποδείγματος προσδίδουν ικανοποιητική ερμηνεία των φαινομένων του πραγματικού κόσμου και οδηγούν σε αξιόπιστες προβλέψεις. Η κατασκευή ενός μοντέλου εξαρτάται άμεσα από τον λόγο για τον οποίο κατασκευάζεται και τους σκοπούς που εξυπηρετεί, ενώ πρέπει να λαμβάνονται υπόψη και οι χρήστες του που μπορεί να είναι είτε ακαδημαϊκό/ επιστημονικό προσωπικό είτε φορείς χάραξης πολιτικής. Συνεπώς, πρέπει να αποφασιστεί το πλαίσιο της ανάλυσης με χρήση του μοντέλου και να καθοριστούν οι συμμετέχοντες του προβλήματος. Τα μοντέλα προσομοιώνουν την διαδικασία απόφασης ενός παράγοντα του συστήματος υπό εξέταση (π.χ. παραγωγός ηλεκτρικής ενέργειας, ιδιώτες καταναλωτές ενέργειας). Τα τελευταία χρόνια, το ενδιαφέρον της ενεργειακής ανάλυσης στρέφεται προς τις

¹ UNFCCC: United Nations Framework Convention for Climate Change

αποφάσεις που λαμβάνονται από τους παράγοντες του ενεργειακού συστήματος, είτε αυτοί είναι οι κατασκευαστές των τεχνολογιών, των δικτύων και των υποδομών, οι εταιρείες παροχής και μεταφοράς ηλεκτρισμού είτε οι μεμονωμένοι ιδιώτες καταναλωτές, οι οποίοι αποφασίζουν για την ανανέωση των ενεργειακών συσκευών (θέρμανσης και ηλεκτρισμού) στα νοικοκυριά, την εγκατάσταση ενεργειακής μόνωσης και εξοπλισμού και για την επιλογή των επιβατικών μετακινήσεών τους (με ιδιωτικά αυτοκίνητα ή με μέσα μαζικής μεταφοράς). Η προσομοίωση των αποφάσεων των παραγόντων γίνεται με χρήση, εκτός των τεχνικών και οικονομικών χαρακτηριστικών τους, στοιχείων συμπεριφοράς των διαφόρων πρακτόρων (agents) του συστήματος.

Στο πλαίσιο της ανάλυσης του πλέγματος «ενέργεια-οικονομία-περιβάλλον», η ανάπτυξη και χρήση μαθηματικών υποδειγμάτων μεγάλης κλίμακας αποτελεί μια σημαντική μεθοδολογία προσέγγισης ιδιαίτερα σύνθετων προβλημάτων, με έμφαση στην ολοκληρωμένη και περιεκτική ανάλυση των συστημάτων (σε αντίθεση με την μερική και ξεχωριστή εξέταση του ενεργειακού συστήματος σε απομόνωση από το συνολικό πλαίσιο που μπορεί να γίνει χωρίς μοντέλα). Τα σενάρια που αναπτύσσονται με τα μοντέλα ενέργειας-οικονομίας βασίζονται σε μια σειρά από υποθέσεις (π.χ. για την εξέλιξη του πληθυσμού, του ΑΕΠ και των κλιματικών πολιτικών [40]). Γενικά ο σκοπός των μοντέλων δεν είναι η πρόβλεψη της πορείας του ενεργειακού συστήματος (*forecasting*), αλλά η συνεπής, συνεκτική και μακροπρόθεσμη απεικόνιση της εξέλιξης του συστήματος δεδομένων των πολιτικών που εφαρμόζονται και των εξωγενών παραμέτρων (*προέκταση-projection*). Ο όρος προέκταση αφορά τη διερεύνηση πιθανών μελλοντικών καταστάσεων-προεκτάσεων του υπό μελέτη συστήματος.

Το οικονομετρικό υπόδειγμα των *Hudson-Jorgenson* [4] έθεσε τα θεμέλια για την ανάπτυξη των μελλοντικών μοντέλων ενεργειακής και οικονομικής ανάλυσης. Αρκετά υποδείγματα ενεργειακής ανάλυσης και στρατηγικής έκαναν την εμφάνιση τους την δεκαετία του 70' ως αποτέλεσμα της πετρελαϊκής κρίσης (ραγδαία αύξηση των διεθνών τιμών του πετρελαίου κατά την περίοδο 1973-1979). Τα μοντέλα αυτά περιέγραφαν τον ενεργειακό τομέα αλλά δεν ήταν συνδεδεμένα με τους υπόλοιπους κλάδους της οικονομίας, ενώ η ζήτηση της ενέργειας προσδιοριζόταν εξωγενώς. Η πρώτη παγκόσμια μελέτη με την χρήση ενός αρκετά απλού μοντέλου δημοσιεύθηκε το 1972 με τον τίτλο «*Limits to Growth*» από το Think Tank «*Club of Rome*» [42] και ο στόχος της ήταν να εξετάσει την αλληλεπίδραση της εκθετικής αύξησης της οικονομικής δραστηριότητας με τους πεπερασμένους πόρους του πλανήτη. Η πρώτη προσπάθεια ενσωμάτωσης της οικονομίας σε ένα ενεργειακό μοντέλο έγινε από τον Allan Manne [5] με το υπόδειγμα ETA-MACRO, το οποίο αφορούσε στο ενεργειακό σύστημα των Η.Π.Α. Ο Manne ανέπτυξε ένα μονοτομεακό νεοκλασικό υπόδειγμα προκειμένου να προσδιορίσει την συνολική ζήτηση ενέργειας η οποία χρησίμευε ως είσοδος στο ενεργειακό μοντέλο. Στις επόμενες δεκαετίες η έρευνα και η ανάπτυξη ενεργειακών και οικονομικών υποδειγμάτων έχει επεκταθεί ραγδαία και τα σύγχρονα μοντέλα περιλαμβάνουν:

- Αναλυτικό προσδιορισμό του ενεργειακού συστήματος (τόσο της ζήτησης όσο και της προσφοράς ενέργειας)

- Ενσωμάτωση πλήθους ενεργειακών διεργασιών και τεχνολογιών και αναλυτική περιγραφή της εξέλιξης των τεχνικών και οικονομικών χαρακτηριστικών τους
- Ενδογενοποίηση της τεχνολογικής προόδου για τις ενεργειακές τεχνολογίες
- Ενσωμάτωση κλιματικών μεταβλητών (πχ συγκεντρώσεις άνθρακα, παγκόσμια θερμοκρασία, ακραία καιρικά φαινόμενα) και του κόστους της κλιματικής αλλαγής
- Ενσωμάτωση οικονομικών κλάδων και του διεθνούς εμπορίου
- Μοντελοποίηση κλιματικών και ενεργειακών πολιτικών και των σημαντικότερων τεχνολογικών επιλογών για την εξοικονόμηση ενέργειας και την μείωση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα
- Ενσωματωμένη ανάλυση τομέων σχετικών με την κλιματική αλλαγή (πχ υδάτινοι πόροι, γεωργία, αλλαγή χρήσης γης, ξηρασία, έντονες βροχοπτώσεις κλπ.)

Σήμερα υπάρχει μια πληθώρα υποδειγμάτων ενεργειακής, οικονομικής και περιβαλλοντικής ανάλυσης, τα οποία χρησιμοποιούνται ευρέως για την μελέτη των περιβαλλοντικών και οικονομικών επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής [4, 6] και για την ποσοτικοποίηση του κόστους από την υλοποίηση πολιτικών μετριασμού των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα [7, 8]. Σε αυτό έχει συντελέσει η βελτίωση των αλγορίθμων επίλυσης τους, η αυξανόμενη επάρκεια των σχετικών δεδομένων αλλά και η ανάπτυξη εξειδικευμένου λογισμικού ειδικά σχεδιασμένου για την ανάπτυξη και επίλυση πολύπλοκων μαθηματικών υποδειγμάτων, π.χ. MPSGE για την κατασκευή υποδειγμάτων γενικής ισορροπίας.

Η χρήση των μοντέλων ενεργειακής και οικονομικής ανάλυσης γίνεται κυρίως μέσω της κατασκευής σεναρίων, τα οποία αποτελούνται από συνδυασμούς εναλλακτικών υποθέσεων σχετικά με τις πιθανές καταστάσεις του κόσμου [9]. Η ανάλυση σεναρίων περιλαμβάνει τη διενέργεια τρεξιμάτων του μοντέλου για διαφορετικούς συνδυασμούς των υποθέσεων και τη σύγκριση των αποτελεσμάτων. Οι εναλλακτικές υποθέσεις συνήθως περιλαμβάνουν μεταβολές στο κοινωνικό και οικονομικό πλαίσιο, στα οικονομικά και τεχνικά χαρακτηριστικά των τεχνολογιών, στην πρόσβαση στα αποθέματα ενέργειας, στις κλιματικές πολιτικές καθώς και σε μια σειρά άλλων παραγόντων που μπορούν να επηρεάσουν τα μελλοντικά επίπεδα κατανάλωσης ενέργειας και εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα. Η ανάλυση των επιπτώσεων πραγματοποιείται μέσω της σύγκρισης μεταξύ διαφορετικών σεναρίων. Η συνηθέστερη πρακτική είναι η κατασκευή ενός σεναρίου αναφοράς (*Business-as-usual* ή *Reference scenario*) το οποίο αναπαριστά μια συνεκτική προέκταση των υπό εξέταση μεταβλητών, ενώ παράλληλα υιοθετούνται μια σειρά παραδοχών και πολιτικών. Στη συνέχεια, πραγματοποιούνται διαφοροποιημένες υποθέσεις για την υιοθέτηση πολιτικών και καταστρώνονται τα εναλλακτικά σενάρια, τα οποία ποσοτικοποιούνται με την χρήση του υποδείγματος. Τα σενάρια δημιουργούνται ώστε να εξετάσουν μια σειρά από ουσιαστικούς και ποικιλόμορφους συνδυασμούς πιθανών καταστάσεων του κόσμου [57]. Τέλος, η σύγκριση μεταξύ των σεναρίων οδηγεί στην αξιολόγηση των επιπτώσεων των εναλλακτικών υποθέσεων σε μεταβλητές του συστήματος (π.χ. μείγμα καυσίμων και τεχνολογιών, συνολικό κόστος του ενεργειακού συστήματος κ.α.)

Σε αυτό το μέρος της διατριβής παρουσιάζονται τα πιο σημαντικά υποδείγματα ανάλυσης του συστήματος «ενέργεια-οικονομία-περιβάλλον», από άποψη θεωρητικής τεκμηρίωσης και εφαρμογής για αξιολόγηση εναλλακτικών ενεργειακών, κλιματικών και τεχνολογικών πολιτικών.

2.1.1 Μοντέλα προσομοίωσης του ενεργειακού συστήματος

Τα τελευταία χρόνια έχει αναπτυχθεί ένας σημαντικός αριθμός μοντέλων ενέργειας-οικονομίας, που έχουν χρησιμοποιηθεί εκτεταμένα για την ανάλυση της μελλοντικής εξέλιξης του ενεργειακού συστήματος. Οι διαφορές μεταξύ των μοντέλων αφορούν κυρίως την δομή τους, τον αλγόριθμο επίλυσης, τον βαθμό ενσωμάτωσης της οικονομικής δραστηριότητας, την χρονική και γεωγραφική κάλυψη, τις λεπτομέρειες αναπαράστασης του ενεργειακού συστήματος, των ενεργειακών τεχνολογιών και των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου [7], και τον βαθμό υποκατάστασης μεταξύ των ενεργειακών μορφών. Ένα μοντέλο ανάλυσης του ενεργειακού συστήματος εξετάζει το υπό μελέτη αντικείμενο (δηλαδή το ενεργειακό σύστημα) σαν ένα κλειστό σύστημα με ρητή απεικόνιση των αλληλεπιδράσεων μεταξύ των συστατικών του. Τα ενεργειακά μοντέλα χαρακτηρίζονται ως μοντέλα μερικής ισορροπίας καθώς προσομοιάζουν την ισορροπία στις ενεργειακές αγορές θεωρώντας εξωγενείς τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ της ενέργειας και των άλλων τομέων της οικονομίας.

Ο βασικότερος διαχωρισμός μεταξύ των ενεργειακών μοντέλων είναι τα μακρο-οικονομικά μοντέλα (προσέγγιση *top-down*) και τα μοντέλα που περιέχουν λεπτομερή αναπαράσταση των τεχνολογιών και των διαδικασιών του ενεργειακού συστήματος (προσέγγιση *bottom-up*). Τα μακρο-οικονομικά μοντέλα βασίζονται σε οικονομετρική εκτίμηση των ιστορικών τάσεων και περιέχουν σχέσεις που συνδέουν τις ενδογενείς μεταβλητές με τις σημαντικότερες παραμέτρους που επηρεάζουν την εξέλιξή τους (σχέσεις συμπεριφοράς). Από την άλλη τα σημαντικότερα μειονεκτήματά τους είναι η έλλειψη αναπαράστασης τεχνολογικών λεπτομερειών και διαδικασιών και η μειωμένη χρησιμότητά τους για μακροπρόθεσμη ανάλυση, καθώς η εξάρτηση από τα ιστορικά δεδομένα δεν τους επιτρέπει την προσομοίωση κλιματικών πολιτικών που οδηγούν σε ριζικό μετασχηματισμό του ενεργειακού συστήματος και γενικά έχουν περιορισμένη ικανότητα προσομοίωσης σεναρίων που αποκλίνουν αρκετά από τις ιστορικές τάσεις.

Στην κατηγορία² της ανάλυσης *top-down*, τα δυο σημαντικότερα παγκόσμια οικονομετρικά μοντέλα ενεργειακής ανάλυσης είναι το μοντέλο POLES [47] και το μοντέλο WEM της IEA [48], τα οποία είναι μαθηματικά υποδείγματα μεγάλης κλίμακας σχεδιασμένα για να προσομοιώνουν τον τρόπο λειτουργίας των ενεργειακών αγορών και να αναλύουν τις επιπτώσεις σεναρίων με αλλαγές στις εξωγενείς υποθέσεις στις κύριες μεταβλητές του ενεργειακού συστήματος. Τα τελευταία χρόνια τα μοντέλα αυτά έχουν βελτιωθεί με την ενσωμάτωση στοιχείων *bottom-up* ανάλυσης, κυρίως στην αναπαράσταση του κλάδου των μεταφορών και της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.

² Λόγω του ιδιαίτερα μεγάλου αριθμού ενεργειακών μοντέλων, η παρούσα διατριβή θα δώσει έμφαση στα μοντέλα που καλύπτουν το παγκόσμιο ενεργειακό σύστημα, όπως και το προτεινόμενο υπόδειγμα.

Επιπλέον, στην κατηγορία top-down ανήκουν και τα μοντέλα γενικής ισορροπίας που αναπαριστούν την συνολική οικονομία μέσω ενός περιορισμένου αριθμού μεταβλητών, ενώ χρησιμοποιούν συνήθως εξισώσεις με σταθερή ελαστικότητα υποκατάστασης μεταξύ των συντελεστών παραγωγής

Τα bottom-up μοντέλα είναι μοντέλα βελτιστοποίησης που βασίζονται στις αρχές της μικρο-οικονομίας και τα οποία περιέχουν ενδεδειγμένες αναπαραστάσεις των τεχνολογιών και διαδικασιών και συνήθως ελαχιστοποιούν το κόστος του συστήματος που προσομοιάζουν ή μεγιστοποιούν το πλεόνασμα παραγωγού και καταναλωτή (π.χ. κάλυψη ζήτησης με ελάχιστο κόστος). Σε αυτά τα μοντέλα, κάθε ενεργειακή τεχνολογία προσδιορίζεται από μια λεπτομερή περιγραφή των εισροών, εκροών, των στοιχείων κόστους και διάφορων άλλων τεχνικών και οικονομικών χαρακτηριστικών. Τα πιο σημαντικά χαρακτηριστικά αυτών των μοντέλων είναι ότι:

- αναπαριστούν την μερική ισορροπία των ενεργειακών αγορών
- ενσωματώνουν αναλυτικό προσδιορισμό της ζήτησης ανά κλάδο
- εμπεριέχουν ρητή αναπαράσταση τεχνολογιών, με λεπτομερή τεχνοοικονομικά χαρακτηριστικά και σαφείς τεχνικές σχέσεις μηχανικής (π.χ. βαθμός απόδοσης, ειδική κατανάλωση καυσίμων)
- υπολογίζουν αναλυτικά τις επενδύσεις σε νέες ενεργειακές τεχνολογίες και την αντικατάσταση του παλιού κεφαλαιουχικού εξοπλισμού

Τα πιο σοβαρά μειονεκτήματα των μεθόδων bottom-up είναι η ελλιπής προσομοίωση των επιπτώσεων εξαιτίας αλλαγών στις τιμές της ενέργειας, η έλλειψη αλληλεπιδράσεων με την υπόλοιπη οικονομία και οι δυσκολίες στην προσομοίωση της συμπεριφοράς καταναλωτή. Στην κατηγορία της bottom-up ενεργειακής ανάλυσης τα πιο χαρακτηριστικά παγκόσμια μοντέλα είναι το TIMES [51], και το GCAM [52].

Τα τελευταία χρόνια, μια τρίτη κατηγορία υβριδικών ενεργειακών μοντέλων έχει αναπτυχθεί που συνδυάζει τα πλεονεκτήματα των δυο μεθόδων που αναλύθηκαν παραπάνω, δηλαδή την λεπτομερή αναπαράσταση των τεχνολογιών και της μικροοικονομικής συμπεριφοράς των καταναλωτών (bottom-up μέθοδος) με την σύνδεση με μη ενεργειακές μεταβλητές και την θεμελίωση σε ιστορικά δεδομένα (top-down). Χαρακτηριστικό παράδειγμα υβριδικού ενεργειακού μοντέλου είναι το PRIMES [49] για τα κράτη μέλη της Ευρωπαϊκής Ένωσης, το NEMS [50] για τις Η.Π.Α. και το IMAGE [53] με παγκόσμια ανάλυση. Η μαθηματική δομή των μοντέλων αυτών είναι η ενσωμάτωση μιας σειράς υπομοντέλων (π.χ. αναπαράσταση της ζήτησης ενέργειας ανά τομέα, παραγωγή ηλεκτρισμού, μεταφορές, εξόρυξη υδρογονανθράκων, διαμόρφωση τιμών), καθένα από τα οποία περιγράφει την συμπεριφορά ενός αντιπροσωπευτικού παράγοντα του ενεργειακού συστήματος. Τα υπομοντέλα συνδέονται μεταξύ τους με την εφαρμογή ενός αλγορίθμου που καθορίζει τις τιμές ισορροπίας σε πολλαπλές αγορές και τους όγκους ισορροπίας οι οποίοι εξισορροπούν τη προσφορά και την ζήτηση ενέργειας ανά κλάδο και καύσιμο λαμβάνοντας υπόψη τους συνολικούς περιορισμούς που επιβάλλονται εξωγενώς στο υπόδειγμα (π.χ. εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα, διεύθυνση των ΑΠΕ κ.α.). Τα τελευταία χρόνια, αρκετά top-down μοντέλα

ενσωματώνουν αναλυτική αναπαράσταση του ενεργειακού συστήματος και των σχετικών τεχνολογικών επιλογών, ενώ παράλληλα τα bottom-up μοντέλα ενεργειακής ανάλυσης επεκτείνονται για να ποσοτικοποιήσουν τις επιπτώσεις στην οικονομική παραγωγή, στο διεθνές εμπόριο και στις επενδύσεις.

Μια επιπλέον κατηγοριοποίηση των μοντέλων ενεργειακής οικονομίας αφορά στο υπό μελέτη σύστημα. Στην περίπτωση που εξετάζεται μόνο ο κλάδος της ενέργειας χωρίς να λαμβάνονται υπόψη οι αλληλεπιδράσεις με τους υπόλοιπους κλάδους της οικονομίας, το υπόδειγμα ονομάζεται μερικής ισορροπίας. Σε αντίθετη περίπτωση, δηλαδή όταν υπάρχει πλήρης αλληλεπίδραση με την ευρύτερη οικονομία, το μοντέλο χαρακτηρίζεται ως γενικής ισορροπίας (με αναπαράσταση του κλάδου της ενέργειας).

Τα μοντέλα ενεργειακής και οικονομικής ανάλυσης διακρίνονται επίσης ανάλογα με τον τρόπο που επιλύονται. Τα υποδείγματα μπορούν να πραγματοποιούν βελτιστοποίηση μιας αντικειμενικής συνάρτησης (συνήθως ελαχιστοποίηση κόστους ή μεγιστοποίηση κέρδους) ή να επιλύει την ισορροπία μιας αγοράς (market equilibrium). Τα μοντέλα γενικής ισορροπίας προσομοιώνουν τη συμπεριφορά των οικονομικών πρακτόρων (*economic agents*) με βάση τις αρχές της μικροοικονομίας και υπολογίζουν την ισορροπία όλων των κλάδων της οικονομίας. Εκτός από τα μοντέλα γενικής ισορροπίας, υπάρχουν μοντέλα μερικής ισορροπίας που επιλύουν την ισορροπία των αγορών (των ενεργειακών προϊόντων) όπως το PRIMES [49] και το TIMES [51], όπου το υπό εξέταση ενεργειακό σύστημα είναι διαιρεμένο σε υποσυστήματα ζήτησης και προσφοράς ενέργειας και το μοντέλο υπολογίζει την τιμή ισορροπίας για κάθε σύστημα ξεχωριστά. Από την άλλη πλευρά, τα μοντέλα βελτιστοποίησης είναι συνήθως μοντέλα μερικής ισορροπίας που εξετάζουν ένα συγκεκριμένο κλάδο (π.χ. την κάλυψη της ζήτησης ηλεκτρισμού από εναλλακτικές τεχνολογίες) με ενδεδειγμένη αναπαράσταση των τεχνολογιών και των διεργασιών και έχουν σκοπό την ελαχιστοποίηση του συνολικού κόστους του υπό εξέταση συστήματος. Στην δεκαετία του 1990, στα περισσότερα μοντέλα αυτού του είδους η ζήτηση ενέργειας καθοριζόταν εξωγενώς και συνεπώς δεν αντιδρούσε σε μεταβολές της προσφοράς, ενώ τα τελευταία χρόνια τα μοντέλα ενσωματώνουν μηχανισμούς αλληλεπίδρασης μεταξύ της ζήτησης και της προσφοράς ενέργειας (συνήθως μέσω του μηχανισμού διαμόρφωσης των τιμών ενέργειας).

2.1.2 Μοντέλα γενικής ισορροπίας

Στην κατηγορία μοντέλων top-down συμπεριλαμβάνονται τα περισσότερα παγκόσμια διαδοχικά δυναμικά (*recursive dynamic*) υπολογιζόμενα μοντέλα γενικής ισορροπίας (Computable General Equilibrium models), τα οποία αναπαριστούν τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ της ενέργειας, των υπόλοιπων κλάδων της οικονομίας και του περιβάλλοντος. Συνήθως, περιλαμβάνουν πολλές περιοχές και κλάδους της οικονομίας και μπορούν να αξιολογήσουν συστηματικά τις επιπτώσεις των ενεργειακών και κλιματικών πολιτικών για την εξέλιξη της οικονομικής δραστηριότητας, τους εθνικούς λογαριασμούς, τις επενδύσεις, την ιδιωτική κατανάλωση, τα δημόσια οικονομικά, το εμπόριο και την απασχόληση. Κάθε κλάδος χρησιμοποιεί κεφάλαιο, εργασία, ενέργεια

και ενδιάμεσες καταναλώσεις (από άλλους κλάδους) για να παράγει. Σε αυτά τα μοντέλα, η ενέργεια έχει τριπλό ρόλο στην οικονομία:

- Συντελεστής παραγωγής (είσοδος για τους κλάδους παραγωγής)
- Εμπόρευμα του οποίου η ζήτηση από τους τελικούς καταναλωτές (νοικοκυριά) οδηγεί σε ωφέλιμες υπηρεσίες
- Βιομηχανικός κλάδος, ο οποίος παράγει προστιθέμενη αξία, δημιουργεί απασχόληση και κάνει επενδύσεις

Η ενέργεια δεν μπορεί να υποκατασταθεί τέλεια από μη ενεργειακά προϊόντα και υπηρεσίες ή από τους υπόλοιπους συντελεστές παραγωγής (κεφάλαιο, εργασία). Η ζήτηση ενέργειας καθορίζεται από την μεγιστοποίηση ωφέλειας και την κατανομή του εισοδήματος των νοικοκυριών, την ελαχιστοποίηση του κόστους παραγωγής των εταιρειών και από τις σχετικές τιμές των συντελεστών παραγωγής, ενώ οι συναρτήσεις παραγωγής αναπαρίστανται με εξισώσεις σταθερής ελαστικότητας υποκατάστασης.

Παρά το γεγονός ότι τα υποδείγματα γενικής ισορροπίας μπορούν να ποσοτικοποιήσουν με συνέπεια και ολοκληρωμένα τις επιπτώσεις ενεργειακών και κλιματικών πολιτικών σε όλους τους μακροοικονομικούς δείκτες (ΑΕΠ, απασχόληση, εμπορικό ισοζύγιο, κλαδική διάρθρωση της δραστηριότητας), η συνηθισμένη κριτική που τους γίνεται αφορά στην ελλιπή αναπαράσταση των διαδικασιών του ενεργειακού συστήματος [43]. Τα τελευταία χρόνια αρκετά μοντέλα γενικής ισορροπίας έχουν ενσωματώσει μια πιο λεπτομερή αναπαράσταση του ενεργειακού συστήματος και των αντίστοιχων τεχνολογιών, όπως εναλλακτικές επιλογές παραγωγής ηλεκτρισμού, επιβατικά αυτοκίνητα, επενδύσεις σε εξοικονόμηση ενέργειας, νέες τεχνολογίες χαμηλού άνθρακα (ΑΠΕ, CCS, ηλεκτρικά αυτοκίνητα). Τα πιο χαρακτηριστικά παραδείγματα είναι τα μοντέλα GEM-E3 [44], EPPA [45] και IMACLIM [46]. Κάποια από τα χαρακτηριστικά αυτών των μοντέλων περιλαμβάνουν: την ενσωμάτωση δεδομένων τόσο από πίνακες κοινωνικής λογιστικής όσο και από ενεργειακά ισοζύγια, την ενδογενή αναπαράσταση αλληλεπιδράσεων μεταξύ της οικονομίας, του ενεργειακού συστήματος και του περιβάλλοντος, την ενσωμάτωση όλων των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου από το σύνολο των οικονομικών κλάδων, την διεθνή ανάπτυξη και το διμερές εμπόριο αγαθών και υπηρεσιών, την ενδογενή τεχνολογική πρόοδο και τον μηχανισμό εξαντλήσιμων πόρων για τα ορυκτά καύσιμα. Παρά την συνεχή πρόοδο στην αναπαράσταση των μηχανισμών του ενεργειακού συστήματος, μια συνήθης διαδικασία είναι η αναπαραγωγή από τα μοντέλα γενικής ισορροπίας των αποτελεσμάτων των ενεργειακών υποδειγμάτων μερικής ισορροπίας (πχ το μοντέλο GEM-E3 χρησιμοποιεί αποτελέσματα του PRIMES); Σε αυτήν την περίπτωση τα μοντέλα γενικής ισορροπίας χρησιμοποιούνται για να ποσοτικοποιήσουν τις επιπτώσεις των μεταβολών του ενεργειακού συστήματος στους υπόλοιπους κλάδους της οικονομίας.

2.1.3 Μοντέλα ολοκληρωμένης ανάλυσης

Τα τελευταία χρόνια, αναπτύχθηκε μια πρωτότυπη κατηγορία μοντέλων τα οποία καλύπτουν τις αλληλεπιδράσεις του ενεργειακού συστήματος και της ευρύτερης

οικονομίας και περιέχουν λεπτομερή αναπαράσταση του ενεργειακού συστήματος και ενδεδειγμένη απεικόνιση των τεχνολογιών και διεργασιών, ενώ αναπαριστούν και την σύνδεση του ενεργειακού συστήματος με κλιματικές μεταβλητές (π.χ. ατμοσφαιρικές συγκεντρώσεις άνθρακα) και με τις επιπτώσεις και το κόστος της κλιματικής αλλαγής (π.χ. υδάτινα αποθέματα, γεωργία, αλλαγή χρήσεως της γης κλπ.). Τα υποδείγματα αυτά ονομάζονται μοντέλα ολοκληρωμένης αξιολόγησης (*Integrated Assessment Models*) και συνήθως συνδυάζουν ένα top-down μακροοικονομικό μοντέλο με ένα αναλυτικό bottom-up μοντέλο του ενεργειακού συστήματος και ένα απλό κλιματικό μοντέλο. Μερικά χαρακτηριστικά παραδείγματα τέτοιων μοντέλων σε παγκόσμιο επίπεδο είναι τα IMAGE [53], REMIND [54], WITCH [55] και MESSAGE [56].

Στα μοντέλα ολοκληρωμένης αξιολόγησης οι δυναμικές της οικονομίας υπολογίζονται με βάση διαχρονική βελτιστοποίηση (συνήθως κατά την περίοδο 2010-2100), υποθέτοντας τέλεια γνώση και προβλεπτικότητα (*perfect foresight*) για το μέλλον. Τα μοντέλα αυτά ονομάζονται και μοντέλα βέλτιστης ανάπτυξης (*optimal growth*) τύπου Ramsey. Η ενσωμάτωση της διαχρονικής βελτιστοποίησης οδηγεί σε προβλήματα υπολογιστικής πολυπλοκότητας, μεγάλες απαιτήσεις σε χρόνο επίλυσης και συχνά σε ασταθείς λύσεις και γι' αυτό τα συγκεκριμένα μοντέλα αναπαριστούν λίγους κλάδους της οικονομίας (συνήθως 1-3). Η εξέλιξη της μακρο-οικονομίας συνήθως καθορίζεται από μια απλή συνάρτηση Cobb-Douglas [41], όπου η αύξηση του ΑΕΠ εξαρτάται από τις μεταβολές στο εργατικό δυναμικό, την εξέλιξη της συνολικής παραγωγικότητας, τις επενδύσεις (που οδηγούν σε συσσώρευση κεφαλαίου). Ωστόσο, συνδυάζοντας τα παραπάνω με μια αναλυτική αναπαράσταση του ενεργειακού συστήματος, τα μοντέλα προσομοιώνουν τις αλλαγές σε βασικές οικονομικές μεταβλητές εξαιτίας εναλλακτικών ενεργειακών και κλιματικών πολιτικών.

Με την ενσωμάτωση τεχνολογικών αλλαγών στον τομέα της ενέργειας σε μια αναπαράσταση του μακροοικονομικού περιβάλλοντος, τα μοντέλα IAM συνδυάζουν τις σημαντικότερες δυνατότητες των μοντέλων bottom-up και top-down. Οι τεχνολογικές επιλογές που απαιτούν μεγάλες αρχικές επενδύσεις λαμβάνονται υπόψη για τον εύρεση της βέλτιστης λύσης. Τα μοντέλα (κυρίως τα IMAGE [53] και REMIND [54]) ενσωματώνουν λεπτομερή περιγραφή της τελικής ζήτησης ενέργειας, των μορφών ενέργειας και των τεχνολογιών μετατροπής και επιτρέπουν διαχρονικές εμπορικές σχέσεις και κινήσεις κεφαλαίων. Οι εκτιμήσεις για το κόστος μετριασμού της κλιματικής αλλαγής εξαρτώνται κυρίως από το κόστος των ενεργειακών τεχνολογιών, το κόστος εξόρυξης υδρογονανθράκων και τις δυνατότητες και περιορισμούς για την μαζική ανάπτυξη των νέων ενεργειακών τεχνολογιών χαμηλού και μηδενικού άνθρακα. Το μοντέλο WITCH [55] είναι ένα υβριδικό top-down οικονομικό μοντέλο, το οποίο παρότι εμπεριέχει μια μέτριας πολυπλοκότητας αναπαράσταση του ενεργειακού τομέα, έχει δυο διακριτικά χαρακτηριστικά: την ενδογενή αναπαράσταση της τεχνικής προόδου λαμβάνοντας υπόψη και τις βέλτιστες επενδύσεις σε R&D και το θεωρητικό του υπόβαθρο που βασίζεται στην θεωρία παιγνίων (που είναι ιδιαίτερα σημαντικό για την ανάλυση σεναρίων με ασύμμετρες κλιματικές πολιτικές στις διάφορες περιοχές). Επιπλέον, το μοντέλο ενσωματώνει ενδογενώς τις επενδύσεις στην εξοικονόμηση

ενέργειας που προκαλούνται από ειδικές επενδύσεις σε R&D για βελτίωση της ενεργειακής αποδοτικότητας.

2.1.4 Αντιμετώπιση της αβεβαιότητας με ντετερμινιστικά μοντέλα

Η χρήση μαθηματικών υποδειγμάτων-μοντέλων με σκοπό την προσομοίωση συστημάτων του "πραγματικού κόσμου" και την ανάλυση της αβεβαιότητας που τα περιβάλλει είναι καλά εδραιωμένη στην διεθνή βιβλιογραφία, ιδίως στον τομέα της αξιολόγησης πολιτικών και επενδύσεων. Τα υποδείγματα παρέχουν ένα ιδιαίτερα σημαντικό μέσο για την εξερεύνηση διαφορετικών πιθανών εξελίξεων των υπό εξέταση συστημάτων, καθώς και για την ποσοτικοποίηση των επιπτώσεων συγκεκριμένων παρεμβάσεων και πολιτικών στις ενδογενείς μεταβλητές και στα αποτελέσματα των μοντέλων. Η πλέον συνηθισμένη μεθοδολογία για την ανάλυση του ολοκληρωμένου συστήματος «ενέργεια-οικονομία» συνίσταται στην ανάπτυξη ντετερμινιστικών-αιτιοκρατικών μοντέλων, τα οποία παρέχουν ένα συνεκτικό πλαίσιο για την εξερεύνηση της μελλοντικής εξέλιξης των ενεργειακών μεταβλητών (π.χ. ζήτηση ανά τομέα, μείγμα καυσίμων, διείσδυση τεχνολογιών, κόστος του ενεργειακού συστήματος κ.α.). Παρ' όλα αυτά η αβεβαιότητα που περιβάλλει την εξέλιξη των μεταβλητών δεν μπορεί να αντιμετωπιστεί συστηματικά. Η εξέταση της αβεβαιότητας με αιτιοκρατικά μοντέλα γίνεται συνήθως είτε με την εξέταση των αποτελεσμάτων του μοντέλου στο πλαίσιο εναλλακτικών σεναρίων ή με την πραγματοποίηση ανάλυσης ευαισθησίας.

Οι προσομοιώσεις σεναρίων, που αποτελούνται από συνδυασμούς υποθέσεων σχετικά με τις πιθανές καταστάσεις του κόσμου [9], χρησιμοποιούνται συχνά για να εξερευνήσουμε τα άκρα των αποτελεσμάτων του μοντέλου κάνοντας εκ διαμέτρου αντίθετες παραδοχές για μια σειρά εξωγενών παραμέτρων ταυτόχρονα. Η ανάλυση εναλλακτικών σεναρίων είναι ιδιαίτερα χρήσιμη όταν χρησιμοποιούνται πολλαπλά μοντέλα για να εκτελέσουν σενάρια υπό τις ίδιες (ή παρόμοιες) υποθέσεις [47]. Μερικά παραδείγματα πρόσφατων και σημαντικών μελετών που χρησιμοποιούν εναλλακτικά σενάρια στο πλαίσιο της ανάλυσης του συστήματος «ενέργεια-οικονομία-περιβάλλον» περιλαμβάνουν τον οδικό χάρτη της Ευρωπαϊκής Επιτροπής για την μετάβαση σε μια οικονομία χαμηλών εκπομπών [8], τις μελέτες των παγκόσμιων προοπτικών ενέργειας της Διεθνούς Υπηρεσίας Ενέργειας [38], τις αναλύσεις του IPCC [2] και την έκθεση Stern review [6] για την εκτίμηση του κόστους της κλιματικής αλλαγής. Ωστόσο, σύμφωνα με τους Kann και Weyant [9] είναι αρκετά δύσκολο να εκτελεστεί μια ενδελεχής και ακριβής ανάλυση αβεβαιότητας με την βοήθεια σεναρίων, καθώς πρέπει να σταθμιστούν πιθανοκρατικά και να περιέχουν το σύνολο των αβέβαιων ενδεχομένων.

Η ανάλυση ευαισθησίας εξετάζει την επίδραση στα αποτελέσματα του μοντέλου από την μεταβολή σε ένα περιορισμένο σύνολο βασικών παραμέτρων και εξωγενών υποθέσεων, ελέγχοντας με αυτόν τον τρόπο τη σημασία των τιμών των υποθέσεων που ενσωματώνονται στο μοντέλο. Η ανάλυση ευαισθησίας περιλαμβάνει την μεταβολή στις τιμές των παραμέτρων εισόδου που δεν είναι γνωστές με βεβαιότητα και καταγράφει τις αλλαγές που προκύπτουν σε σημαντικές μεταβλητές εξόδου (αποτελέσματα) και την επίδρασή τους στις αποφάσεις. Η απλούστερη και πιο

συνηθισμένη μέθοδος είναι η μεταβολή μιας μόνο παραμέτρου, η οποία παίρνει ακραίες τιμές, ενώ οι τιμές των υπολοίπων παραμέτρων παραμένουν σταθερές. Από την άλλη πλευρά, όταν υπάρχουν αλληλεξαρτήσεις μεταξύ των μεταβλητών, χρησιμοποιείται η από κοινού ανάλυση ευαισθησίας (Joint sensitivity analysis), η οποία μπορεί να παράγει ένα πιο ακριβές μέτρο της ευαισθησίας των αποτελεσμάτων μεταβάλλοντας διάφορες παραμέτρους από κοινού. Στον τομέα της ενεργειακής οικονομίας, πρόσφατες μελέτες που πραγματοποίησαν ανάλυση ευαισθησίας στην συμπεριφορά των μοντέλων περιλαμβάνουν την ανάλυση με πολλαπλά μοντέλα στην μεταβολή του φόρου άνθρακα [41] και την εκτέλεση προσομοιώσεων με το μοντέλο γενικής ισορροπίας GEM-E3 [58].

Ωστόσο, ο αριθμός των σεναρίων και των τρεξιμάτων ευαισθησίας που μπορεί να πραγματοποιηθεί είναι σχετικά περιορισμένος, ενώ οι παραπάνω μέθοδοι είναι σαφώς για συγκεκριμένο σκοπό και μη γενικεύσιμες (ad-hoc nature). Το εύρος των αποτελεσμάτων δεν αποκαλύπτει το σύνολο της αβεβαιότητας, ειδικά αν η μέγιστη απόκλιση από την best-guess τιμή εμφανίζεται στο εσωτερικό του διαστήματος μεταξύ άνω και κάτω εκατοστημορίων [59]. Επιπλέον με τις παραπάνω μεθοδολογίες δεν είναι δυνατή η μοντελοποίηση της στοχαστικής μεταβλητότητας και συνεπώς δεν μπορούν να υποκαταστήσουν την ανάλυση αβεβαιότητας.

Πρόσφατα, εκτεταμένες αναλύσεις με πολλαπλά μοντέλα [7, 10, 60] έχουν διεξαχθεί, προκειμένου να αναλυθεί η εξέλιξη του παγκόσμιου συστήματος ενέργειας, οικονομίας και περιβάλλοντος με τη χρήση πολλαπλών μοντέλων ενεργειακής ανάλυσης και διαφορετικών υποθέσεων μεταξύ των σεναρίων. Στις περισσότερες από αυτές τις αναλύσεις, τα μοντέλα χρησιμοποιούν ένα ενιαίο σενάριο αναφοράς, το οποίο είναι συνήθως εναρμονισμένο με τις κυριότερες υποθέσεις των μελετών του IPCC [2], για τις δημογραφικές και οικονομικές μεταβλητές (*Shared Socioeconomic Pathways*), τις κλιματικές πολιτικές και τα χαρακτηριστικά σενάρια ατμοσφαιρικών συγκεντρώσεων αερίων του θερμοκηπίου το 2100 (*Representative Concentration Pathways*).

Εκτός από τις πολιτικές μετριασμού της κλιματικής αλλαγής, ένα άλλο σημαντικό θέμα για την Ευρωπαϊκή ενεργειακή πολιτική αφορά την ασφάλεια ενεργειακού εφοδιασμού [136], καθώς η Ευρωπαϊκή Ένωση εισάγει το 53% της ενέργειας που καταναλώνει (περίοδος 2010-2013). Το ποσοστό της εξάρτησης από τις εισαγωγές ενέργειας είναι υψηλότερο για το πετρέλαιο (περίπου 90%) και για το φυσικό αέριο (σχεδόν 65%) σε σχέση με τα στερεά καύσιμα (41%). Το 2013, το κόστος εισαγωγών ενέργειας για την ΕΕ ήταν περίπου 400 δις € [136]. Η εξάρτηση από το εισαγόμενο φυσικό αέριο αυξάνει τους γεωπολιτικούς ενεργειακούς κινδύνους, καθώς εξελίξεις πολιτικής φύσεως (όπως η πρόσφατη κρίση στις σχέσεις Ρωσίας-Ουκρανίας ή η Αραβική Άνοιξη) μπορούν να επηρεάσουν την ασφάλεια του ενεργειακού εφοδιασμού και να αυξήσουν τις δαπάνες για ενεργειακές εισαγωγές. Παρά την μεγάλη σημασία που έχουν οι υποθέσεις για τα κοιτάσματα των υδρογονανθράκων, την γεωγραφική τους κατανομή, τις πολιτικές και το κόστος εξόρυξης όσον αφορά την εξέλιξη του παγκόσμιου και Ευρωπαϊκού ενεργειακού συστήματος και την οικονομικά αποδοτική σχεδίαση των ενεργειακών και κλιματικών πολιτικών, σχετικά περιορισμένη έρευνα

έχει αφιερωθεί στην ποσοτική ανάλυση των συγκεκριμένων πτυχών και την επίδρασή τους στην επίτευξη κλιματικών στόχων σε Ευρωπαϊκό και σε Παγκόσμιο επίπεδο.

Οι Μάντζος και Κάπρος [137] ανέλυσαν τις επιπτώσεις τριών εναλλακτικών σεναρίων για τις τιμές του πετρελαίου και του φυσικού αερίου για το παγκόσμιο και το ευρωπαϊκό ενεργειακό σύστημα χρησιμοποιώντας τα μοντέλα POLES και PRIMES αντίστοιχα. Ο ενεργειακός χάρτης πορείας της ΕΕ για το 2050 [8] παρείχε μια αναλυτική αξιολόγηση των εναλλακτικών υποθέσεων για τα κοιτάσματα υδρογονανθράκων και το πώς αυτά επηρεάζουν την ανάπτυξη του ευρωπαϊκού ενεργειακού συστήματος και την επίτευξη των κλιματικών στόχων. Το ενεργειακό μοντέλο POLES έχει ποσοτικοποιήσει τις επιπτώσεις φιλόδοξων πολιτικών για το κλίμα στην εξέλιξη του παγκόσμιου ενεργειακού συστήματος και στις τιμές των ορυκτών καυσίμων [128]. Πρόσφατα, το πρόγραμμα ROSE διερεύνησε συστηματικά τον αντίκτυπο της σπανιότητας των ορυκτών πόρων για τα σενάρια μετριασμού της κλιματικής αλλαγής με χρήση πολλών μοντέλων ενέργειας-οικονομίας. Το κύριο συμπέρασμα της ανάλυσης είναι ότι η αβεβαιότητα σχετικά με τη διαθεσιμότητα των ορυκτών καυσίμων είναι μεγάλης σημασίας για την αποτελεσματικότητα των κλιματικών πολιτικών και για το κόστος μείωσης των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα [139]. Οι συνέπειες των εναλλακτικών υποθέσεων για τα κοιτάσματα πετρελαίου στο ενεργειακό σύστημα και στην οικονομία της ΕΕ έχουν διερευνηθεί στην μελέτη [141], ενώ η ΔΟΕ έχει εκτιμήσει ποσοτικά την ευαισθησία των αναπτυσσόμενων και αναπτυσσόμενων οικονομιών σε μια παρατεταμένη περίοδο υψηλών διεθνών τιμών πετρελαίου [142].

2.2 Στοχαστικά μοντέλα

2.2.1 Σημασία των στοχαστικών μοντέλων

Ο αποτελεσματικός σχεδιασμός των κλιματικών πολιτικών πρέπει να αντιμετωπίσει τις τεράστιες αβεβαιότητες σχετικά με την έκταση της κλιματικής αλλαγής, τα περιβαλλοντικά της αποτελέσματα καθώς και το κόστος μετριασμού της. Ένα κρίσιμο ζήτημα που εμποδίζει τον σχεδιασμό αποτελεσματικών πολιτικών είναι η εγγενής παρουσία της αβεβαιότητας, καθώς οι περισσότερες παράμετροι των μαθηματικών μοντέλων που αναπαριστούν την εξέλιξη του ενεργειακού συστήματος, των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα και των κλιματικών επιπτώσεων είναι αβέβαιες. Τα περισσότερα μοντέλα που περιγράφουν φυσικά και οικονομικά φαινόμενα βασίζονται σε γεωφυσικές διαδικασίες που δεν έχουν ακόμα κατανοηθεί πλήρως, όπως η αύξηση της μέσης παγκόσμιας θερμοκρασίας και οι περαιτέρω επιπτώσεις από την αύξηση των ατμοσφαιρικών συγκεντρώσεων άνθρακα. Επιπλέον, οι κλιματικές προβλέψεις εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από τις αβεβαιότητες σχετικά με τον πληθυσμό, την οικονομική δραστηριότητα και από την εξέλιξη του ενεργειακού συστήματος (ενεργειακή απόδοση, μείγμα καυσίμων, υποκαταστάσεις ενεργειακών μορφών, διείσδυση ΑΠΕ κ.α.).

Η ανάλυση με πολλαπλά ντετερμινιστικά μοντέλα και εναλλακτικά σενάρια επιτρέπει την εξερεύνηση ενός φάσματος πιθανών μελλοντικών αποτελεσμάτων και το σχετικό εύρος των αβεβαιοτήτων. Παρά την διαφοροποίηση των μοντέλων σε μεθοδολογικά θέματα (τύπος βελτιστοποίησης, προσομοίωση ισορροπίας αγορών) και συγκεκριμένες υποθέσεις (κόστη των τεχνολογιών, παραμετροποίηση, τιμές καυσίμων κ.α.), η ανάλυση με ντετερμινιστικά μοντέλα δεν καλύπτει όλο το εύρος πιθανοτήτων, ούτε δίνει μια κατανομή πιθανοτήτων για τα διάφορα ενδεχόμενα. Επιπλέον, η εγγενής αβεβαιότητα για την μελλοντική εξέλιξη του ενεργειακού συστήματος δεν μπορεί να αντιμετωπιστεί συστηματικά με αυτά τα μοντέλα, καθώς η ανάλυση ευαισθησίας και η εξερεύνηση σεναρίων δεν μπορούν να δώσουν καμία πιθανοτική ένδειξη για τα ενδεχόμενα ούτε να ποσοτικοποιήσουν την αβεβαιότητα (και τους σχετικούς κινδύνους), την οποία συχνά απαιτούν οι αναλυτές και οι φορείς χάραξης πολιτικής, όπως έχει υπογραμμιστεί από τους Kann and Weyant [9]. Οι Kriegler et al [7] αναγνωρίζουν ότι παρά το ιδιαίτερα μεγάλο εύρος των αιτιοκρατικών μοντέλων και των παραδοχών που χρησιμοποιούνται σε μελέτες με πολλαπλά μοντέλα [10, 60], οι τελευταίες δεν καλύπτουν όλο το εύρος των πιθανοτήτων, ενώ τα αιτιοκρατικά μοντέλα αποτυγχάνουν στο να παρέχουν μια ποσοτική ένδειξη για το πόσο πιθανό ή απίθανο ένα ορισμένο αποτέλεσμα μπορεί να είναι [9, 11].

Από την άλλη πλευρά, μια εκτίμηση πιθανότητας είναι σημαντική για τον καθορισμό της εμπιστοσύνης που πρέπει να τοποθετείται σε συγκεκριμένα αποτελέσματα, αλλά μπορεί επίσης να είναι μια κρίσιμη παράμετρος στην εξερεύνηση και αξιολόγηση επενδύσεων στον τομέα της ενέργειας και εναλλακτικών, καθώς ο βαθμός στον οποίον τα αποτελέσματα είναι άγνωστα επηρεάζει την ελκυστικότητα των εναλλακτικών επιλογών. Σε πολλές περιπτώσεις, η μείωση του κινδύνου είναι στρατηγικά σημαντική και συχνά θεωρείται αυτοσκοπός. Για την επίτευξη αυτού του στόχου, ένας αριθμός αβέβαιων μεταβλητών που χρησιμοποιούνται στα μοντέλα πρέπει να θεωρούνται ότι είναι στοχαστικές και έχουν συνδιακύμανση και ως εκ τούτου, η αλληλεξάρτηση μεταξύ των αβεβαιοτήτων μπορεί να αποκτήσει στρατηγική σημασία. Τα στοχαστικά μοντέλα μπορούν να αντιμετωπίσουν τα παραπάνω και συνεπώς εισάγουν μια καινούργια διάσταση στην ποσοτική ανάλυση που βασίζεται σε μοντέλα ενέργειας-οικονομίας και μπορεί να ενισχύσει την αξιοπιστία και την αποδοχή της. Προκειμένου να μετρηθεί η αβεβαιότητα και να καθοριστεί η δομή της, απαιτείται η ανάπτυξη, κατασκευή και χρήση στοχαστικών μοντέλων τα οποία ενσωματώνουν πολλαπλές πηγές αβεβαιότητας καθώς και την αλληλεξάρτησή τους.

2.2.2 Ορισμοί της αβεβαιότητας και της πιθανότητας

Ο σκοπός της παρούσας ενότητας είναι να εισάγει και να ορίσει τις έννοιες της αβεβαιότητας και των πιθανοτήτων στο πλαίσιο της μοντελοποίησης του παγκόσμιου συστήματος ενέργεια-οικονομία-περιβάλλον (για μια αναλυτική περιγραφή δεξ [11]). Γενικά, αβεβαιότητα σημαίνει "έλλειψη γνώσης" και συνεπώς τείνει να έχει μια αρνητική χροιά, παρόλο που αναγνωρίζεται ευρέως ως αναπόφευκτο γεγονός στην πλειοψηφία των πραγματικών καταστάσεων. Συνεπώς, πρέπει να αναλυθεί ο ρόλος της

αβεβαιότητας στη διαδικασία λήψης αποφάσεων. Γενικά, βεβαιότητα για ένα γεγονός σημαίνει αδυναμία του ισχυρισμού ότι αυτό το γεγονός είναι αναληθές. Η έννοια της πιθανότητας βοηθά στην ποσοτικοποίηση της αβεβαιότητας. Η βεβαιότητα ορίζεται ως πιθανότητα 100%. Στενά συνδεδεμένη με την βεβαιότητα είναι η έννοια της μη εφικτότητας (impossibility), η οποία εκφράζεται με πιθανότητα 0%. Η στενή σχέση μεταξύ των δύο είναι ότι η βεβαιότητα της εκδήλωσης του γεγονότος A ισούται με την αδυναμία του λογικού αντίθετου. Κάθε πιθανότητα/κατάσταση μεταξύ των δύο άκρων αναφέρεται ως αβέβαιη.

Τα θεωρητικά μαθηματικά ορίζουν την λεγόμενη αξιωματική θεμελίωση της πιθανότητας, σύμφωνα με την οποία οι πιθανότητες είναι πραγματικοί αριθμοί μεταξύ μηδέν και ένα, οι οποίοι αποδίδονται σε αφηρημένα αντικείμενα (όπως στοιχεία ενός συνόλου). Συγκεκριμένα όταν ορίζεται ένα πείραμα, πιθανότητα του ενδεχομένου E είναι ο πραγματικός αριθμός $P(E) \in [0,1]$ που δίνεται σε κάθε ενδεχόμενο E. Η συνάρτηση $P(\cdot): \Omega \rightarrow [0,1]$ με Ω δειγματικός χώρος με πεπερασμένο πλήθος στοιχείων $\Omega = \{\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n\}$ καλείται συνάρτηση κατανομής πιθανότητας και πρέπει να ικανοποιεί τα παρακάτω αξιώματα:

1. $P(E) \geq 0$ για κάθε ενδεχόμενο E
2. $P(\Omega) = P(\omega_1) + P(\omega_2) + \dots + P(\omega_n) = 1$
3. $P(\omega_1 + \omega_2) = P(\omega_1) + P(\omega_2)$ αν τα ενδεχόμενα αλληλο-αποκλείονται/ασυμβίβαστα
4. Πιθανότητα του αδύνατου ορίζεται ως: $P(\emptyset) = 0$
5. Για 2 συμπληρωματικά ενδεχόμενα ισχύει: $P(\omega_1) = 1 - P(\omega_1')$

Με βάση τα παραπάνω, όλες οι πιθανότητες είναι μη αρνητικοί πραγματικοί αριθμοί που λαμβάνουν τιμές στο κλειστό διάστημα $[0, 1]$ ενώ η κατανομή πιθανότητας πρέπει να έχει την προσθετική ιδιότητα. Επίσης αποδεικνύεται ότι αν το ενδεχόμενο ω_1 είναι υποσύνολο του ω_2 τότε $\omega_1 \subset \omega_2 \Rightarrow P(\omega_1) \leq P(\omega_2)$. Στην πράξη όμως το επίμαχο σημείο είναι ο υπολογισμός της τιμής της πιθανότητας $P(\omega)$ για κάθε ενδεχόμενο ω και αυτό το σημείο (δηλαδή η επιλογή της συνάρτησης πιθανότητας) μπορεί να είναι παραπλανητικό και να μην αντικατοπτρίζει σωστά την συμπεριφορά του συστήματος που μοντελοποιείται. Υπάρχουν πολλές ερμηνείες και αιτιολογήσεις των παραπάνω και συζητούνται συνοπτικά η ερμηνεία κατά Bayes και η στατιστική μέθοδος.

Η πιθανότητα ενός ενδεχομένου A κατά Von Mises ορίζεται ως η οριακή σχετική συχνότητα εμφάνισης, δηλαδή αν πραγματοποιηθεί n φορές το πείραμα θα πρέπει να μετρήσω το πλήθος εμφανίσεων του ενδεχομένου. Ο κλασικός ορισμός πιθανότητας κατά Laplace («κλασικός») ορίζει την πιθανότητα ως τον λόγο του πλήθους των ευνοϊκών αποτελεσμάτων A προς το συνολικό πλήθος των δυνατών αποτελεσμάτων. Ο αξιωματικός ορισμός της πιθανότητας κατά Kolmogorov περιγράφει τις ιδιότητες μιας συνολοσυνάρτησης P από το $F \rightarrow [0, \infty)$ η οποία απεικονίζει κάθε ενδεχόμενο A στο $P(A) \in [0, \infty)$ και θα καλείται «πιθανότητα» αν ισχύουν:

- $P(\Omega) = 1$ (1)
- Αν $\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n$ μια ακολουθία ξένων ανά δύο ενδεχόμενα του Ω τότε

$$P(U_{i=1}^{\infty} \omega_i) = \sum_{i=1}^{\infty} P(\omega_i) \quad (2)$$

Αποδεικνύεται ότι ο κλασικός ορισμός της πιθανότητας αποτελεί απλή συνέπεια των αξιωμάτων Kolmogorov όταν ο Ω είναι πεπερασμένος με ισοπίθανα στοιχειώδη ενδεχόμενα. Επίσης, ο ορισμός της πιθανότητας κατά Von Mises προκύπτει από τα αξιώματα Kolmogorov και μάλιστα από τον γνωστό ως νόμο των μεγάλων αριθμών. Ωστόσο πρακτικά σε κάθε φυσικό φαινόμενο ο αριθμός των πειραμάτων n είναι πεπερασμένος και συνεπώς η σχετική συχνότητα των ενδεχομένων δεν μπορεί να προκύψει από πειράματα.

Οι παραπάνω ορισμοί εμφανίζονται ανεπαρκείς στην αναπαράσταση της πιθανότητας όταν χρησιμοποιείται για να αναπαραστήσει τον βαθμό πίστης. Αντίθετα, η μέθοδος Bayes προτείνει μια σημαντική εναλλακτική ερμηνεία της πιθανότητας ειδικά σε περιπτώσεις όπου δεν μπορώ να εκτελέσω πειράματα, και βασίζεται στον βαθμό πίστης ο οποίος μετράει την εμπιστοσύνη ενός παρατηρητή στο γεγονός ότι το ενδεχόμενο E είναι αλήθεια.

2.2.3 Έννοιες της πιθανότητας

Η στατιστική κατά Bayes βασίζεται σε μία απλή ιδέα: η μόνη ικανοποιητική περιγραφή της αβεβαιότητας επιτυγχάνεται μέσω της πιθανότητας. Η Μπευζιανή προσέγγιση μας δίνει, μέσω του υπολογισμού πιθανοτήτων, ένα ισχυρό εργαλείο για την ανάλυση και την ποσοτικοποίηση της έννοιας της αβεβαιότητας. Η πιθανότητα θεωρείται ως η πιο ευρέως χρησιμοποιούμενη μέθοδος για να περιγράψει ποσοτικά την αβεβαιότητα, ενώ συνήθως εφαρμόζεται η κλασική μέθοδος της συχνότητας, η οποία υποθέτει ότι η πιθανότητα είναι μια αντικειμενική ιδιότητα των θεωρητικώς άπειρων πειραμάτων (παρά ενός μοναδικού γεγονότος). Καθώς η μέθοδος αυτή περιγράφει διαδικασίες οι οποίες είναι από την φύση τους επαναληπτικές, είναι συχνά μη πρακτική μέθοδος για πραγματικά προβλήματα αποφάσεων. Αντίθετα, η υποκειμενική ή Bayesian προσέγγιση θεωρεί την πιθανότητα ενός γεγονότος σαν τον βαθμό πίστης ότι το γεγονός θα συμβεί, δεδομένου ότι η σχετική πληροφόρηση είναι γνωστή. Συνεπώς, η πιθανότητα είναι συνάρτηση της πληροφόρησης και όχι μόνο του γεγονότος. Τα Bayesian δίκτυα είναι μια νέα γενιά πιθανοτικών μοντέλων που εφαρμόζουν τις αρχές της φιλοσοφίας Bayes και μοντελοποιούν πραγματικά προβλήματα αποφάσεων χρησιμοποιώντας θεωρητικά ορθές μεθόδους θεωρίας πιθανοτήτων και αποφάσεων.

Το πλαίσιο στο οποίο κινείται η συμπεραματολογία κατά Bayes είναι παρόμοιο με αυτό της κλασικής στατιστικής: υπάρχει η παράμετρος θ του πληθυσμού η οποία πρέπει να εκτιμηθεί καθώς και η πιθανότητα $f(x/\theta)$ που καθορίζει την πιθανότητα παρατήρησης διαφορετικών x , κάτω από διαφορετικές τιμές της παραμέτρου θ . Όμως η θεμελιώδης διαφορά είναι ότι το θ χρησιμοποιείται σαν τυχαία ποσότητα. Στην ουσία, η συμπεραματολογία βασίζεται στην $f(\theta/x)$ και όχι στην $f(x/\theta)$, δηλαδή στην πιθανότητα της κατανομής της παραμέτρου δεδομένης της x και όχι της x δεδομένης της παραμέτρου. Σε πολλές περιπτώσεις αυτό οδηγεί σε περισσότερο

φυσικά συμπεράσματα σε σχέση με την κλασική στατιστική, για να μπορέσει όμως να επιτευχθεί αυτό θα πρέπει να καθορίσουμε την *a-priori* κατανομή $f(\theta)$ (prior probability distribution), η οποία αντιπροσωπεύει «τις πεποιθήσεις» μας για την κατανομή του θ προτού αποκτήσουμε οποιαδήποτε πληροφορία για τα δεδομένα μας». Στην βασική του μορφή, το θεώρημα του Bayes αφορά υπό συνθήκη πιθανότητες (δεσμευμένες). Αν A, B δυο ενδεχόμενα με $P(A) > 0$, τότε

$$P(B|A) = \frac{P(A|B) * P(B)}{P(A)} \quad (3)$$

Μια προέκταση του θεωρήματος του Bayes γίνεται αν θεωρήσω τα ενδεχόμενα C_1, \dots, C_k , τα οποία διαμερίζουν ένα δειγματικό χώρο Ω , έτσι ώστε τα $C_i \cap C_j = \emptyset$ για κάθε $i \neq j$ και $C_1 \cup \dots \cup C_k = \Omega$. Σε αυτήν την περίπτωση έχω

$$P(C_i|A) = \frac{P(A|C_i) * P(C_i)}{\sum_{j=1}^k P(A|C_j) * P(C_j)} \quad (4)$$

Τα βασικά χαρακτηριστικά της προσέγγισης Bayes είναι η χρήση της άγνωστης παραμέτρου θ ως τυχαία μεταβλητή, ο καθορισμός του μοντέλου πιθανοφάνειας $f(x|\theta)$, ο καθορισμός της *a-priori* κατανομής για το θ (η οποία αντιπροσωπεύει τις πεποιθήσεις μας σχετικά με το θ προτού να έχουμε οποιαδήποτε πληροφορία για δεδομένα), η χρήση του θεωρήματος του Bayes για τον «εκσυγχρονισμό» των *a-priori* πεποιθήσεων μας σε *a-posteriori* πιθανότητες $f(\theta/x)$, και η εξαγωγή της κατάλληλης συμπερασματολογίας.

Το θεώρημα του Bayes σε όρους τυχαίων μεταβλητών με πυκνότητες που συμβολίζονται γενικά με f , παίρνει την εξής μορφή:

$$f(\theta|x) = \frac{f(x|\theta) * f(\theta)}{\int f(x|\theta) * f(\theta) d\theta} \quad (5)$$

Στην οποία το x είναι είτε συνεχής είτε διακριτή μεταβλητή, με την σημείωση ότι στην συνεχή περίπτωση η f είναι η *a-priori* συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας, ενώ στην διακριτή περίπτωση η f είναι η συνάρτηση πιθανότητας του x . Αντίστοιχα, το θ μπορεί να είναι διακριτό ή συνεχές, αλλά στην διακριτή περίπτωση ο παρονομαστής της σχέσης δηλ. το $\int f(x|\theta) * f(\theta) d\theta$ θα ερμηνευθεί αντίστοιχα $\sum f(x|\theta_j) * f(\theta_j)$. Με βάση τα παραπάνω, η *a-posteriori* κατανομή (posterior distribution) είναι ανάλογη της *a-priori* κατανομής (prior distribution) πολλαπλασιαζόμενης με την συνάρτηση πιθανοφάνειας (likelihood function). Το θεώρημα του Bayes προσφέρει τον μηχανισμό με βάση τον οποίο οι *a-priori* πληροφορίες μας αναθεωρούνται από τα δεδομένα και δίνουν την *a-posteriori* πληροφορία. Αυτή η *a-posteriori* πληροφορία, θα αποτελέσει την καινούργια *a-priori* πληροφόρηση, πριν προστεθούν νέα δεδομένα. Η παραπάνω μεθοδολογία εφαρμόζεται και σε περιπτώσεις πολυπαραμετρικών προβλημάτων ανάλογα, όταν δηλαδή αντί για την παράμετρο θ έχω το διάνυσμα $\theta = (\theta_1, \dots, \theta_s)$.

Γενικά, εφαρμόζονται τρεις μέθοδοι για την ενσωμάτωση της αβεβαιότητας στα μοντέλα: διαδοχική εκμάθηση, ανάλυση ευαισθησίας και διάδοση αβεβαιότητας με μεθόδους Monte Carlo. Η ανάλυση εκμάθησης μπορεί να παρέχει προτεραιότητες με την

αναγνώριση των αβεβαιοτήτων που ενδέχεται να μειωθούν και των πλεονεκτημάτων των αποφάσεων που λαμβάνονται σήμερα. Συγκρίνοντας μια στρατηγική δράση και μετά μάθε (“act-then-learn”) με την αντίθετή της (“learn-then-act”). Η πιθανοτική Bayes μέθοδος επιτρέπει την θεώρηση των αποφάσεων σαν αλληλουχία επιλογών. Συνήθως η αβεβαιότητα για τις παραμέτρους και την δομή του μοντέλου εξετάζονται με την ανάλυση Monte Carlo (όπως στον ΠΡΟΜΗΘΕΑ), στην οποία τυχαία δείγματα από την συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας χρησιμοποιούνται σαν είσοδος στο μοντέλο για να παράγουν τις κατανομές των μεταβλητών του μοντέλου και τις πιθανότητες να συμβούν διάφορα ενδεχόμενα. Η ανάλυση Monte Carlo μπορεί να συνδυαστεί με την μέθοδο Bayes οδηγώντας σε μια πιο ενδελεχή εξέταση της αβεβαιότητας. Η μέθοδος Bayes εισάγεται με ένα σύνολο υπό συνθήκη πιθανοτήτων σε κάθε κόμβο απόφασης του μοντέλου που αντιπροσωπεύει την πίστη για την κατάσταση του κόμβου με δεδομένη την κατάσταση των “parent” κόμβων, ενώ περιέχουν όλους τους πιθανούς συνδυασμούς καταστάσεων των “parent” κόμβων. Η πιθανότητα που αντιπροσωπεύει την γνώση πριν την ανάλυση ονομάζεται εκ των προτέρων (“prior”) και υποδηλώνει την πιθανότητα ότι μια παράμετρος εισόδου θα είναι σε μια συγκεκριμένη κατάσταση. Όταν νέα δεδομένα γίνουν διαθέσιμα, οι prior πιθανότητες ενημερώνονται και ενσωματώνουν τα νέα στοιχεία σε εκ των υστέρων πιθανότητες. Το νέο αποτέλεσμα αποτελεί την πιθανότητα ότι μια μεταβλητή θα είναι σε μια συγκεκριμένη κατάσταση, δεδομένων των στοιχείων εισόδου, δηλαδή δεσμευμένες πιθανότητες, καθώς και οι κανόνες που διέπουν το πώς συνδυάζονται οι πιθανότητες.

Η Bayesian μέθοδος θεωρεί ότι οι παράμετροι που χρησιμοποιούνται για να μοντελοποιήσουν στοχαστικές διαδικασίες είναι τυχαίες. Ο αναλυτής έχει εκ των προτέρων συγκεκριμένες πεποιθήσεις για τις τυχαίες παραμέτρους και τις ανανεώνει (εκ των υστέρων πεποιθήσεις) καθώς νέες πληροφορίες γίνονται διαθέσιμες. Από τα μέσα του 20^{ου} αιώνα, η οικονομική θεωρία κυριαρχείται από την ανάλυση Bayes, ότι δηλαδή κάθε πηγή αβεβαιότητας μπορεί να ποσοτικοποιηθεί με καλά ορισμένες πιθανότητες. Η μέθοδος κατά Bayes υποδεικνύει ότι αν δεν υπάρχουν αντικειμενικές πιθανότητες, ο αποφασίζων πρέπει να έχει τις δικές του υποκειμενικές πιθανότητες οι οποίες καθορίζουν τις αποφάσεις του. Επιπλέον, σύμφωνα με την Bayes αξιωματική προσέγγιση [Savage, 219] ο αποφασίζων συμπεριφέρεται με στόχο την βελτιστοποίηση της αναμενόμενης χρησιμότητάς με δεδομένες τις υποκειμενικές πιθανότητες.

Ο Knight [220] υποστήριξε ότι δεν μπορούν όλες οι πηγές αβεβαιότητας να ποσοτικοποιηθούν πιθανοκρατικά και πρότεινε τον διαχωρισμό μεταξύ της έννοιας του ρίσκου, η οποία αναφέρεται σε καταστάσεις που μπορούν να περιγραφούν με πιθανότητες, και της αβεβαιότητας, όπου οι πιθανότητες δεν δίνονται ούτε μπορούν να υπολογιστούν. Ο Gilboa et al [221] υποστηρίζει ότι τα αξιωματικά θεμέλια της μεθόδου κατά Bayes δεν είναι τόσο συναρπαστικά και μπορεί να είναι παράλογο να ακολουθηθεί η μέθοδος, εξαιτίας της ανικανότητάς να εκφράσει την άγνοια (έλλειψη πεποίθησης) καθώς απαιτεί ο αποφασίζων να έχει ποσοτικοποιημένες υποκειμενικές πιθανότητες. Από την στιγμή που ο αποφασίζων δεν μπορεί να εκφράσει την άγνοιά του, μπορεί να δώσει αυθαίρετες απαντήσεις που να παραβιάζουν τα πιθανοκρατικά αξιώματα. Αν δεν

υπάρχουν επιπλέον κατευθυντήριες αρχές, ο αποφασίζων που διαλέγει υποκειμενικά μια πιθανότητα θα αναρωτηθεί αν είναι λογικό να λαμβάνει αποφάσεις με βάση αυτήν. Ίσως είναι πιο λογικό να παραδεχτεί ότι οι πιθανότητες και άρα οι αποφάσεις που απορρέουν από αυτές επιλέχθηκαν αυθαίρετα.

Η θεωρία αποφάσεων αναπτύχθηκε παράλληλα με την θεωρία πιθανοτήτων κατά τον 16ο και 17ο αιώνα. Η πιθανότητα είχε δυο διαφορετικές ερμηνείες: ερμηνεύει την ιδέα της τύχης, με αναφορά στην σχετική συχνότητα των ενδεχομένων σε πειράματα που επαναλαμβάνονται υπό τις ίδιες συνθήκες. Από την άλλη, η πιθανότητα αναφέρεται στην έννοια του βαθμού πίστης, ακόμα και όταν δεν υπάρχει τυχαιότητα, και δεν μπορούν να πραγματοποιηθούν επαναλαμβανόμενα πειράματα. Η δεύτερη ερμηνεία εξελίχθηκε με τον χρόνο στην Μπευζιανή προσέγγιση στις πιθανότητες. Ο Pascal είναι ένας σημαντικός πρωτοπόρος στην θεωρία πιθανοτήτων με το διάσημο στοίχημά του ως προς την αξία της πίστης στον Θεό, στο οποίο εφάρμοσε μαθηματική λογική (που έχει αναπτυχθεί για αντικειμενικές πιθανότητες) στην υποκειμενική πιθανότητα ύπαρξης του Θεού χωρίς δυνατότητα για επαναλαμβανόμενα πειράματα. Έτσι εισήγαγε ανεπίσημα πολλές ιδέες της μοντέρνας θεωρίας αποφάσεων όπως τον πίνακα απόφασης, τις υποκειμενικές πιθανότητες, τις κυρίαρχες στρατηγικές και την μεγιστοποίηση της αναμενόμενης χρησιμότητας. Επιπλέον, καθώς οι υποκειμενικές πιθανότητες ήρθαν στο προσκήνιο, συνοδεύτηκαν από την δυνατότητα η πιθανότητα να μην είναι γνωστή (άγνοια).

Η θεωρία αποφάσεων και η αναπαράσταση της αβεβαιότητας είναι το αποτέλεσμα πρωτοπόρων συνεισφορών στον 20^ο αιώνα. Ο Ramsey [222] υποστήριζε ότι ο βαθμός πίστης συνδέεται με υποκειμενικές πιθανότητες και με την έννοια της προθυμίας για στοίχημα. Ο de Finetti στις εργασίες του έδωσε έμφαση στις δυο ιδέες των υποκειμενικών πιθανοτήτων. Εισήγαγε την έννοια της ποιοτικής πιθανότητας η οποία δεν συνδέεται με την συμπεριφορά στοιχηματισμού. Η καινοτομία του de Finetti υπήρξε τόσο μεθοδολογική (εισαγωγή της αξιωματικής μεθόδου και της αριθμητικής της αναπαράστασης από τα κατάλληλα αξιώματα) όσο και επιστημονική (καθώς έδωσε το πρώτο αποτέλεσμα που έκανε αξίωμα την υποκειμενική πιθανότητα). Ο Savage [219] ενσωμάτωσε την θεωρία υποκειμενικών πιθανοτήτων του de Finetti με την θεωρία της βελτιστοποίησης της αναμενόμενης χρησιμότητας υπό αβεβαιότητα (von Neumann and Morgenstern's vNM, 1947). Η θεωρία της αναμενόμενης χρησιμότητας συνδυάζει 2 έννοιες: την προσωπική συνάρτηση χρησιμότητας και την υποκειμενική κατανομή πιθανοτήτων (που συνήθως βασίζεται στην θεωρία του Bayes). Ο Savage απέδειξε ότι αν ο αποφασίζων υπακούει στα αξιώματα του ορθολογισμού με την πίστη ότι ένα αβέβαιο ενδεχόμενο έχει πιθανά αποτελέσματα x_i το καθένα με χρησιμότητα $u(x_i)$, τότε οι προσωπικές επιλογές μπορούν να εξηγηθούν ως συνάρτηση της συνάρτησης χρησιμότητας συνδυασμένης με την πιθανότητα κάθε ενδεχομένου $P(x_i)$. Η υποκειμενική αναμενόμενη χρησιμότητα είναι η μέση τιμή της χρησιμότητας $\sum_i u(x_i) P(x_i)$. Αν αντί για x_i επιλέξει y_j τότε η υποκειμενική αναμενόμενη χρησιμότητα είναι $\sum_j u(y_j) P(y_j)$. Η απόφαση εξαρτάται από το ποια μέση υποκειμενική χρησιμότητα είναι μεγαλύτερη καθώς διαφορετικοί άνθρωποι λαμβάνουν

διαφορετικές αποφάσεις εξαιτίας των διαφορετικών συναρτήσεων χρησιμότητας ή/και των διαφορετικών πεποιθήσεων σχετικά με τις πιθανότητες των ενδεχομένων. Επίσης αποδείχθη ότι οι προτιμήσεις διατηρούνται για γραμμικούς συνδυασμούς αποφάσεων (κυρτότητα).

Από την άλλη πλευρά, πειράματα απέδειξαν ότι οι άνθρωποι συνήθως δεν συμπεριφέρονται με τρόπο συμβατό με τα αξιώματα υποκειμενικής αναμενόμενης χρησιμότητας του Savage. Η κλασική Μπαεζιανή θεωρία αντιπροσωπεύει πεποιθήσεις με πιθανότητες, αλλά δεν συλλαμβάνει τον βαθμό εμπιστοσύνης του αποφασίζοντα στις δικές του πιθανοτικές εκτιμήσεις, που εξαρτάται από την ποιότητα της πληροφόρησης. Ο Ellsberg έδειξε πως αυτός ο περιορισμός μπορεί να οδηγήσει τους αποφασίζοντες να παραβιάσουν το θεώρημα του Savage και να εκφράσουν προτιμήσεις που είναι ασύμβατες με τα μέτρα πιθανοτήτων. Ο Ellsberg υποστήριξε ότι όταν οι πιθανότητες είναι άγνωστες (ambiguity-ασάφεια) οδηγούν σε διαφορετικές αποφάσεις σε σύγκριση με καταστάσεις όπου υπάρχει αβεβαιότητα αλλά με γνωστές πιθανότητες (ρίσκο) και εξέτασε το θέμα με πείραμα με δοχεία με μπάλες διαφορετικού χρώματος. Τα πειράματα του Ellsberg αποκάλυψαν το φαινόμενο της αποστροφής στην αβεβαιότητα ή αποστροφή στην ασάφεια, δηλαδή οι άνθρωποι τείνουν να προτιμούν καταστάσεις με γνωστές πιθανότητες σε σύγκριση με άγνωστες πιθανότητες. Ενώ υπάρχουν και εξαιρέσεις (π.χ. τζόγος) οι αποφασίζοντες συνήθως τείνουν να αποστρέφονται την αβεβαιότητα.

Από την στιγμή που η αναλογία χρωμάτων είναι άγνωστη, τότε ο αποφασίζων μπορεί να υιοθετήσει μια πιθανοτική πεποίθηση που αντανακλά συμμετρία (δηλαδή 50-50 πιθανότητα) καθώς δεν υπάρχει κάποιος λόγος για να πιστεύουμε ότι οι μαύρες μπάλες είναι περισσότερες από τις άσπρες ή το αντίθετο και να δημιουργήσει ένα στοιχείο ισοδύναμο με γνωστές πιθανότητες. Βασισμένοι σε τέτοια επιχειρήματα, οι θεωρητικοί πιστεύουν ότι δεν υπάρχει πρόβλημα με τις υποκειμενικές πιθανότητες τουλάχιστον όσον αφορά τις θεωρίες απόφασης. Ωστόσο, στα καθημερινά προβλήματα δεν υπάρχουν συμμετρίες στα στοιχήματα με ρίσκο, π.χ. κάποιος δεν ξέρει ποια είναι η πιθανότητα η αύξηση της μέσης παγκόσμιας θερμοκρασίας να ξεπεράσει τους 4°C, αλλά δεν μπορεί να υποθέσει πιθανότητα 50% βασισμένος στην αρχή της αδιαφορίας του Laplace [218] καθώς τα δυο ενδεχόμενα δεν είναι συμμετρικά (μικρότερη ή μεγαλύτερη αύξηση από 4°C). Επίσης η ομοιόμορφη κατανομή της θερμοκρασίας δεν μπορεί να είναι μια λογική μέθοδος για την ανάθεση πιθανοτήτων. Η βασική δυσκολία είναι ότι στα περισσότερα προβλήματα υπάρχει μεγάλη πληροφόρηση για να εφαρμοστεί η αρχή της αδιαφορίας του Laplace ενώ παράλληλα περιορισμένη πληροφόρηση για να υιοθετήσω ακριβείς πιθανότητες. Οι κλιματικές πολιτικές έχουν αβεβαιότητες που ούτε μπορούν να ποσοτικοποιηθούν ρητά ούτε να υποθέσω συμμετρικές πιθανότητες.

Ο ορισμός de Finetti [67] της πιθανότητας ως «μέτρο της πίστης» μετριέται συχνά μέσω των αποδόσεων και των στοιχημάτων. Επομένως, η πιθανότητα 99% ενός γεγονότος ορίζεται ως η προθυμία (ενός ατόμου) να ποντάρει 99 μονάδες έναντι μιας ότι το γεγονός είναι αληθινό. Επιπρόσθετα, απαιτείται επίσης ότι είναι πρόθυμος να στοιχηματίσει μία μονάδα έναντι 99 ότι το γεγονός δεν είναι αληθές και, ως εκ τούτου,

ότι το άτομο είναι αδιάφορο μεταξύ των δύο (υποθετικών) στοιχημάτων. Ο παραπάνω ορισμός σημαίνει σαφώς ότι κάθε άτομο μπορεί να έχει διαφορετικές πεποιθήσεις και άρα οι πιθανότητες είναι υποκειμενικές (οι οποίες χρειάζεται να διαχωρίζονται από τις αυθαίρετες πιθανότητες). Για παράδειγμα, λέγοντας ότι η πιθανότητα προσγείωσης ενός συμβατικού ζαριού σε μία από τις έξι πλευρές του είναι ένα έκτο είναι υποκειμενική και διακρίνεται σαφώς από κάθε ατεκμηρίωτη (και αυθαίρετη) αξίωση που αποκλίνει από αυτό αναθέτοντας διαφορετικές πιθανότητες για άλλες πλευρές του ζαριού.

Από τα παραπάνω κατέστη σαφές ότι ένα σημαντικό θέμα για το οποίο δεν υπάρχει γενική συμφωνία αφορά το ζήτημα αν οι πιθανότητες θα πρέπει να θεωρηθούν ως αντικειμενικές ή υποκειμενικές. Στο πλαίσιο της ανάλυσης αβεβαιότητας σε μοντέλα ενεργειακής ανάλυσης, πρέπει να αναφέρουμε ότι οι πιθανότητες που εισάγονται δεν είναι αποτέλεσμα φυσικών πειραματικών μετρήσεων, αλλά μοντελικών διαδικασιών αναπαράστασης και ανάλυσης και συνεπώς οι αριθμητικές τιμές τους είναι αβέβαιες. Οι ποσοτικές μέθοδοι (π.χ. αριθμητικά μοντέλα) συχνά αντιμετωπίζουν την κριτική ότι δίνουν μεγαλύτερη ακρίβεια απ' όση δικαιολογείται ειδικά όταν η είσοδος στο μοντέλο είναι αβέβαιη και προφανώς οδηγεί σε αβεβαιότητα για τις ενδογενείς μεταβλητές. Μια πιθανολογική ποσοτική εκτίμηση είναι πιο εύκολο να ερμηνευτεί σωστά σε σχέση με μια ποιοτική πιθανοτική εκτίμηση. Άλλο πλεονέκτημα της ποσοτικής αξιολόγησης είναι η απλότητα και συγκρισιμότητα των αποτελεσμάτων καθώς αν εφαρμοστεί η ίδια μέθοδος διαχρονικά μπορεί να μετρηθεί αν βελτιώνεται η κατανόηση (όταν η αβεβαιότητα μικραίνει) ή αν η αβεβαιότητα μεγαλώνει με την πάροδο του χρόνου.

2.2.4 Μέθοδος Μόντε Κάρλο

Με βάση την ανάλυση στην ενότητα 2.2.1, προκειμένου να ποσοτικοποιηθεί η αβεβαιότητα και καθοριστεί η δομή της, απαιτείται η ανάπτυξη και η χρήση των στοχαστικών μοντέλων, τα οποία περιέχουν μια ή περισσότερες τυχαίες/αβέβαιες μεταβλητές. Ένα στοχαστικό μοντέλο είναι ένα εργαλείο για την εκτίμηση των κατανομών πιθανότητας των αποτελεσμάτων, επιτρέποντας σε μία ή περισσότερες παραμέτρους εισόδου να μεταβάλλονται τυχαία. Οι κατανομές των αποτελεσμάτων για τις ενδογενείς μεταβλητές του μοντέλου προέρχονται από ένα μεγάλο αριθμό από προσομοιώσεις, οι οποίες αντικατοπτρίζουν την τυχαία διακύμανση στις παραμέτρους.

Οι μέθοδοι Monte Carlo αποτελούν μια ευρεία κατηγορία υπολογιστικών αλγορίθμων που βασίζονται σε επαναλαμβανόμενη τυχαία δειγματοληψία για την απόκτηση αριθμητικών αποτελεσμάτων και συχνά χρησιμοποιούνται σε προβλήματα φυσικής, επιχειρησιακής έρευνας και μαθηματικών και είναι ιδιαίτερα χρήσιμοι όταν είναι δύσκολο ή αδύνατο να χρησιμοποιηθούν αναλυτικές μαθηματικές μεθοδολογίες. Με βάση αυτήν την μέθοδο, πρέπει να εκτελεστούν προσομοιώσεις αρκετές φορές, προκειμένου να ληφθεί η κατανομή των άγνωστων/αβέβαιων μεταβλητών. Κάθε μέθοδος που επιλύει ένα πρόβλημα με την παραγωγή των κατάλληλων τυχαίων αριθμών που έχουν συγκεκριμένες ιδιότητες ορίζεται ως μέθοδος Monte Carlo [16].

Η εφαρμογή των στοχαστικών μοντέλων με χρήση των μεθόδων Monte Carlo ξεκίνησε αρχικά από τους Metropolis και Ulam [12], ενώ δούλευαν σε προγράμματα

πυρηνικής ενέργειας στα εργαστήρια του Los Alamos. Αμέσως μετά το ρηξικέλευθο επίτευγμα των Metropolis και Ulam, ο John Von Neumann κατάλαβε την μεγάλη σημασία του και προγραμμάτισε τον πρώτο ηλεκτρονικό υπολογιστή γενικού σκοπού (ENIAC) ώστε να εκτελεί υπολογισμούς Monte Carlo. Πριν από τους Metropolis και Ulam, την δεκαετία του 1930, ο φυσικός Enrico Fermi πρώτος πειραματίστηκε με την μέθοδο Monte Carlo, ενώ μελετούσε την διάχυση νετρονίων, αλλά δεν δημοσίευσε τίποτα για αυτό [13]. Οι μέθοδοι Monte Carlo ήταν στο επίκεντρο των προσομοιώσεων που απαιτούνται για το Manhattan Project³, αν και η χρήση τους περιοριζόνταν σημαντικά από τα διαθέσιμα υπολογιστικά εργαλεία. Στη δεκαετία του 1950, οι μέθοδοι Monte Carlo χρησιμοποιήθηκαν εκτεταμένα στο εργαστήριο του Los Alamos για την ανάπτυξη της πρώτης βόμβας υδρογόνου και έγιναν ιδιαίτερα δημοφιλείς στους τομείς της φυσικής, της χημείας, των μαθηματικών και της επιχειρησιακής έρευνας. Η Rand Corporation και η Πολεμική Αεροπορία των Η.Π.Α. ήταν δύο από τους σημαντικότερους οργανισμούς που χρηματοδότησαν την έρευνα και την διάδοση των πληροφοριών σχετικά με τις μεθόδους Monte Carlo κατά τη διάρκεια αυτής της περιόδου.

Η μέθοδος Monte Carlo απαιτεί την παραγωγή μεγάλων ποσοτήτων τυχαίων αριθμών και η εκτεταμένη χρησιμοποίησή τους έδωσε ώθηση στην ανάπτυξη των γεννητριών ψευδο-τυχαίων αριθμών [15], οι οποίοι είναι πολύ πιο γρήγοροι σε σύγκριση με τους πίνακες των τυχαίων αριθμών που είχαν χρησιμοποιηθεί προηγουμένως για δειγματοληψία. Η χρησιμοποίηση λιστών με πραγματικά τυχαίους αριθμούς είναι στο επίκεντρο της μεθόδου Monte Carlo από την δεκαετία του 1940-1950, αλλά ήταν ιδιαίτερα αργή διαδικασία. Όμως ο Von Neumann ανέπτυξε μια μεθοδολογία για να υπολογίσει ψευδοτυχαίους αριθμούς, χρησιμοποιώντας τη μέση τετραγωνική μέθοδο [14]. Αν και η μέθοδος αυτή έχει επικριθεί έντονα, ο Von Neumann δικαιολογεί την επιλογή του καθώς εκείνη την εποχή δεν υπήρχε μέθοδος παραγωγής πραγματικών τυχαίων αριθμών και η διαδικασία που πρότεινε ήταν αρκετά γρήγορη και έδινε σχετικά ικανοποιητικά αποτελέσματα. Η παραγωγή τυχαίων δειγμάτων έχει αναπτυχθεί ραγδαία μετά την δεκαετία του '50 και σήμερα δυο από τους πιο συνηθισμένους αλγόριθμους που χρησιμοποιούνται είναι οι γεννήτριες του Knuth [17] και του L'Ecuyer [18], τις οποίες μάλιστα χρησιμοποιήσαμε στα πλαίσια της παρούσας διατριβής για την παραγωγή τυχαίων αριθμών κατά την διαδικασία κατασκευής των κατανομών πιθανοτήτων των παραμέτρων εισόδου για τα πειράματα Monte Carlo.

Η χρήση των μεθόδων Monte Carlo στη μοντελοποίηση φυσικών προβλημάτων επιτρέπει την εξέταση πολύπλοκων συστημάτων, των οποίων η επίλυση με άλλο τρόπο θα ήταν από δύσκολη έως αδύνατη. Επιπλέον, η μέθοδος Monte Carlo χαρακτηρίζεται από απλή δομή του υπολογιστικού αλγόριθμου με επαναλαμβανόμενες ανεξάρτητες δειγματοληψίες (N φορές) και από συνάθροιση των ανεξάρτητων N πειραμάτων. Η μέθοδος είναι ιδιαίτερα αποτελεσματική στα πολυδιάστατα προβλήματα, όπου και χρησιμοποιείται κυρίως, γιατί η ακρίβεια της εξαρτάται μόνο από την πολυπλοκότητα

³ Το Manhattan Project αφορούσε στην κατασκευή της πρώτης ατομικής βόμβας κατά την διάρκεια του Β' Παγκόσμιου πολέμου, με επικεφαλής τις ΗΠΑ και την συμμετοχή του Καναδά και του Ηνωμένου Βασιλείου.

του προβλήματος. Για αυτό το λόγο, η μέθοδος Monte Carlo είναι η μόνη εφαρμόσιμη σε ένα μεγάλο πεδίο προβλημάτων πολλών διαστάσεων, με εφαρμογές από την φυσική ως την οικονομία, όταν η επίλυσή τους δεν μπορεί να γίνει με αναλυτικές μεθόδους. Από την άλλη πλευρά, η μέθοδος μπορεί να είναι αρκετά αργή αφού το σφάλμα είναι ανάλογο με $1/\sqrt{N}$, όπου N ο αριθμός των δοκιμών και συνεπώς για να μειωθεί το σφάλμα κατά ένα παράγοντα 10 απαιτείται αύξηση του αριθμού των πειραμάτων κατά 100. Εξαιτίας των χαρακτηριστικών της μεθόδου, της εύκολης χρήσης της, της εφαρμοσιμότητάς της σε πολλά πεδία, αλλά και της αργής σύγκλισης, ένα μεγάλο μέρος υπολογιστικού χρόνου δαπανάται σε υπολογισμούς Monte Carlo.

2.2.5 Είδη στοχαστικών μοντέλων

Μια σημαντική διάκριση των αβεβαιοτήτων στα μοντέλα είναι μεταξύ γνωσιολογικής (epistemic), η οποία βασίζεται σε έλλειψη γνώσης και συνεπώς μπορεί να περιοριστεί με την συλλογή αξιόπιστων δεδομένων και την βελτίωση του μοντέλου, και μεταβλητότητα/στοχαστική αβεβαιότητα (aleatory) η οποία καθορίζεται από την εγγενή τυχαιότητα ενός φαινομένου [62]. Οι Spiegehalter και Riesch [63] προτείνουν μια δομή πέντε επιπέδων για την αξιολόγηση των αβεβαιοτήτων στην ανάλυση με την χρήση μοντέλων και διακρίνουν μεταξύ άδηλης (aleatory) και επιστημικής/γνωσιολογικής (epistemic) αβεβαιότητας, ενώ οι Walker et al [64] παρέχουν ένα διεπιστημονικό θεωρητικό πλαίσιο για τη συστηματική ανάλυση της αβεβαιότητας. Επιπλέον, οι Stainforth et al [65] υπογραμμίζουν την σημασία της ανάλυσης των αβεβαιοτήτων για την υποστήριξη των αποφάσεων και τις κλιματολογικές προβλέψεις.

Τα τελευταία χρόνια, η μέθοδος Monte Carlo εφαρμόζεται σε ένα μεγάλο εύρος πεδίων, όπως στον τομέα της μηχανικής, στα μαθηματικά και στην φυσική, στις κοινωνικές και στις οικονομικές επιστήμες. Τα σύγχρονα προβλήματα οικονομικών, εφαρμοσμένων μαθηματικών και επιχειρησιακής έρευνας περιλαμβάνουν περίπλοκα συστήματα εξισώσεων, στα οποία οι μέθοδοι Monte Carlo προσφέρουν λύσεις όταν οι αναλυτικές μέθοδοι επίλυσης δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν. Οι κύριοι λόγοι της ευρείας χρήσης της μεθόδου είναι η ευκολία χρήσης, η αναγνώριση των προβλημάτων στα οποία η μέθοδος υπερτερεί και η απλή δομή του υπολογιστικού της αλγόριθμου, ενώ τις τελευταίες δεκαετίες οι τεχνικές μείωσης της διακύμανσης [19] (variance reduction) που έχουν αναπτυχθεί κάνουν την μέθοδο περισσότερο αποτελεσματική,

Προκειμένου να μετρηθεί η αβεβαιότητα και να καθοριστεί η δομή της, απαιτείται η χρήση στοχαστικών μοντέλων, τα οποία μπορούν να ταξινομηθούν σε τρεις μεγάλες κατηγορίες:

- Τα μοντέλα *προσομοίωσης διεργασιών*, τα οποία είναι υποδείγματα κλειστών συστημάτων (πχ. λειτουργία μονάδας παραγωγής σε εργοστάσιο, συστήματα ουρών αναμονής-queuing, μοντέλα ροής), που ενσωματώνουν αιτιώδη διαφάνεια και συνήθως εξετάζουν τη συμπεριφορά του μοντέλου όταν ένας μικρός αριθμός παραμέτρων είναι αβέβαιες. Η μελέτη [66] παρουσιάζει αναλυτικά τα είδη και τα

χαρακτηριστικά στοχαστικών μοντέλων που χρησιμοποιούνται στην θεωρία των ουρών αναμονής.

- Τα μοντέλα *ανάλυσης χρονοσειρών*, τα οποία βρίσκουν εφαρμογές κυρίως στους τομείς των ασφαλίσεων, του χρηματιστηρίου και των οικονομικών, βασίζονται σε λεπτομερή στατιστική ανάλυση της συμπεριφοράς των αγορών και εξετάζουν τα πρότυπα διακύμανσης με την πάροδο του χρόνου. Τα μοντέλα ανάλυσης χρονοσειρών χρησιμοποιούν τεράστιες ποσότητες δεδομένων, αλλά δεν επιτρέπουν την δομική ανάλυση και εξερεύνηση της αιτιότητας (σχέση αιτίας και αποτελέσματος). Τα μοντέλα και οι παράμετροι τους επιλέγονται έτσι ώστε να ταιριάζουν στα ιστορικά οικονομικά στοιχεία, και άρα αναμένεται να παράγουν συνεπείς προβλέψεις τουλάχιστον για το βραχυπρόθεσμο μέλλον. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αυτών των μοντέλων αποτελεί το μοντέλο του Wilkie [20], το οποίο είναι ένα στοχαστικό μοντέλο επενδύσεων για αναλογιστική χρήση και μπορεί να εκτελέσει μακροχρόνιες προβλέψεις βασισμένες σε στατιστική ανάλυση ιστορικών δεδομένων. Οι Whitten και Thomas [21] επέκτειναν το στοχαστικό μοντέλο επενδύσεων του Wilkie με την εφαρμογή μη γραμμικού προγραμματισμού στις χρονοσειρές των επενδύσεων και την υλοποίηση τεχνικών ARCH (μοντέλο αυτοπαλινδρόμησης με δεσμευμένη ετεροσκεδαστικότητα).
- Τα τελευταία χρόνια ένα τρίτο είδος υβριδικών στοχαστικών μοντέλων αναδύεται, το οποίο συνδυάζει τα διαρθρωτικά ζητήματα της αβεβαιότητας, προκειμένου να εκπροσωπήσει τις αλυσίδες δομικής αιτιότητας για όλες τις σημαντικές μεταβλητές, με ανάλυση χρονολογικών σειρών για την παροχή προτύπων της αβεβαιότητας σε ένα μεγάλο χρονικό διάστημα.

Αυτή η διατριβή παρουσιάζει την ανάπτυξη του στοχαστικού μοντέλου ΠΡΟΜΗΘΕΑΣ, το οποίο ανήκει στην τρίτη κατηγορία που παρουσιάστηκε παραπάνω. Ο ΠΡΟΜΗΘΕΑΣ είναι ένα αυτόνομο μοντέλο προσομοίωσης του παγκόσμιου ενεργειακού συστήματος που αποτελείται από ένα σύνολο στοχαστικών εξισώσεων. Πρόκειται για ένα στοχαστικό μοντέλο που παράγει από κοινού κατανομές για μια σειρά από μεταβλητές που σχετίζονται με το παγκόσμιο ενεργειακό σύστημα, με ορισμένες επεκτάσεις στους τομείς των εκπομπών και των συγκεντρώσεων αερίων του θερμοκηπίου (GHG) και της οικονομικής δραστηριότητας.

2.3 Στοχαστικά μοντέλα ενεργειακής ανάλυσης

Η σημασία της αβεβαιότητας στο πλαίσιο του συστήματος «ενέργεια-οικονομία-περιβάλλον» έχει αναγνωριστεί ευρέως στο παρελθόν. Για παράδειγμα ο Stern έχει δημοσιεύσει ότι «αν ο στόχος είναι η μείωση των εκπομπών άνθρακα [...] τότε οι κατάλληλες πολιτικές πρέπει να υλοποιηθούν, οι οποίες θα ενθαρρύνουν την ανάπτυξη ενός χαρτοφυλακίου επιλογών; Αυτές οι πολιτικές θα δράσουν τόσο για τη μείωση των κινδύνων από την κλιματική αλλαγή όσο και για την βελτίωση των πιθανοτήτων επιτυχίας των κλιματικών πολιτικών (Stern, 2006 [6]). Είναι σαφές, ωστόσο, ότι το χαρτοφυλάκιο θα εξαρτηθεί σε μεγάλο βαθμό από την αβεβαιότητα που

περιβάλλει τόσο τις επενδύσεις στον ενεργειακό τομέα (π.χ. επενδύσεις σε εργοστάσια παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, επενδύσεις εξοικονόμησης ενέργειας και ανάπτυξης υποδομών) όσο και τις μελλοντικές πολιτικές μετριασμού των επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής. Όσον αφορά το κλιματικό σύστημα, η Διακυβερνητική Επιτροπή για την Κλιματική Αλλαγή (IPCC [2, 27]) διακρίνει τις κλιματικές αβεβαιότητες μεταξύ των αβεβαιοτήτων που σχετίζονται με τις αποκρίσεις του κύκλου άνθρακα, την ευαισθησία του κλίματος σε μεταβολές του κύκλου άνθρακα και των κλιματικών επιπτώσεων ανά περιοχή. Επίσης, ένας από τους στόχους του IPCC είναι να ενισχύσει την ανάπτυξη ενός συνεπούς, αλλά χωρίς περιορισμούς, και συνεκτικού πλαισίου για να περιγράψει την πηγή, το μέγεθος και τον χαρακτήρα των αβεβαιοτήτων που συνδέονται με το θέμα της κλιματικής αλλαγής.

Ο Pindyck (2007) [23] υποστηρίζει ότι η αβεβαιότητα για τα περιβαλλοντικά προβλήματα είναι ιδιαίτερα σημαντική για τον σχεδιασμό και την αξιολόγηση των πολιτικών και συνεπώς η ενσωμάτωσή της στο σχεδιασμό της πολιτικής είναι ένα από τα πιο σημαντικά ερευνητικά πεδία στα οικονομικά του περιβάλλοντος. Οι αβεβαιότητες έχουν ιδιαίτερη σημασία για την κλιματική αλλαγή, η οποία περιλαμβάνει μη-γραμμικές συναρτήσεις κόστους-οφέλους και πιθανότητα φυσικών καταστροφών και μη αναστρέψιμων φαινομένων. Οι κύριες πηγές αβεβαιότητας που αναγνωρίζει η μελέτη του Pindyck είναι:

- Η αβεβαιότητα σχετικά με το μέγεθος της κλιματικής αλλαγής
- Η αβεβαιότητα σε σχέση με το κόστος και τα μελλοντικά οφέλη των εναλλακτικών κλιματικών πολιτικών και ενεργειακών τεχνολογιών
- Η αβεβαιότητα σχετικά με τα προεξοφλητικά επιτόκια (discount rates) που πρέπει να χρησιμοποιηθούν στην αξιολόγηση κλιματικών πολιτικών και έχουν ιδιαίτερα μεγάλη επίπτωση στην ανάλυση του μακροπρόθεσμου ορίζοντα.

Οι Dietz and Fankhauser (2010) [24] εξετάζουν την υλοποίηση σκιωδών τιμών (φόρος στις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα) για την περιβαλλοντική προστασία υπό την παρουσία αβεβαιότητας. Η αβεβαιότητα όσον αφορά το χρησιμοποιούμενο υπόδειγμα και η ρευστότητα για τους κλιματικούς στόχους και τις αντίστοιχες πολιτικές επηρεάζουν σημαντικά το οριακό κόστος μείωσης των εκπομπών άνθρακα. Η μετακίνηση από τις εκτιμήσεις των μοντέλων για το οριακό κόστος μείωσης εκπομπών στην ρύθμιση τιμών μέσω πολιτικών απαιτεί εμπιστοσύνη στο πολιτικό περιβάλλον, τόσο από την άποψη συνοχής του με τον περιβαλλοντικό στόχο όσο και για την αποτελεσματικότητα του σαν εργαλείου πολιτικής.

Ο Peterson (2006) [25] παρουσιάζει μια επισκόπηση των διαφόρων τύπων ανάλυσης αβεβαιότητας που έχουν διεξαχθεί σε μοντέλα μεγάλης κλίμακας για την οικονομική ανάλυση της κλιματικής αλλαγής. Η μελέτη ταξινομεί το πρόβλημα της αβεβαιότητας σε τρεις γενικές κατηγορίες:

- Η παραμετρική αβεβαιότητα, η οποία προκύπτει λόγω της ατελούς γνώσης του συστήματος που αναπαριστά το μοντέλο

- Η στοχαστική αβεβαιότητα (Stochastic uncertainty) η οποία οφείλεται στη φυσική μεταβλητότητα ορισμένων περιβαλλοντικών διεργασιών (πχ μη αναστρέψιμες επενδύσεις σε υποδομές και τεχνολογίες, ακραία καιρικά φαινόμενα)
- Η αβεβαιότητα σχετικά με την εξέλιξη του πληθυσμού, του ΑΕΠ και οικονομικών μεταβλητών, όπως το προεξοφλητικό επιτόκιο

Η παραμετρική αβεβαιότητα δεν καλύπτει μόνο τις αβέβαιες παραμέτρους του μοντέλου, αλλά και την γενική δομή του υποδείγματος και συνεπώς εμπεριέχει την αβεβαιότητα για τις σχετικές παραμέτρους και τις διασυνδέσεις μεταξύ τους καθώς και τις κατάλληλες μορφές των εξισώσεων. Η παραμετρική αβεβαιότητα δεν είναι σταθερή στο χρόνο και μπορεί να μειωθεί με επιπλέον έρευνα (πχ. ακριβέστερη συλλογή δεδομένων). Η στοχαστική αβεβαιότητα προκαλείται από φαινόμενα που δεν μπορούν να περιγραφούν ως ντετερμινιστικές αλληλεπιδράσεις μεταξύ των συνιστωσών του συστήματος «ενέργεια- περιβάλλον» (πχ. το φαινόμενο El Nino) και συχνά εμφανίζουν ιδιότητες που είναι χαρακτηριστικές των στοχαστικών διαδικασιών. Σύμφωνα με τον Zapert et al [26] η στοχαστική αβεβαιότητα έχει μεγαλύτερη αθροιστική επίδραση και άρα συμβάλλει περισσότερο στη συνολική αβεβαιότητα του μοντέλου σε σχέση με την παραμετρική αβεβαιότητα κυρίως σε προβλήματα με μακρύ χρονικό ορίζοντα. Ο Gjerde et al. [69] διαχωρίζει τις αβεβαιότητες που αφορούν τις βέλτιστες κλιματικές πολιτικές σε αβεβαιότητες σχετικά με το κόστος της μείωσης των εκπομπών και αβεβαιότητες σχετικά με την αποτελεσματικότητα των διαφόρων μέσων πολιτικής.

Οι Kann και Weyant [9] αναπτύσσουν ένα ενοποιητικό πλαίσιο για τη σύγκριση διαφορετικών τύπων αβεβαιότητας, κατηγοριοποιούν τις κατηγορίες ανάλυσης της αβεβαιότητας που μπορούν να πραγματοποιηθούν με χρήση μεγάλης κλίμακας μοντέλων και συγκρίνουν τις διαφορετικές προσεγγίσεις εξηγώντας τις παραδοχές, τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα της κάθε μεθόδου και την καταλληλότητά τους για διαφορετικούς τύπους μοντέλων. Σύμφωνα με Peterson [25], οι αναλύσεις αβεβαιότητας στα μοντέλα ενέργειας-οικονομίας κατηγοριοποιούνται ως εξής:

- ανάλυση ευαισθησίας (εξετάστηκε σε προηγούμενη ενότητα)
- μέθοδοι Monte Carlo που δίνουν μια αίσθηση του ρίσκου για τα μελλοντικά αποτελέσματα (πχ κατανομή πιθανότητας των ενδογενών μεταβλητών)
- μοντέλα διαδοχικής λήψης αποφάσεων υπό συνθήκες αβεβαιότητας (καθορισμός βέλτιστων πολιτικών)

Η δεύτερη κατηγορία ονομάζεται διάδοση της αβεβαιότητας (uncertainty propagation) και χρησιμοποιείται εκτενώς στην κατασκευή του στοχαστικού μοντέλου που παρουσιάζεται στην διατριβή. Σε αυτή την προσέγγιση, υπάρχει ένα πλήθος αβέβαιων παραμέτρων και μεταβλητών στο μοντέλο, αλλά οι αποφάσεις των παραγόντων δεν τους λαμβάνουν υπόψη. Η απλούστερη εφαρμογή της μεθόδου περιλαμβάνει τον καθορισμό από-κοινού κατανομών για επιλεγμένες παραμέτρους εισόδου και, στη συνέχεια, διάδοση της αβεβαιότητας στα αποτελέσματα του μοντέλου. Μια πιο σύνθετη εφαρμογή περιλαμβάνει την μοντελοποίηση ορισμένων μεταβλητών ως στοχαστικές ανεξίτητες. Γενικώς, η διάδοση της αβεβαιότητας δεν μπορεί να

χρησιμοποιηθεί για προσδιορισμό βέλτιστων αποφάσεων υπό συνθήκες αβεβαιότητας. Αυτό ισχύει μόνο εάν υπάρχει ισοδυναμία με την βεβαιότητα πράγμα που σημαίνει ότι η βέλτιστη απόφαση υπό αβεβαιότητα (π.χ. μεγιστοποίηση της αναμενόμενης χρησιμότητας) είναι ισοδύναμη με την αναμενόμενη αξία των αποφάσεων στο πλαίσιο κάθε υλοποίησης των αβέβαιων παραμέτρων με βεβαιότητα [71]. Αυτό εξαρτάται από τις μη-γραμμικότητες του μοντέλου και από τις κατανομές των παραμέτρων. Η παραπάνω μέθοδος παρέχει στον φορέα λήψης αποφάσεων μια ποσοτικοποιημένη αίσθηση των αβεβαιοτήτων σχετικά με την μελλοντική εξέλιξη των μεταβλητών, συνδέεται με πιθανοτικά σταθμισμένες τιμές των μεταβλητών εξόδου και μετράει τους κινδύνους και την διασπορά των αποτελεσμάτων για τις ενδογενείς μεταβλητές. Επιπλέον, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να παρέχει μέτρα για την σχετική σημασία των διαφόρων μεταβλητών εισόδου για το τελικό αποτέλεσμα. Για υπολογιστικούς σκοπούς, η διάδοση της αβεβαιότητας συνήθως περιλαμβάνει δειγματοληψία από κατανομές από κοινού, χρησιμοποιώντας τη μέθοδο Monte Carlo ή προσομοιώσεις βασισμένες στην δειγματοληψία με την μέθοδο Latin Hypercube [72].

Η πλέον απαιτητική προσέγγιση ονομάζεται διαδοχική λήψη αποφάσεων υπό συνθήκες αβεβαιότητας. Τα μοντέλα καθορίζουν τις βέλτιστες πολιτικές σε περισσότερα από ένα χρονικό σημείο, λαμβάνοντας υπόψη τις διαθέσιμες πληροφορίες σε κάθε περίοδο. Αυτή η κατηγορία περιλαμβάνει από μοντέλα απλής ανάλυσης αποφάσεων δύο περιόδων μέχρι στοχαστική βελτιστοποίηση άπειρου ορίζοντα. Αναπαρίστανται τρία κύρια είδη μάθησης: ενεργητική μάθηση, σύμφωνα με την οποία παρατηρείται το αποτέλεσμα των επιλογών πολιτικής σε ορισμένες βασικές μεταβλητές (π.χ. οι επιπτώσεις των εκπομπών στην οικονομία) με σκοπό την απόκτηση πληροφοριών σχετικά με αβέβαιες παραμέτρους, η μάθηση μέσω επενδύσεων σε Έρευνα και Ανάπτυξη (R&D) και η αυτόνομη εκμάθηση, όπου η αβεβαιότητα μειώνεται με την παρέλευση του χρόνου [71]. Τα περισσότερα μοντέλα αυτού του είδους χρησιμοποιούν μόνο την αυτόνομη εκμάθηση και μόνο 2 χρονικές περιόδους για να καθορίσουν τις βέλτιστες πολιτικές υπό αβεβαιότητα.

Με την παραπάνω μέθοδο, μελετώνται συνήθως τα μη αναστρέψιμα αποτελέσματα της κλιματικής αλλαγής, όπως οι περιβαλλοντικές καταστροφές και η καταστροφή του κεφαλαιουχικού αποθέματος. Αρχικά, οι αναλύσεις επικεντρώθηκαν σε μη αναστρέψιμες περιβαλλοντικές επιπτώσεις που συνδέονται με την αρχή της περιβαλλοντικής προστασίας και την αντιμετώπιση της κλιματικής αλλαγής. Από την άλλη πλευρά, μελέτες έδειξαν ότι η βέλτιστη πολιτική είναι η αποφυγή δαπανηρών μη αναστρέψιμων επενδύσεων και μέτρων μείωσης των εκπομπών άνθρακα μέχρι να είμαστε σίγουροι ότι είναι απαραίτητα. Διαφορετικοί συγγραφείς και μελέτες έχουν αναλύσει τα παραπάνω φαινόμενα από την μια ή την άλλη σκοπιά [73]. Συνολικά, αυτό το σκέλος της βιβλιογραφίας επικεντρώνεται στον τρόπο μείωσης των εκπομπών και τη βέλτιστη χρονική στιγμή υλοποίησης των πολιτικών, που οδηγεί σε συνέπεια μεταξύ των βραχυπρόθεσμων και μεσο- ή μακροπρόθεσμων ενεργειακών και κλιματικών στρατηγικών. Μια τέτοια στρατηγική που εξισορροπεί τον κίνδυνο της αναμονής με εκείνον της πρόωρης δράσης καλείται επίσης βέλτιστη στρατηγική αντιστάθμισης

(hedging). Ωστόσο, τα μοντέλα που χρησιμοποιούνται για τέτοιου είδους αναλύσεις είναι απλά μοντέλα βέλτιστης ανάπτυξης ή μοντέλα βέλτιστων επενδύσεων που διαφέρουν μεταξύ τους σε σχέση με την συμπερίληψη μη-αντιστρεψιμοτήτων και με την χρήση κατανομών για τις φυσικές καταστροφές. Τα μοντέλα αυτά περιλαμβάνουν μια απλή αναπαράσταση του ενεργειακού συστήματος και δεν μπορούν να περιγράψουν με ακρίβεια τις περίπλοκες σχέσεις και αλληλεξαρτήσεις του συστήματος «ενέργεια-οικονομία-περιβάλλον». Μια άλλη προσέγγιση είναι η εκτίμηση της οικονομικής τιμής της πρόωρης γνώσης σε περίπτωση επίλυσης των αβεβαιοτήτων σχετικά με την αλλαγή του κλίματος νωρίτερα παρά αργότερα. Σύμφωνα με τους Nordhaus και Popp [61] «Αν οι επιστήμονες καταφέρουν να βελτιώσουν την κατανόησή τους, ποιο θα είναι το κέρδος για την βελτίωση των οικονομικών επιδόσεων;». Γενικά, η αξία της πληροφορίας καθορίζεται με βάση την σύγκριση μεταξύ μιας στρατηγικής πρόωρης δράσης και μετά εκμάθησης και της στρατηγικής εκμάθησης και ύστερα κλιματικής δράσης, οι οποίες διαφέρουν στην χρονική περίοδο στην οποία η πληροφορία για τις αβέβαιες παραμέτρους γνωστοποιείται.

Ιδανικά, όλα τα μοντέλα ενέργειας-οικονομίας θα πρέπει να υποβάλλονται σε ανάλυση αβεβαιότητας. Ωστόσο, ανάλογα με τον τύπο του μοντέλου, οι αναλύσεις αβεβαιότητας μπορεί να είναι σύνθετες και με μεγάλη υπολογιστική ένταση. Μέχρι σήμερα, τα μεγαλύτερα εμπόδια για την εκτέλεση πλήρους ανάλυσης αβεβαιότητας είναι ο περιορισμός των υπολογιστικών πόρων, η πολυπλοκότητα των μοντέλων και η υποκειμενικότητα για τις κατανομές των στοχαστικών παραμέτρων, καθώς αυτές μπορεί να είναι αυθαίρετες και να διαφέρουν δραστικά ανάμεσα σε διαφορετικούς εμπειρογνώμονες, κατασκευαστές και χρήστες των μοντέλων [28]. Μερικές αναλύσεις παρέχουν «διαστήματα αβεβαιότητας» για τις σημαντικές παραμέτρους, τα οποία αναπαριστούν τα αντιπροσωπευτικά εύρη τιμών αλλά δεν έχουν καμία στατιστική ερμηνεία [29]. Επιπλέον, τα περισσότερα μεγάλης κλίμακας ενεργειακά-οικονομικά μοντέλα αντιμετωπίζουν ήδη ένα ζήτημα συμβιβασμού (trade-off) μεταξύ του επιπέδου λεπτομέρειας του μοντέλου και ενσωμάτωσης των αλληλεξαρτήσεων μεταξύ του ενεργειακού και οικονομικού συστήματος και του χρόνου που χρειάζεται για να τρέξει. Μια πλήρης ανάλυση της αβεβαιότητας απαιτεί εκατοντάδες ή χιλιάδες τρεξίματα του μοντέλου, κάτι που είναι εφικτό μόνο για τα απλούστερα μοντέλα και συνεπώς μια πιο διεξοδική ανάλυση αβεβαιότητας μπορεί να γίνει σε λιγότερο λεπτομερή μοντέλα, όπως έδειξαν οι Parson και Fisher-Vanden [30].

Τα περισσότερα μοντέλα μεγάλης κλίμακας στον τομέα της ενέργειας-οικονομίας μπορούν να ταξινομηθούν είτε ως μοντέλα ανάλυσης και προσομοίωσης πολιτικών (αξιολόγηση εναλλακτικών σεναρίων και εξωγενών υποθέσεων) είτε ως μοντέλα βελτιστοποίησης (πχ ελαχιστοποίηση κόστους, μεγιστοποίηση της ευημερίας). Εκτός από το μέγεθος και την πολυπλοκότητα ενός μοντέλου, ο τύπος του μοντέλου επηρεάζει επίσης την ανάλυση αβεβαιότητας, η οποία είναι πιο εύκολο να διενεργηθεί σε μοντέλα προσομοίωσης πολιτικής που συνήθως έχουν μικρότερη υπολογιστική πολυπλοκότητα σε σχέση με τα μοντέλα βελτιστοποίησης [9].

Η Διακυβερνητική Επιτροπή για την Κλιματική Αλλαγή (IPCC) αναγνώρισε ότι όταν οι αβεβαιότητες δεν είναι δυνατό να ποσοτικοποιηθούν εξολοκλήρου, τότε υπάρχει η ανάγκη να ληφθούν ημι-ποσοτικές, λεκτικές εκτιμήσεις για τις αβεβαιότητες [27, 32, 70]. Για παράδειγμα, η μέθοδος του IPCC είναι η χρησιμοποίηση όρων όπως «πολύ υψηλή πιθανότητα» (95% ή μεγαλύτερη), «μεγάλη» (67-95%), «μεσαία» (33-67%), «χαμηλή» (5-33%) και «ιδιαίτερα χαμηλή» (κάτω από 5%) [32]. Από την άλλη πλευρά, για πολλές αριθμητικές μοντελικές προσεγγίσεις, μια λεκτική αξιολόγηση της αβεβαιότητας δεν είναι επαρκής και είναι αναγκαίο να ανατεθούν κατανομές πιθανοτήτων για τις αβέβαιες παραμέτρους. Στις περισσότερες μελέτες αυτές οι κατανομές κατασκευάζονται από ένα μείγμα εικασιών, βιβλιογραφικής ανασκόπησης και εκτιμήσεων που συνήθως χαρακτηρίζονται *guestimates*. Σε πολλές περιπτώσεις, στις κατανομές πιθανοτήτων εκχωρούνται μόνο χαμηλές, μέσες και υψηλές τιμές (κατανομές τριών σημείων), ενώ συνήθως οι πιθανότητες και οι αντίστοιχες τιμές προέρχονται από τη βιβλιογραφία. Ορισμένοι συγγραφείς επιλέγουν συγκεκριμένες κατανομές πιθανοτήτων ή στοχαστικών διαδικασιών (π.χ. κανονικές κατανομές) για επεξηγηματικούς σκοπούς, ενώ άλλοι καθορίζουν τις παραμέτρους με *guestimates*. Στις περισσότερες χαρακτηριστικές μελέτες [34, 35, 72] γίνεται η υπόθεση ότι οι αβέβαιοι παράμετροι είναι ανεξάρτητες μεταξύ τους, ενώ λίγες μελέτες επικεντρώνονται στο βαθμό συσχέτισής τους [73, 74] που όπως αναλύθηκε αποτελεί σημαντικό παράγοντα για την αξιολόγηση των μελλοντικών κινδύνων.

2.4 Ανάλυση με την μέθοδο Μόντε Κάρλο σε μοντέλα ενέργειας-οικονομίας

Τα τελευταία χρόνια έχουν αναπτυχθεί αρκετές στοχαστικές εφαρμογές με τη χρήση της μεθοδολογίας Monte Carlo σε μεγάλης κλίμακας μοντέλα στους τομείς της ενεργειακής και οικονομικής ανάλυσης, τα οποία ανήκουν στον υβριδικό τύπο στοχαστικών μοντέλων (ενότητα 2.2.4). Οι επόμενες ενότητες θα παρουσιάσουν τα πιο σημαντικά στοχαστικά μοντέλα ανάλυσης αβεβαιότητας (από άποψη θεωρητικής τεκμηρίωσης και εφαρμογής) που έχουν αναπτυχθεί στο πεδίο της ανάλυσης του ενεργειακού συστήματος. Σε αυτό το σημείο θα πρέπει να τονιστεί ότι αναλύσεις αβεβαιότητας στο συγκεκριμένο επιστημονικό πεδίο έχουν πραγματοποιηθεί επίσης με βάση την ανάλυση κόστους-οφέλους για την εκτίμηση κινδύνων (οι οποίοι συνήθως συνδέονται με κλιματικά γεγονότα). Ωστόσο, τα μοντέλα που χρησιμοποιούνται συνήθως σε αυτές τις αναλύσεις δεν έχουν τις απαραίτητες λεπτομέρειες για την αναλυτική προσομοίωση του ενεργειακού συστήματος [33] και για αυτόν τον λόγο εξαιρούνται από το πλαίσιο της παρούσας διατριβής.

Τα περισσότερα από τα μοντέλα που θα αναλυθούν παρακάτω χρησιμοποιούν μια προσέγγιση βελτιστοποίησης και ελαχιστοποιούν το κόστος σε ένα διακριτό φάσμα αποτελεσμάτων που σταθμίζονται βάσει πιθανοτήτων για να αξιολογήσουν μια βέλτιστη στρατηγική αντιστάθμισης των κινδύνων. Τα μοντέλα αυτά επικεντρώνονται στην αβεβαιότητα για τις βασικές υποθέσεις του μοντέλου και παρέχουν γνώσεις

σχετικά με τις επιπτώσεις για τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου, την οικονομική δραστηριότητα και τις προβλέψεις της ζήτησης ενέργειας με σκοπό τη διερεύνηση της αποτελεσματικότητας των εναλλακτικών στρατηγικών μετριασμού της κλιματικής αλλαγής. Στις περισσότερες αναλύσεις, οι κατανομές πιθανοτήτων των παραμέτρων εισόδου επιλέγονται υποκειμενικά (guess estimates) ή βασίζονται σε κρίσεις εμπειρογνομόνων και ευρήματα της βιβλιογραφίας. Μόνο η μελέτη του Pizer [74] χρησιμοποίησε οικονομετρικές εκτιμήσεις για την κατασκευή των κατανομών για τις παραμέτρους εισόδου του μοντέλου.

2.4.1 Πρώτες προσπάθειες (1980s)

Οι πρώτες προσπάθειες για την ενσωμάτωση της αβεβαιότητας στα ενεργειακά μοντέλα έχουν πραγματοποιηθεί από τους Nordhaus και Yohe το 1983 [34], οι οποίοι προσπάθησαν να «αναγνωρίσουν και να μετρήσουν την εγγενή αβεβαιότητα για τις μελλοντικές εξελίξεις στην οικονομία, στην ενέργεια και στον κύκλο του άνθρακα» ενσωματώνοντας δέκα βασικές αβεβαιότητες στο μοντέλο τους, το οποίο καλύπτει το παγκόσμιο ενεργειακό σύστημα. Η ανάλυση επιβεβαίωσε ότι ανάμεσα στους πλέον σημαντικούς παράγοντες για την εξέλιξη των εκπομπών είναι η υποκατάσταση μεταξύ ορυκτών και μη ορυκτών καυσίμων που προκαλείται από διαφοροποιήσεις στις τιμές και στα κόστη ενέργειας, οι μεταβολές στην παραγωγικότητα της εργασίας και οι αλλαγές στην ισορροπία μεταξύ ενέργειας και εργασίας.

Οι Edmonds και Reilly (1985) [35, 36] χρησιμοποιούν προσομοιώσεις Monte Carlo για την ποσοτικοποίηση των μακροχρόνιων αβεβαιοτήτων για την παγκόσμια κατανάλωση ενέργειας και των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα. Χρησιμοποίησαν το (μη λεπτομερές για τα σημερινά δεδομένα) παγκόσμιο ενεργειακό μοντέλο IEA-ORAU και ανέλυσαν την αβεβαιότητα που προκύπτει από 79 στοχαστικές παραμέτρους του μοντέλου, ενώ υπέθεσαν στατιστική συσχέτιση μεταξύ των κατανομών των διαφόρων παραμέτρων. Το κύριο συμπέρασμα της μελέτης είναι ο ιδιαίτερα σημαντικός ρόλος της αβεβαιότητας για τα μακροπρόθεσμα αποτελέσματα του μοντέλου (μέσες τιμές και διακύμανση) ιδιαίτερα όσον αφορά τις μελλοντικές ατμοσφαιρικές συγκεντρώσεις του διοξειδίου του άνθρακα σε περίπτωση μη εφαρμογής κλιματικών πολιτικών. Η μελέτη απέδειξε ότι οι σημαντικότεροι παράγοντες για την εξέλιξη των παγκόσμιων εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα είναι ο ρυθμός αύξησης της παραγωγικότητας της εργασίας (επιβεβαιώνοντας την μελέτη των Nordhaus και Yohe [34]), η αύξηση της ενεργειακής αποδοτικότητας (μέσω της τεχνολογικής προόδου) και η ελαστικότητα της συνολικής ζήτησης ενέργειας ως προς το εισόδημα στις αναπτυσσόμενες χώρες.

2.4.2 Ανάλυση αβεβαιότητας με μοντέλα γενικής ισορροπίας

Τα τελευταία χρόνια, οι τεχνικές προσομοίωσης Monte Carlo έχουν υλοποιηθεί σε ένα εύρος μοντέλων υπολογιζόμενης γενικής ισορροπίας, όπως το EPPA [75,76] και το GEMINI-E3 [77]. Στην μελέτη [75], χρησιμοποιήθηκε το παγκόσμιο υπόδειγμα γενικής ισορροπίας EPPA για να εξερευνήσει τις πιο σημαντικές πηγές αβεβαιότητας για τις μελλοντικές εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου. Η ανάλυση χρησιμοποιεί

κατανομές πιθανοτήτων για οκτώ βασικές παραμέτρους του μοντέλου, οι οποίες κατασκευάστηκαν μέσω της γνώμης των εμπειρογνομόνων και από στοιχεία που ελήφθησαν από τη βιβλιογραφία, ενώ γίνονται απλοποιημένες υποθέσεις για τις συσχετίσεις μεταξύ τους. Η ανάλυση των αποτελεσμάτων έδειξε ότι τα σενάρια του IPCC [2] καλύπτουν το 95% του διαστήματος εμπιστοσύνης αλλά γενικά είναι biased προς τα χαμηλότερα επίπεδα εκπομπών μέχρι το 2100 σε σύγκριση με τα στοχαστικά αποτελέσματα του EPPA, εξαιτίας κυρίως του γεγονότος ότι οι κατανομές των αποτελεσμάτων του EPPA διαμορφώθηκαν χωρίς κλιματικές πολιτικές. Εκτιμήσεις των επιπτώσεων από πολιτικές απαιτούν την επανάληψη της ανάλυσης, με την υπόθεση υλοποίησης κλιματικών πολιτικών, και στη συνέχεια σύγκριση των κατανομών πιθανότητας που προκύπτουν για τις ενδογενείς μεταβλητές του μοντέλου και των επιπτώσεων τους στο οικονομικό και κλιματικό σύστημα.

Πιο πρόσφατα, οι μέθοδοι Monte Carlo έχουν υλοποιηθεί στο μοντέλο EPPA [76] με την χρήση τεχνικών στρωματοποιημένης δειγματοληψίας Latin hypercube για να αναλύσει τις επιπτώσεις 100 αβέβαιων παραμέτρων στα αποτελέσματα του μοντέλου. Οι αβέβαιοι παράμετροι περιλαμβάνουν το ρυθμό αύξησης της παραγωγικότητας της εργασίας, τις τάσεις της ενεργειακής απόδοσης, τις ελαστικότητες υποκατάστασης, τα κόστη των νέων ενεργειακών τεχνολογιών, τα κοιτάσματα των ορυκτών καυσίμων και τις τάσεις των συντελεστών εκπομπών των αστικών ρύπων. Οι προσομοιώσεις αυτές χρησιμεύουν για την αξιολόγηση τεσσάρων σεναρίων πολιτικής για το κλίμα και έδειξαν ότι οι παράμετροι της ενεργειακής ζήτησης (αυτόνομη βελτίωση ενεργειακής απόδοσης και ελαστικότητες υποκατάστασης) είναι οι πηγές αβεβαιότητας με την μεγαλύτερη επίδραση στα αποτελέσματα του μοντέλου. Για τις ανθρωπογενείς εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου, οι κρίσιμες παράμετροι περιλαμβάνουν την αύξηση της παραγωγικότητας της εργασίας, τις αυτόνομες μεταβολές στην ενεργειακή αποδοτικότητα και το κόστος της τεχνολογίας μηδενικού άνθρακα.

Το μοντέλο GEMINI-E3 είναι ένα μεγάλης κλίμακας top-down μοντέλο γενικής ισορροπίας ειδικά σχεδιασμένο για την αξιολόγηση κλιματικών πολιτικών που καλύπτει πολλαπλούς τομείς της παγκόσμιας οικονομίας. Το μοντέλο πραγματοποίησε ανάλυση αβεβαιότητας υλοποιώντας 2000 πειράματα Monte Carlo [77] στο σενάριο αναφοράς και σε ένα σενάριο αυστηρής κλιματικής πολιτικής. Τα αποτελέσματα δείχνουν την σημαντική επίδραση της αβεβαιότητας για την παράμετρο ευαισθησίας του κλίματος (climate sensitivity), η οποία καθορίζει την αλλαγή της θερμοκρασίας όταν μεταβάλλονται οι ατμοσφαιρικές συγκεντρώσεις αερίων του θερμοκηπίου, τόσο για το κόστος μείωσης των εκπομπών όσο και για την δυνατότητα επίτευξης των κλιματικών στόχων. Η εξέλιξη των παγκόσμιων εκπομπών άνθρακα επηρεάζονται σημαντικά από την αβεβαιότητα για την ενεργειακή ζήτηση, την τεχνική πρόοδο του ενεργειακού κλάδου, από την οικονομική ανάπτυξη στην περιοχή της Ασίας και από την διαθεσιμότητα τεχνολογιών χαμηλού άνθρακα (κυρίως CCS). Τέλος, η ανάλυση έδειξε τις σημαντικές διαφορές μεταξύ των στοχαστικών αποτελεσμάτων Monte Carlo και των αντίστοιχων ντετερμινιστικών, γεγονός που υποδηλώνει πόσο παραπλανητική

μπορεί να αποδειχθεί η ντετερμινιστική ανάλυση και καταδεικνύει την προστιθέμενη αξία της στοχαστικής ανάλυσης αβεβαιότητας για την ανάλυση πολιτικής.

2.4.3 Ανάλυση αβεβαιότητας με μοντέλα ολοκληρωμένης ανάλυσης

Αναλύσεις αβεβαιότητας με χρήση των τεχνικών Monte Carlo έχουν πραγματοποιηθεί την τελευταία δεκαετία με μοντέλα ολοκληρωμένης ανάλυσης. Το μοντέλο Page [31] έχει χρησιμοποιηθεί για να προσομοιώσει τις οικονομικές και περιβαλλοντικές επιπτώσεις των πολιτικών για την αντιμετώπιση της κλιματικής αλλαγής. Το μοντέλο εκτελεί προβλέψεις για τις μελλοντικές αυξήσεις στην παγκόσμια μέση θερμοκρασία και τα οικονομικά κόστη των κλιματικών καταστροφών, των πολιτικών μετριασμού των εκπομπών άνθρακα και των μέτρων προσαρμογής στην κλιματική αλλαγή χρησιμοποιώντας σχετικά απλές εξισώσεις για να περιγράψει ιδιαίτερα σύνθετα κλιματικά και οικονομικά φαινόμενα. Στην μελέτη [31], το μοντέλο Page κατασκευάζει κατανομές πιθανότητας για 31 παραμέτρους εισόδου (κλιματικές παράμετροι, οικονομικές και περιβαλλοντικές επιπτώσεις) και εξετάζει τις επιπτώσεις τους στην εξέλιξη των ενδογενών μεταβλητών του μοντέλου.

Η κύρια συμβολή της μελέτης του Pizer [74] είναι η χρησιμοποίηση για πρώτη φορά μακροχρόνιων χρονοσειρών ώστε να εκτιμήσει οικονομικά τις από κοινού κατανομές παραμέτρων, οι οποίες μετά χρησιμοποιούνται σε ένα σχετικά απλό μοντέλο κλιματικής-οικονομικής ανάλυσης ώστε να αξιολογήσει τη σημασία της ένταξης και ενσωμάτωσης της αβεβαιότητας στο υπόδειγμα. Οι από κοινού κατανομές έξι οικονομικών παραμέτρων εκτιμώνται με την χρήση ιστορικών δεδομένων των Η.Π.Α., ενώ οι κατανομές των κλιματικών παραμέτρων προέρχονται από [72]. Ο Pizer [74] έδειξε ότι η εξαίρεση της αβεβαιότητας τείνει να μειώσει τα προσδοκώμενα οφέλη εξαιτίας των μη-γραμμικών σχέσεων του μοντέλου και οδηγεί σε συστάσεις πολιτικής που είναι λιγότερο αυστηρές (σε σύγκριση με τις περιπτώσεις ενσωμάτωσης της αβεβαιότητας). Μεγάλο μέρος αυτού σχετίζεται με τις προτιμήσεις των παραγόντων του μοντέλου και από τα μελλοντικά προεξοφλητικά επιτόκια. Η αβεβαιότητα αυξάνει τα βέλτιστα επίπεδα μείωσης των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα και οδηγεί σε προτίμηση για υλοποίηση φόρων στο διοξείδιο του άνθρακα παρά σε ελέγχους στις εκπομπές. Αυτό υποδηλώνει ότι οι αναλύσεις που αγνοούν την αβεβαιότητα μπορούν να οδηγήσουν σε αναποτελεσματικές συστάσεις για κλιματικές πολιτικές.

Στην [78], το μοντέλο WITCH διερευνά τις οικονομικές και περιβαλλοντικές επιπτώσεις του μηχανισμού τιμών (φόρος στο διοξείδιο του άνθρακα) σε σχέση με τον περιορισμό στις ποσότητες για τον έλεγχο των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου όταν το κόστος μείωσης των εκπομπών είναι αβέβαιο. Η ανάλυση αβεβαιότητας με την μέθοδο Monte Carlo δίνει έμφαση σε δυο παραμέτρους, την παραγωγικότητα των επενδύσεων σε R&D στον τομέα της ενέργειας και στην ευαισθησία του κλίματος σε μεταβολές των συγκεντρώσεων αερίων του θερμοκηπίου. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι ο μηχανισμός των τιμών στοχαστικά κυριαρχεί ως προς τον μηχανισμό ποσοτήτων όταν υλοποιείται μια αυστηρή πολιτική για το κλίμα. Αν ο πραγματικός κόσμος ήταν ντετερμινιστικός, τότε τα δυο εργαλεία πολιτικής θα ήταν ισοδύναμα σύμφωνα με την

αρχή του Weitzmann. Η ανάλυση επιβεβαιώνει την μελέτη του Pizer [74] και αποδεικνύει ότι η αβεβαιότητα σχετικά με το κόστος μείωσης των εκπομπών στο πλαίσιο του μηχανισμού των τιμών (φόρος διοξειδίου του άνθρακα) οδηγεί σε ΑΕΠ και συνολική κατανάλωση με ελαφρώς υψηλότερο μέσο και σημαντικά μικρότερη διακύμανση σε σύγκριση με τον μηχανισμό ποσοτήτων (Cap and Trade).

Οι Nordhaus και Popp [61] χρησιμοποίησαν την πιθανοτική εκδοχή ενός απλοποιημένου μοντέλου κλιματικής αλλαγής (μοντέλο PRICE) για να εξερευνήσουν την αβεβαιότητα σχετικά με τις εκπομπές άνθρακα, την κλιματική ευαισθησία και τις περιβαλλοντικές καταστροφές. Ένα μεγάλο θέμα στην δουλειά του Nordhaus είναι η μέτρηση της αξίας της πληροφορίας για την επίλυση της αβεβαιότητας σχετικά με το κλίμα και τις εκπομπές άνθρακα. Στην μελέτη [61] εξετάστηκαν οκτώ αβέβαιες παράμετροι που επηρεάζουν σημαντικά τα αποτελέσματα του μοντέλου (αύξηση πληθυσμού και παραγωγικότητας, κοινωνικό επιτόκιο προτίμησης χρόνου, κλιματική ευαισθησία, ποσοστό παρακράτησης των εκπομπών άνθρακα στην ατμόσφαιρα, ποσοστό μείωσης της έντασης άνθρακα του ΑΕΠ, συνάρτηση κόστους της μείωσης εκπομπών και συνάρτηση κλιματικής καταστροφής). Στη συνέχεια χρησιμοποίησαν την τεχνική στρωματοποιημένης δειγματοληψίας Latin Hypercube για να εκτελέσουν ανάλυση Monte Carlo για όλες τις τυχαίες μεταβλητές με 625 πειράματα. Επειδή το μοντέλο PRICE είναι δύσκολο να επιλυθεί για μεγάλο αριθμό πιθανών καταστάσεων του κόσμου, τα πειράματα Monte Carlo κατηγοριοποιήθηκαν ώστε να δημιουργήσουν 5 αντιπροσωπευτικές καταστάσεις του κόσμου με πιθανότητες 2, 8, 15, 25 και 50% ταξινομημένες σύμφωνα με την αυστηρότητα των κλιματικών πολιτικών. Το μοντέλο χρησιμοποιήθηκε για να καθορίσει την αναμενόμενη παρούσα αξία του κόστους και του οφέλους επιλεγμένων πολιτικών σε καθεμία από τις 5 καταστάσεις του κόσμου, ενώ η αξία της πληροφορίας μετρίεται εξετάζοντας το κόστος της βέλτιστης διαχρονικά πολιτικής όταν η κατάσταση του κόσμου είναι γνωστή. Η ανάλυση έδειξε ότι η βέλτιστη πολιτική υπό αβεβαιότητα τείνει να αυξήσει τους περιορισμούς στις εκπομπές άνθρακα εξαιτίας της ασυμμετρίας στην συνάρτηση κλιματικών καταστροφών, ενώ η επίλυση των αβεβαιοτήτων σχετικά με τις μελλοντικές καταστάσεις του κόσμου έχει μεγάλη οικονομική αξία.

Στην μελέτη [79] χρησιμοποιήθηκε το κλιματικό-οικονομικό μοντέλο miniCAM 1.0, το οποίο ουσιαστικά αποτελεί μια απλοποιημένη εκδοχή του GCAM, για να υλοποιήσει τεχνικές προσομοίωσης Monte Carlo με σκοπό την ανάλυση αβεβαιότητας σχετικά με τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα, τις ατμοσφαιρικές συγκεντρώσεις, την μέση παγκόσμια θερμοκρασία, τις αβεβαιότητες σχετικά με τις περιβαλλοντικές καταστροφές και τις αβεβαιότητες σχετικά με το κόστος μετριασμού της κλιματικής αλλαγής. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η συνολική αβεβαιότητα για τις κλιματικές μεταβλητές είναι μεγαλύτερη από τα αποτελέσματα του IPCC, ενώ οι σημαντικότερες πηγές αβεβαιότητας περιλαμβάνουν την εξέλιξη της ζήτησης ενέργειας και καυσίμων στον αναπτυσσόμενο κόσμο, την αύξηση της παραγωγικότητας της εργασίας, την τεχνολογική πρόοδο στην παραγωγή ενέργειας, την κλιματική ευαισθησία, το επίπεδο και τις μη-γραμμικότητες των κλιματικών καταστροφών. Τα αποτελέσματα διαφέρουν

από αυτά των Nordhaus και Popp [61] καθώς η έμφαση εδώ δεν έγκειται στην βέλτιστη πολιτική (όταν η αβεβαιότητα επιλυθεί) αλλά στον σχεδιασμό πολιτικών αποστροφής του κινδύνου που αποτρέπουν κλιματικά αποτελέσματα χαμηλής πιθανότητας αλλά σημαντικών καταστροφών. Αυτή η στρατηγική οδηγεί σε περιορισμό των εκπομπών και συγκεντρώσεων αερίων του θερμοκηπίου σε κάθε περίπτωση και συνεπώς σε ιδιαίτερα υψηλά κόστη μετριασμού των εκπομπών.

Ο Kyrgeos [80] εφαρμόζει το μοντέλο ανάλυσης του ενεργειακού-κλιματικού και οικονομικού συστήματος MERGE σε ένα πιθανοτικό πλαίσιο ανάλυσης των κινδύνων με σκοπό την αξιολόγηση των κινδύνων τόσο της δράσης για την κλιματική αλλαγή όσο και της αδράνειας. Τεχνικές προσομοίωσης Monte Carlo υλοποιήθηκαν για τις αβέβαιες παραμέτρους που περιγράφουν τους κυριότερους οικονομικούς και κοινωνικούς παράγοντες για την εξέλιξη των ατμοσφαιρικών συγκεντρώσεων άνθρακα (δηλαδή το ΑΕΠ και τον πληθυσμό). Επιπλέον, η μελέτη λαμβάνει υπόψη τις αβεβαιότητες σχετικά με κλιματικές παραμέτρους, όπως η ευαισθησία της μέσης θερμοκρασίας σε μεταβολές των ατμοσφαιρικών συγκεντρώσεων άνθρακα. Η μέθοδος που εφαρμόζεται δίνει μια πιθανολογική εκτίμηση των οικονομικού κόστους και των επιπέδων του φόρου στο διοξείδιο του άνθρακα και της αντίστοιχης μείωσης των εκπομπών καθώς και της απαραίτητης τεχνολογικής αλλαγής για την αναδιάρθρωση του παγκόσμιου ενεργειακού συστήματος. Η μελέτη δείχνει ότι μια σειρά ενεργειακών τεχνολογιών χαμηλού και μηδενικού άνθρακα χρειάζεται να αναπτυχθούν και να διαχυθούν σε όλες τις περιοχές του κόσμου προκειμένου να μειωθεί ο κίνδυνος για σοβαρές και αρνητικές κλιματικές καταστροφές. Μια μεγάλη ανάπτυξη των τεχνολογιών βιομάζας για την παραγωγή βιοκαυσίμων ή/και υδρογόνου, σε συνδυασμό με τις τεχνολογίες δέσμευσης και αποθήκευσης του διοξειδίου του άνθρακα (CCS) είναι αναγκαίες για την ικανοποίηση του στόχου περιορισμού της αύξησης της μέσης θερμοκρασίας της ατμόσφαιρας στα επίπεδα των 2°C πάνω από τα προβιομηχανικά επίπεδα το 2100. Ωστόσο, επειδή αυτό το όριο αποτελεί έναν αυστηρό κλιματικό στόχο (το 99% των πειραμάτων Monte Carlo στο σενάριο αναφοράς δεν πέτυχαν τον στόχο), η παγκόσμια προθυμία των χωρών να πληρώσουν το κόστος μετριασμού της κλιματικής αλλαγής πρέπει να βελτιωθεί σημαντικά σε σχέση με τα σημερινά επίπεδα.

Στην μελέτη [33], ο Toi τοποθετεί το αναλυτικό πλαίσιο αποφάσεων στο καθεστώς της αβεβαιότητας. Η ανάλυση κόστους-οφέλους είναι εφαρμόσιμη μόνο στην περίπτωση όπου και τα κόστη και τα οφέλη από την μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου είναι πεπερασμένα. Η μελέτη χρησιμοποιεί το μοντέλο ολοκληρωμένης ανάλυσης FUND και δείχνει ότι όλες οι μεταβλητές του μοντέλου έχουν πεπερασμένες διακυμάνσεις, ενώ υπάρχει μια ιδιαίτερα μικρή πιθανότητα ότι η κλιματική αλλαγή θα αντιστρέψει την οικονομική ανάπτυξη σε κάποιες περιοχές, οδηγώντας σε αρνητικά προεξοφλητικά επιτόκια και σε ιδιαίτερα υψηλό οριακό όφελος από πολιτικές μετριασμού. Στην ανάλυση Monte Carlo όλες οι παράμετροι του μοντέλου FUND είναι αβέβαιες και έχουν καθοριστεί από συναρτήσεις πυκνότητας-πιθανότητας, ενώ αποδεικνύεται ότι για ένα εύρος δειγμάτων (από 100 μέχρι 1000 πειράματα Monte

Carlo) οι διακυμάνσεις των ενδογενών μεταβλητών (ΑΕΠ ανά κάτοικο, παγκόσμια μέση θερμοκρασία, οικονομικές επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής) είναι πεπερασμένες.

2.4.4 Ανάλυση αβεβαιότητας με μοντέλα ενεργειακής ανάλυσης

Οι αναλύσεις αβεβαιότητας με χρήση ολοκληρωμένων στοχαστικών μοντέλων ενεργειακής ανάλυσης είναι ιδιαίτερα περιορισμένες στην διεθνή βιβλιογραφία. Στην μελέτη [77], η εκδοχή του bottom-up μοντέλου TIMES με στοχαστικό προγραμματισμό χρησιμοποιείται για να παρέχει μια κλιματική πολιτική αντιστάθμισης των κινδύνων για την αντιμετώπιση της αβεβαιότητας που χαρακτηρίζει την ευαισθησία του κλίματος. Στο συγκεκριμένο μεθοδολογικό πλαίσιο, το μοντέλο υιοθετεί μια μοναδική πολιτική αντιστάθμισης κινδύνου στο χρονικό διάστημα που προηγείται της επίλυσης της αβεβαιότητας έτσι ώστε να είναι σε καλύτερη θέση για να προσαρμοστεί σε οποιαδήποτε από τα τέσσερα δυνατά μακροπρόθεσμα μελλοντικά ενδεχόμενα (μετά την επίλυση της αβεβαιότητας). Ένα σημαντικό μειονέκτημα της ανάλυσης είναι ότι σε ένα μεγάλης κλίμακας μοντέλο όπως το TIMES, εξαιτίας υπολογιστικών δυσκολιών, η προσέγγιση στοχαστικού προγραμματισμού είναι επιτυχής όταν οι αβέβαιες παράμετροι έχουν μόνο ένα περιορισμένο αριθμό πιθανών αποτελεσμάτων. Η αβεβαιότητα επομένως περιγράφεται μέσω ενός δέντρου γεγονότων με μικρό αριθμό παραμέτρων που λαμβάνει υπόψη μόλις μια αβεβαιότητα (ευαισθησία του κλίματος). Η βέλτιστη πολιτική αντιστάθμισης σχεδιάζεται για την περίοδο μέχρι το 2030 και ακολουθείται από τέσσερις χαρακτηριστικές πολιτικές μείωσης των εκπομπών συμβατές με τον παγκόσμιο στόχο κλιματικής σταθεροποίησης μέχρι το 2100 με βάση εύλογες παραδοχές σχετικά με την αβεβαιότητα για την ευαισθησία του κλίματος. Τα εναλλακτικά σενάρια λαμβάνουν υπόψη την αβεβαιότητα για την κλιματική ευαισθησία αλλά βασίζονται σε υποθέσεις τέλει διαορατικότητας (perfect foresight) για αρκετές τεχνολογικές και οικονομικές παραμέτρους, οι οποίες επίσης έχουν επίδραση στην αξιολόγηση των κλιματικών πολιτικών. Η ανάλυση έδειξε ότι παρότι η μέση τιμή της ευαισθησίας του κλίματος στο στοχαστικό σενάριο ισούται με την ντετερμινιστική τιμή της, το μοντέλο επιλέγει να αντισταθμίσει τους κινδύνους από όλες τις πιθανές (μεγαλύτερες) τιμές και συνεπώς επιλέγει να μειώσει τις εκπομπές πολύ νωρίτερα (πριν το 2030 όπου επιλύεται η αβεβαιότητα) έτσι ώστε να είναι σε καλύτερη θέση για κάθε μελλοντικό ενδεχόμενο.

Το επιλεγμένο κριτήριο βελτιστοποίησης στην [77] είναι η αναμενόμενη-μέση αξία του συνολικού πλεονάσματος, αλλά η προσέγγιση ισχύει επίσης για άλλα κριτήρια, όπως η ελαχιστοποίηση του κριτηρίου MinMax (κριτήριο του Savage), όπως στην μελέτη [80]. Το στοχαστικό μοντέλο MARKAL χρησιμοποιείται για την ποσοτικοποίηση στόχων μείωσης των εκπομπών στην περιοχή του Κεμπέκ με 5 εναλλακτικές διαδρομές μειώσεων από 0% έως 40% σε σύγκριση με τα επίπεδα του 1990. Η στρατηγική MinMax πετυχαίνει την ελαχιστοποίηση του χειρότερου δυνατού αποτελέσματος σε κάθε πραγματοποίηση του αβέβαιου στόχου, ενώ προτείνει την δραστική μείωση των εκπομπών σχετικά νωρίς, ακόμα και όταν δεν υπάρχει γνώση του πραγματικού στόχου και συνεπώς δεν μπορεί να χαρακτηριστεί μια προσέγγιση υπομονής (wait-and-see). Η

μελέτη [77] επίσης έδειξε ότι η αβεβαιότητα επιδρά στην ανταγωνιστικότητα των επιλογών του ενεργειακού τομέα με τρόπους που δεν είναι προβλέψιμοι χωρίς την ρητή και ενδελεχή αντιμετώπιση της αβεβαιότητας και συνεπώς η παραδοσιακή ανάλυση με υλοποίηση σεναρίων είναι μη αποτελεσματική. Τέλος, οι συγγραφείς αναγνωρίζουν ότι η εφαρμογή της μεθόδου σε μεγαλύτερα ενεργειακά-οικονομικά συστήματα με αναπαράσταση των αλληλεξαρτήσεων μεταξύ των περιοχών είναι ιδιαίτερα σημαντική.

Οι Hunt και Ninomiya [82] μελετούν την σημασία της μοντελοποίησης της στοχαστικής τάσης και της εποχιακής στοχαστικότητας για την εκτίμηση της ζήτησης πετρελαίου στον τομέα των μεταφορών (ελαστικότητες εισοδήματος και τιμής). Η ανάλυση απέδειξε ότι η εποχιακή στοχαστικότητα πρέπει να προτιμάται σε σύγκριση με τα ντετερμινιστικά πρότυπα και η στοχαστική τάση μπορεί να έχει ιδιαίτερα μεγάλες αποκλίσεις με περιόδους θετικής ή αρνητικής κλίσης. Η σημασία της ενσωμάτωσης οικονομικά εκτιμημένων αβέβαιων ελαστικοτήτων είναι θεμελιώδης για την ορθή αναπαράσταση της αβεβαιότητας σχετικά με την μελλοντική εξέλιξη της ζήτησης ενέργειας και αυτό λαμβάνεται υπόψη τον προτεινόμενο στοχαστικό υπόδειγμα.

Το στοχαστικό υπόδειγμα SEDS [83] (Stochastic Energy Deployment System- Στοχαστικό Σύστημα Ενεργειακής Ανάπτυξης) είναι ένα μοντέλο μακροπρόθεσμης ανάλυσης των ενεργειακών αγορών των ΗΠΑ και έχει σχεδιαστεί για να διερευνήσει την εξέλιξη του ενεργειακού-οικονομικού συστήματος ανάλογα με την ανάπτυξη των νέων ενεργειακών τεχνολογιών (ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, ηλεκτρικά αυτοκίνητα και βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης). Η βελτίωση του κόστους και της απόδοσης των νέων τεχνολογιών (με βάση τις επενδύσεις σε R&D) είναι οι βασικές κινητήριες δυνάμεις για την ανάπτυξη τους, ενώ το μοντέλο δίνει τη δυνατότητα στους αναλυτές να εξετάσουν τις επιπτώσεις εναλλακτικών ενεργειακών, τεχνολογικών και κλιματικών πολιτικών. Το SEDS επιτρέπει τον προσδιορισμό των υποθέσεων εισόδου σαν κατανομές πιθανοτήτων, π.χ. για το κεφαλαιουχικό κόστος τεχνολογιών, το μέγεθος των πολιτικών, την οικονομική ανάπτυξη, παράγοντες που επηρεάζουν τις τιμές της ενέργειας κ.α.. Ένα σημαντικό πλεονέκτημα του μοντέλου είναι η δυνατότητα μοντελοποίησης της συσχέτισης μεταξύ των παραδοχών για τις εξωγενείς παραμέτρους. Το SEDS χρησιμοποιεί μεθόδους δειγματοληψίας Monte Carlo για να αντλήσει τυχαίες τιμές από τις κατανομές πιθανοτήτων για κάθε παραμέτρου εισόδου και στη συνέχεια χρησιμοποιεί αυτές τις τυχαίες τιμές για την προσομοίωση της εξέλιξης του τομέα της ενέργειας μέχρι το 2050. Το τελικό αποτέλεσμα είναι μια συλλογή από διαφορετικές εξελίξεις του ενεργειακού συστήματος των Η.Π.Α. από τις οποίες οι πιθανότητες για συγκεκριμένα αποτελέσματα μπορούν να εκτιμηθούν στατιστικά. Ένα ιδιαίτερα χρήσιμο χαρακτηριστικό του μοντέλου είναι ότι η αβεβαιότητα μπορεί να εφαρμοστεί σε ορισμένες μόνο από τις εξωγενείς παραμέτρους του μοντέλου έτσι ώστε ο χρήστης να εξερευνήσει ποια από τα δεδομένα εισόδου έχουν μεγαλύτερη σημασία για τα συνολικά αποτελέσματα του μοντέλου. Η δομή του SEDS επιτρέπει επίσης την απευθείας χρησιμοποίηση κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης των κατανομών πιθανότητας που προέρχονται από την κρίση εμπειρογνομώνων. Ωστόσο, όλες οι κατανομές για τις παραμέτρους εισόδου επιλέγονται υποκειμενικά ή

βασίζονται αποκλειστικά στην κρίση των εμπειρογνομόνων, και όχι σε επιστημονική τεκμηρίωση (π.χ. οικονομετρικές εκτιμήσεις).

Σύμφωνα με την ανάλυση στο [83], οι κύριες αβεβαιότητες που επηρεάζουν την ανάπτυξη των ενεργειακών τεχνολογιών είναι: τεχνολογική αβεβαιότητα (κόστος και απόδοση των εναλλακτικών τεχνολογιών), αβεβαιότητα στην αγορά (τιμές ορυκτών καυσίμων, ισορροπία προσφοράς και ζήτησης ενέργειας και καυσίμων), αβεβαιότητα για την αποδοτικότητα του R&D, αβεβαιότητα για την μελλοντικές μακρο-οικονομικές εξελίξεις και αβεβαιότητα σχετικά με τις ενεργειακές και κλιματικές πολιτικές (π.χ. επιδοτήσεις, φόροι, επενδύσεις σε R&D, μέτρα προώθησης των ΑΠΕ, φόρος διοξειδίου του άνθρακα κ.α.). Τα αποτελέσματα του μοντέλου που περιλαμβάνουν πολλαπλές αβεβαιότητες αποκλίνουν σημαντικά από τις αντίστοιχες ντετερμινιστικές προβλέψεις. Όταν ενσωματώνονται όλες οι αβεβαιότητες, τότε η εγκατεστημένη ισχύς της τεχνολογίας που μελετάται (π.χ. ενισχυμένα γεωθερμικά συστήματα-EGS) προβλέπεται να έχει εύρος από 0 έως 14 GW το 2030 με την μέση τιμή και τον διάμεσο να βρίσκονται κοντά στα 5 GW, όταν στο ντετερμινιστικό σενάριο η προβλεπόμενη ισχύς είναι μόλις 1 GW. Η ανάλυση έδειξε ότι οι πιο σημαντικές αβεβαιότητες είναι η τεχνολογική, η πολιτική και η αβεβαιότητα για το R&D, ενώ η μακρο-οικονομική και η αβεβαιότητα της ενεργειακής αγοράς έχουν μικρότερη επίδραση στο συνολικό αποτέλεσμα.

Το μοντέλο SEDS είναι δομημένο με βάση αλληλοεπιδράσεις των διαφόρων υπομοντέλων του, από τα οποία τα πιο σημαντικά είναι το μακρο-οικονομικό, το μοντέλο υπολογισμού της ζήτησης ενέργειας ανά κλάδο, η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, τα μοντέλα παραγωγής καυσίμων (πετρέλαιο, φυσικό αέριο, άνθρακας, βιομάζα) και τα μοντέλα που καθορίζουν την προμήθεια πετρελαϊκών προϊόντων, φυσικού αερίου και υδρογόνου. Οι επενδυτικές αποφάσεις σε συγκεκριμένες τεχνολογίες καθορίζονται από την αύξηση της συνολικής ζήτησης του αντίστοιχου κλάδου, το απόθεμα των παλαιών τεχνολογιών και από το συνολικό κόστος των τεχνολογιών που ανταγωνίζονται με βάση μια συνάρτηση Logit, η οποία λαμβάνει υπόψη και τον βαθμό «εξοικείωσης» των παραγόντων με συγκεκριμένες τεχνολογίες.

2.5 Κριτική στοχαστικών ενεργειακών μοντέλων και πρωτοτυπία της διατριβής

Η εγγενής αβεβαιότητα σχετικά με την εξέλιξη του παγκόσμιου ενεργειακού συστήματος είναι το κυριότερο πρόβλημα για την ποσοτικοποίηση των επιπτώσεων εναλλακτικών πολιτικών. Αυτή η αβεβαιότητα είναι διάχυτη στο ενεργειακό σύστημα, δεν περιορίζεται στις πιο διαδεδομένες περιπτώσεις, όπως η κλιματική αλλαγή [23], και δεν ανάγεται απλώς στην αβεβαιότητα σχετικά με μια σειρά βασικών παραμέτρων. Αντίθετα, υπάρχει συνήθως μια βαθύτερη αβεβαιότητα σχετικά με το ποιο είναι το κατάλληλο μοντέλο για την αναπαράσταση του προβλήματος. Αυτό είναι ζωτικής σημασίας, διότι η αβεβαιότητα για το μοντέλο μειώνει σε μεγάλο βαθμό την εμπιστοσύνη στη χρήση υποδειγμάτων και εργαλείων κινδύνου, όπως η επίλυση του προβλήματος της σχέσης προσδοκώμενου οφέλους-κόστους. Το παραπάνω θεωρείται

επιστημονικά μια κατάσταση βαθιάς αβεβαιότητας «deep uncertainty» [22], ενώ οι οικονομολόγοι τείνουν να διακρίνουν μεταξύ της έννοιας της αβεβαιότητας ή της ασάφειας [68] -ambiguity- και του κινδύνου -risk.

Τα περισσότερα από τα μοντέλα που αναλύθηκαν παραπάνω χρησιμοποιούν μια προσέγγιση βελτιστοποίησης και ελαχιστοποιούν το κόστος (ή βελτιστοποιούν το κέρδος ή την ευημερία) σε ένα διακριτό φάσμα αποτελεσμάτων που σταθμίζονται βάσει πιθανοτήτων για να αξιολογήσουν μια βέλτιστη στρατηγική αντιστάθμισης των κινδύνων. Τα μοντέλα αυτά επικεντρώνονται στην αβεβαιότητα για τις βασικές υποθέσεις του μοντέλου και παρέχουν γνώσεις σχετικά με τις επιπτώσεις για τις εκπομπές άνθρακα, την οικονομική δραστηριότητα και τις προβλέψεις της ζήτησης ενέργειας με σκοπό τη διερεύνηση της αποτελεσματικότητας των εναλλακτικών στρατηγικών μετριασμού της κλιματικής αλλαγής. Στις περισσότερες αναλύσεις, οι κατανομές πιθανοτήτων των παραμέτρων εισόδου επιλέγονται υποκειμενικά (guess estimates) ή βασίζονται σε κρίσεις εμπειρογνομόνων και ευρήματα της βιβλιογραφίας. Μόνο ο Pizer (1999) [74] χρησιμοποιεί ιστορικά δεδομένα και χρονοσειρές για να εκτιμήσει οικονομικά την από κοινού κατανομή έξι παραμέτρων, οι οποίες χρησιμοποιούνται ύστερα σε ένα σχετικά απλοποιημένο μοντέλο ενέργειας-οικονομίας με σκοπό την αξιολόγηση της σημασίας της ενσωμάτωσης της αβεβαιότητας. Συνολικά, η κατασκευή κατανομών για περιορισμένο αριθμό παραμέτρων τείνει να οδηγήσει σε μικρότερο συνολικό εύρος αβεβαιότητάς και στη μη ακριβή αναπαράσταση των προτύπων αβεβαιότητας του υπό εξέταση συστήματος.

Ένα κοινό χαρακτηριστικό όλων των παραπάνω μοντέλων και μελετών είναι ότι επικεντρώνονται στην αβεβαιότητα που συνδέεται με ένα υποσύνολο των παραμέτρων και εξωγενών μεταβλητών εισόδου (με εξαίρεση την ανάλυση του Tol [33]), οι οποίες επιλέχθηκαν με υποκειμενικό τρόπο είτε για τη συνολική σημασία τους ή προκειμένου να εξεταστεί ο ρόλος τους στον καθορισμό της αβεβαιότητας μιας ιδιαίτερα σημαντικής ενδογενούς μεταβλητής-στόχου. Επιπλέον, πολύ μικρή σημασία έχει δοθεί στην συνδιακύμανση των κατανομών εισόδου καθώς σχεδόν όλα τα μοντέλα υποθέτουν ότι οι κατανομές πιθανοτήτων των παραμέτρων είναι ανεξάρτητες μεταξύ τους. Σε μερικές από τις μελέτες (π.χ. μοντέλο WITCH [78], MERGE [80] και miniCAM [79]), ντετερμινιστικοί περιορισμοί επιβάλλονται και συνεπώς τα αποτελέσματα των μοντέλων εξαρτώνται/ δεσμεύονται από την επίτευξη αυτών των στόχων και περιορισμών και δεν εξετάζουν την πιθανότητα μη επίτευξης των στόχων. Επιπλέον, ένας αριθμός αναλύσεων (MARKAL [77], MERGE [80], WITCH [78]) χρησιμοποιούν μοντέλα τέλει προβλεπτικότητας (perfect foresight), των οποίων ο μαθηματικός προσδιορισμός τείνει να αλλάξει την σημασία της έννοιας της αβεβαιότητας στα αποτελέσματα των μοντέλων. Συνολικά, παρόλο που τα παραπάνω μοντέλα και αναλύσεις παρέχουν σημαντικές γνώσεις σχετικά με τη σημασία συγκεκριμένων τύπων αβεβαιότητας, δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν απευθείας στην ανάλυση πολιτικών που αποσκοπούν στη συνολική μείωση της αβεβαιότητας καθώς η ανάλυση αβεβαιότητας που παρέχουν είναι μερική και υπό όρους (conditional).

Η πρωτοτυπία του προτεινόμενου μοντέλου στα πλαίσια της διατριβής έγκειται στην αποτελεσματική αντιμετώπιση του συνόλου των αδυναμιών και προβλημάτων των αναλύσεων αβεβαιότητας με μοντέλα ενεργειακής οικονομίας, που αναλύθηκαν στις προηγούμενες ενότητες. Συγκεκριμένα:

1. Το προτεινόμενο μοντέλο καλύπτει το σύνολο των αλληλεξαρτήσεων στα πλαίσια της ενεργειακής ανάλυσης και αποτελεί ένα μεγάλης-κλίμακας μοντέλο αναλυτικής προσομοίωσης του παγκόσμιου ενεργειακού συστήματος
2. Η λεπτομερής τεχνολογική και συστημική αναπαράσταση με χρήση bottom-up δεδομένων και η ενδογενποίηση του μηχανισμού διαμόρφωσης των διεθνών τιμών για τα ορυκτά καύσιμα αποτελούν σημαντικές προεκτάσεις των υπαρχόντων μοντέλων ενεργειακής ανάλυσης που πραγματοποιούν ανάλυση αβεβαιότητας σε παγκόσμιο επίπεδο
3. Σε αντίθεση με αρκετά μοντέλα ενέργειας-οικονομίας, ο ΠΡΟΜΗΘΕΑΣ έχει την δυνατότητα να εξετάσει την πιθανότητα μη επίτευξης συγκεκριμένων στόχων (π.χ. περιορισμός ατμοσφαιρικών συγκεντρώσεων άνθρακα σε δεδομένο επίπεδο). Αυτό το χαρακτηριστικό αποκτά ιδιαίτερη σημασία στο πλαίσιο της ανάλυσης του μακροχρόνιου σχεδιασμού (π.χ. περίοδο μέχρι το 2050).
4. Το προτεινόμενο υπόδειγμα εξετάζει το σύνολο των αβεβαιοτήτων που επηρεάζουν την μελλοντική εξέλιξη του παγκόσμιου ενεργειακού συστήματος και δεν αναλύει την αβεβαιότητα σε ένα υποσύνολο παραμέτρων, το οποίο στα υπάρχοντα μοντέλα επιλέγεται υποκειμενικά και συνήθως αυθαίρετα. Με βάση αυτό το μεθοδολογικό πλαίσιο, το προτεινόμενο μοντέλο έχει την δυνατότητα να ποσοτικοποιήσει με μεγαλύτερη ακρίβεια το μέγεθος, τις πηγές καθώς και την δομή της αβεβαιότητας για τις ενδογενείς μεταβλητές του.
5. Οι αναλύσεις αβεβαιότητας με μοντέλα ενέργειας-οικονομίας χρησιμοποιούν κατανομές πιθανοτήτων για τις παραμέτρους εισόδου οι οποίες επιλέγονται υποκειμενικά/αυθαίρετα (guess estimates) ή βασίζονται στην βιβλιογραφία ή σε κρίσεις εμπειρογνομόνων. Σε αντίθεση με τα παραπάνω, το προτεινόμενο υπόδειγμα χρησιμοποιεί εκτενώς οικονομετρικές μεθόδους για την κατασκευή των κατανομών των παραμέτρων εισόδου. Τα κυριότερα πλεονεκτήματα της μεθόδου είναι ότι παρέχει ένα στοιχείο αντικειμενικότητας και επιδέχεται την ανάλυση της συνδιακύμανσης μεταξύ των εκτιμώμενων παραμέτρων, που είναι ιδιαίτερη σημαντική για την εξέταση της δομής της αβεβαιότητας. Η όσο το δυνατόν αμερόληπτη κατασκευή των δεδομένων εισόδου οδηγεί σε πιο αξιόπιστα και αμερόληπτα στοχαστικά αποτελέσματα.

Κατά την υλοποίηση του προτεινόμενου μοντέλου[84] στην παρούσα διατριβή, χρησιμοποιήθηκε εκτενώς η μεθοδολογία διάδοσης της αβεβαιότητας με την τεχνική Monte Carlo, της οποίας τα κύρια πλεονεκτήματα είναι:

- Η απλότητά της, καθώς δεν απαιτεί συγκεκριμένες τροποποιήσεις του μοντέλου καθώς όταν ο χρήστης κάνει την απαραίτητη δειγματοληψία, ύστερα οι προσομοιώσεις Monte Carlo με το μοντέλο είναι ευθείς

- Το μέγεθος του μοντέλου και η πολυπλοκότητα των υπολογισμών δεν αυξάνονται με το μέγεθος του δείγματος και συνεπώς ένα αρκετά μεγάλο δείγμα από σενάρια μπορούν να παραχθούν για τον πιο ακριβή υπολογισμό των κατανομών πιθανότητας των μεταβλητών εξόδου του μοντέλου
- Οι οικονομετρικές εκτιμήσεις των κατανομών των παραμέτρων του μοντέλου είναι σημαντικές για να ποσοτικοποιήσουν γνωστές σχέσεις μεταξύ των παραμέτρων (από την οικονομική θεωρία ή/και την κοινή λογική) και την σχετική αβεβαιότητα

Το παγκόσμιο ολοκληρωμένο μοντέλο PROMHΘΕΑΣ έχει σχεδιαστεί ειδικά για να αποφύγει την μεγάλη υπολογιστική (και συχνά χωρίς λόγο) επιβάρυνση, η οποία προκαλείται από την μοντελοποίηση λεπτομερειών χαμηλού επιπέδου. Από την άλλη πλευρά, ο PROMHΘΕΑΣ επικεντρώνεται στους βασικούς παράγοντες που καθορίζουν την εξέλιξη του συστήματος ενέργεια-οικονομία και αξιολογεί τις επιπτώσεις της ενδεδειγμένης αναπαράστασης της αβεβαιότητας. Η ενσωμάτωση της αβεβαιότητας παρέχει πληροφορίες σχετικά με το εύρος των πιθανών αποτελεσμάτων του μοντέλου και την αναμενόμενη πιθανότητα για κάθε ένα από τα αποτελέσματα. Σε ένα περιβάλλον όπως η ενεργειακή οικονομία, η οποία είναι γεμάτη από πολλαπλές πηγές αβεβαιότητας, το μοντέλο PROMHΘΕΑΣ μπορεί να προσφέρει γνώσεις για την αξιόπιστη ανάπτυξη τεχνολογιών σε εναλλακτικά ενδεχόμενα και να παρέχει πληροφορίες για την πιθανότητα συγκεκριμένων εξελίξεων στον τομέα της ενέργειας.

Ο PROMHΘΕΑΣ είναι μοντέλο προσομοίωσης και όχι βελτιστοποίησης. Αυτό σημαίνει ότι σε κάθε πείραμα Monte Carlo, το μοντέλο τρέχει ανά χρονιά και οι παράγοντες του μοντέλου λαμβάνουν αποφάσεις βασισμένοι σε παροντικές ή/και παρελθοντικές συνθήκες. Το μοντέλο δεν έχει τέλεια γνώση και προβλεπτικότητα (perfect foresight), αλλά οι μελλοντικές προεκτάσεις βασίζονται στις παρελθοντικές τάσεις με βάση μυωπικές προσδοκίες (myopic expectations). Υπό αυτή την έννοια, το μοντέλο παίρνει αποφάσεις βασισμένο στην καλύτερη διαθέσιμη πληροφόρηση και συνεπώς οι αποφάσεις ενδεχομένως δεν είναι βέλτιστες. Η έλλειψη τέλει γνώσης αντιπροσωπεύει με μεγαλύτερη ακρίβεια την πραγματικότητα για τις περισσότερες παραμέτρους (π.χ. τιμές καυσίμων, τεχνολογικές βελτιώσεις) και την διαδικασία λήψης αποφάσεων των μεμονωμένων καταναλωτών, κυβερνήσεων και εταιρειών. Μόνο ορισμένες μεταβλητές υπολογίζονται με επαναληπτικές μεθόδους, όμως αυτές περιορίζονται σε μεμονωμένους κλάδους (παραγωγή ηλεκτρισμού) και δεν απαιτείται ο επαν-υπολογισμός πολλών εξισώσεων. Μια μορφή γνώσης υλοποιείται με την χρήση στοχαστικών προεξοφλητικών επιτοκίων που είναι σταθμισμένα με βάση τον κίνδυνο και διαφοροποιημένα ανά περιοχή και τομέα έτσι ώστε να αναπαριστούν τις αβεβαιότητες των επενδυτών και των δανειστών. Με την εξάλειψη των μεγάλης κλίμακας επαναλήψεων σε πολλές περιόδους, το μοντέλο υπόκειται σε γρήγορη επίλυση και συνεπώς μπορεί να εκτελέσει μεγάλο πλήθος στοχαστικών πειραμάτων Monte Carlo. Στις περισσότερες περιπτώσεις, ο ταυτοχρονισμός μοντελοποιείται με την εισαγωγή χρονικής υστέρησης σε ορισμένες περιπτώσεις ενδογενών μεταβλητών/ εξισώσεων και συνεπώς σε κάθε χρονιά επίλυσης οι ενεργειακές αγορές βρίσκονται σε

ισορροπία τόσο ανά περιοχή του μοντέλου όσο και σε παγκόσμιο επίπεδο (μέσω των διεθνών τιμών των υδρογονανθράκων).

Κατά την κατασκευή του μοντέλου ΠΡΟΜΗΘΕΑΣ, η κύρια προσπάθεια ήταν η πλήρης κάλυψη της αβεβαιότητας με την εισαγωγή της στην παραγωγή των κατανομών για όλες τις παραμέτρους εισόδου και εξωγενείς μεταβλητές του μοντέλου. Οι οικονομετρικές εκτιμήσεις βασίζονται σε ιστορικά στοιχεία και παρέχουν ένα στοιχείο της αντικειμενικότητας και, συνεπώς, έχουν χρησιμοποιηθεί ευρέως για τον καθορισμό των κατανομών για αβέβαιες παραμέτρους εισόδου (όπως οι ελαστικότητες εισοδήματος και τιμής των εξισώσεων ζήτησης). Το μοντέλο αναγνωρίζει επίσης την υπολειμματική στοχαστικότητα που απορρέει από τις μεταβλητές που δεν περιλαμβάνονται ρητώς στον προσδιορισμό του μοντέλου. Επιπλέον, ιδιαίτερη προσοχή δίνεται στη στατιστική εξάρτηση μεταξύ των παραμέτρων εισόδου, δεδομένου ότι αναγνωρίζεται ευρέως ότι μπορεί να διαδραματίσει σημαντικό ρόλο στον προσδιορισμό της κατανομής των ενδογενών μεταβλητών. Σε ορισμένες περιπτώσεις, ακόμη και ο προσδιορισμός των εξισώσεων του μοντέλου υπόκειται σε τυχαία διακύμανση. Ενώ αναγνωρίζονται οι δυσκολίες στον καθορισμό της μεταβλητότητας των παραμέτρων και η υποκειμενική φύση ορισμένων από τις παραδοχές, η προσπάθεια είναι πάντα προς την κατεύθυνση απόκτησης αμερόληπτων μέτρων της αβεβαιότητας όσο τα ιστορικά στοιχεία και η εξειδικευμένη κρίση των εμπειρογνομόνων επιτρέπει.

Ο ΠΡΟΜΗΘΕΑΣ έχει παρόμοια δομή και μαθηματική διατύπωση με τα μεγάλης κλίμακας παγκόσμια ενεργειακά μοντέλα POLES [39] και το μοντέλο World Energy Model (WEM) της ΙΕΑ [37], τα οποία έχουν ευρέως χρησιμοποιηθεί για την ανάλυση ενεργειακών και κλιματικών πολιτικών. Το μοντέλο ΠΡΟΜΗΘΕΑΣ καλύπτει (με ενδεχομένως λιγότερο ενδελεχή τρόπο σε σύγκριση με τα ντετερμινιστικά μοντέλα [37] και [39]) όλες τις βασικές πτυχές του παγκόσμιου ενεργειακού συστήματος μαζί με κάποιες κλιματικές μεταβλητές (π.χ. εκπομπές και ατμοσφαιρικές συγκεντρώσεις διοξειδίου του άνθρακα). Με την πρωτοτυπία της ενσωμάτωσης λεπτομερούς κάλυψης της αβεβαιότητας (όπως αναλύθηκε παραπάνω) σε ένα ολοκληρωμένο μεγάλης κλίμακας μοντέλο του παγκόσμιου ενεργειακού συστήματος, ο ΠΡΟΜΗΘΕΑΣ μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ποσοτικοποίηση πιθανολογικών εκτιμήσεων των μελλοντικών αποτελεσμάτων του μοντέλου (π.χ. την πιθανότητα ότι οι εκπομπές άνθρακα θα υπερβαίνουν ένα συγκεκριμένο όριο από το 2050) με αξιόπιστο και εμπειριστατωμένο τρόπο. Η αξιολόγηση πιθανοτήτων αποτελεί μια κρίσιμη παράμετρο στη διαμόρφωση των πολιτικών καθώς ο βαθμός στον οποίο το αποτέλεσμα της πολιτικής ή των επενδύσεων είναι άγνωστο επηρεάζει σημαντικά την σκοπιμότητα υλοποίησης της συγκεκριμένης πολιτικής. Η συνολική μέτρηση του κινδύνου είναι στρατηγικής σημασίας και αποτελεί την κύρια προσπάθεια στην κατασκευή και εφαρμογή του ΠΡΟΜΗΘΕΑ. Συνεπώς, η ανάλυση με το προτεινόμενο υπόδειγμα προσθέτει μια νέα διάσταση στην ποσοτική ανάλυση που πραγματοποιείται συνήθως με βάση μοντέλα ενέργειας-οικονομίας και ενισχύει την αξιοπιστία και την αποδοχή της.

Κεφάλαιο 3

3. Ανάπτυξη του παγκόσμιου ενεργειακού μοντέλου ΠΡΟΜΗΘΕΑΣ

Ο σκοπός του κεφαλαίου 3 είναι η αναλυτική περιγραφή της αιτιοκρατικής εκδοχής του μοντέλου ΠΡΟΜΗΘΕΑΣ που κατασκευάστηκε στα πλαίσια της διατριβής.

3.1 Γενικές αρχές του ΠΡΟΜΗΘΕΑ

Το μοντέλο ΠΡΟΜΗΘΕΑΣ αναπτύχθηκε στο εργαστήριο E3MLab του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου και είναι ένα αυτοδύναμο περιεκτικό στοχαστικό μοντέλο που περιγράφει την εξέλιξη του παγκόσμιου ενεργειακού συστήματος, σε συνδυασμό με σημαντικές μεταβλητές του οικονομικού και κλιματικού συστήματος. Αποτελείται από ένα σύνολο στοχαστικών εξισώσεων, οι οποίες καλύπτουν τους τομείς της ενεργειακής ζήτησης (ανά κλάδο και καύσιμο) και προσφοράς (πχ. παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, εξόρυξη υδρογονανθράκων, παραγωγή υδρογόνου).

Ο ΠΡΟΜΗΘΕΑΣ είναι μοντέλο μερικής ισορροπίας του ενεργειακού συστήματος (και όχι γενικής ισορροπίας), εκτελεί προβλέψεις για την εξέλιξη του πλέγματος «ενέργεια-περιβάλλον» μέχρι το 2050 και αποτελεί ένα εργαλείο για την παραγωγή στοχαστικών πληροφοριών (π.χ. κατανομές πιθανότητας) για τις βασικές μεταβλητές του ενεργειακού συστήματος. Το μοντέλο περιγράφει ενδογενώς το σύνολο των σχέσεων μεταξύ όλων των βασικών ποσοτήτων/μεταβλητών που παρουσιάζουν ενδιαφέρον στο πλαίσιο της γενικής ανάλυσης των ενεργειακών συστημάτων (ζήτηση ενέργειας, μίγμα καυσίμων, παραγωγή ηλεκτρισμού, χρήση ενεργειακών τεχνολογιών) καθώς και των δυναμικών της τεχνολογικής προόδου, κυρίως για τις τεχνολογίες χαμηλών και μηδενικών εκπομπών άνθρακα. Επιπλέον, ο ΠΡΟΜΗΘΕΑΣ περιέχει μια σειρά από παραμέτρους και εξωγενείς μεταβλητές, οι οποίες είναι στοχαστικά προσδιορισμένες (πχ. ελαστικότητες, συνολικούς πόρους υδρογονανθράκων, κλιματικές πολιτικές κ.α.).

Οι κύριες μεταβλητές του μοντέλου περιλαμβάνουν δημογραφικούς δείκτες (πληθυσμός) και δείκτες οικονομικής δραστηριότητας (ΑΕΠ⁴, βιομηχανική δραστηριότητα, διαθέσιμο εισόδημα νοικοκυριών), ενεργειακή κατανάλωση ανά καύσιμο και τομέα, μερίδια τεχνολογιών στην ηλεκτροπαραγωγή, κοιτάσματα, αποθέματα, παραγωγή και διεθνείς τιμές ορυκτών καυσίμων (συμβατικό και μη συμβατικό πετρέλαιο και φυσικό αέριο, άνθρακας), εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα, ατμοσφαιρικές συγκεντρώσεις αερίων του θερμοκηπίου και ενδογενή τεχνολογική πρόοδο για όλες τις ενεργειακές τεχνολογίες.

Το μοντέλο αναπαριστά τις ενδογενείς μεταβλητές σαν συνάρτηση εξωγενών μεταβλητών, παραμέτρων, άλλων ενδογενών μεταβλητών και όρων σφάλματος. Όλες οι ενδογενείς μεταβλητές είναι στοχαστικές και παρουσιάζουν συν-διακύμανση, η προέλευση της οποίας είναι αναλυτικά ανιχνεύσιμη χρησιμοποιώντας το ίδιο το στοχαστικό μοντέλο. Όλες οι εξωγενείς μεταβλητές, οι παράμετροι και οι όροι σφάλματος του μοντέλου είναι στοχαστικές με αναπαράσταση της κατανομής πιθανοτήτων τους περιλαμβάνοντας και όρους συνδιακύμανσης. Προκύπτει επομένως ότι και όλες οι ενδογενείς μεταβλητές είναι επίσης στοχαστικές. Η βασική έξοδος του ΠΡΟΜΗΘΕΑ είναι ένα σύνολο δεδομένων για τις ενδογενείς μεταβλητές του μοντέλου που προκύπτουν από προσομοιώσεις Monte Carlo.

Το μοντέλο ΠΡΟΜΗΘΕΑΣ περιέχει ένα διαδοχικά δυναμικό (recursive dynamic) μοντέλο με ετήσια χρονική ανάλυση μέχρι το 2050 το οποίο έχει τριγωνική δομή έτσι ώστε να αποφύγει τον ταυτοχρονισμό μεταξύ των εξισώσεων. Από την άλλη πλευρά, ο ταυτοχρονισμός μοντελοποιείται συνήθως με εισαγωγή χρονικής υστέρησης σε ορισμένες περιπτώσεις ενδογενών μεταβλητών/εξισώσεων. Οι περισσότερες από τις εξισώσεις του μοντέλου καθορίζονται με όρους διαφοράς (difference terms) έτσι ώστε να αποφευχθεί η υπερβολική πρόωρη μεταβλητότητα και να αντιπροσωπευτεί επαρκώς η συσσώρευση της αβεβαιότητας μακροπρόθεσμα. Το μοντέλο προσομοιώνει τόσο την προσφορά όσο και την ζήτηση ενέργειας, οι οποίες αλληλοεπιδρούν μεταξύ τους για να οδηγήσουν σε ισορροπία τις ενεργειακές αγορές σε διαφορετικές κλίμακες: τα λεπτομερή ενεργειακά ισοζύγια (ανά καύσιμο και ενεργειακή χρήση) σε κάθε περιφέρεια του ΠΡΟΜΗΘΕΑ συναθροίζονται ώστε να προσομοιώσουν τις παγκόσμιες αγορές ενέργειας και την διαμόρφωση των διεθνών τιμών των ορυκτών καυσίμων.

Η δομή του μοντέλου δηλαδή περιλαμβάνει δύο επίπεδα ανάλυσης:

- I. **διεθνείς ενεργειακές αγορές**, με παγκόσμια ισορροπία μεταξύ της προσφοράς και της ζήτησης των ορυκτών καυσίμων (πετρέλαιο, φυσικό αέριο, άνθρακας) και των διεθνών τιμών των υδρογονανθράκων και
- II. **ανάλυση των ενεργειακών συστημάτων ανά περιοχή**, η οποία περιλαμβάνει όλες τις κύριες ποσότητες/μεταβλητές ενέργειας και τιμών σε συνδυασμό με βασικές περιβαλλοντικές μεταβλητές (π.χ. εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου).

⁴ Ακαθάριστο Εγχώριο Προϊόν

Εκτός από τις διεθνείς τιμές των ορυκτών καυσίμων, τα ενεργειακά συστήματα των περιοχών του μοντέλου αλληλοεπηρεάζονται ιδίως μέσω του εμπορίου, της τεχνικής προόδου (π.χ. μείωση κεφαλαιουχικού κόστους ΑΠΕ), της αύξησης της μέσης παγκόσμιας θερμοκρασίας και των αποτελεσμάτων δικτύου (*network effects*), π.χ. μεταβαλλόμενα πρότυπα κατανάλωσης και διάχυση των νέων τεχνολογιών.

Η πιο πρόσφατη έκδοση του ΠΡΟΜΗΘΕΑ που χρησιμοποιείται στην παρούσα διατριβή περιέχει περίπου 22.000 μη γραμμικές εξισώσεις με ισάριθμους αγνώστους για κάθε χρονική περίοδο. Το μοντέλο έχει αναπτυχθεί και επιλύεται στην γλώσσα προγραμματισμού E-VIEWS και χρησιμοποιεί εναλλακτικές βάσεις δεδομένων, οι σημαντικότερες από τις οποίες είναι:

- Για τα ενεργειακά ισοζύγια, ενεργειακές καταναλώσεις ανά κλάδο και καύσιμο, πρωτογενή παραγωγή υδρογονανθράκων και τεχνολογίες ηλεκτροπαραγωγής: ENERDATA (<http://www.enerdata.net/>) και IEA (<http://www.iea.org/statistics/>)
- Για τα ενεργειακά ισοζύγια, μακρο-οικονομικά και υπόλοιπα δεδομένα και της Ευρωπαϊκής Ένωσης: EUROSTAT (<http://ec.europa.eu/eurostat>)
- Για τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα ανά περιοχή: The Emissions Database for Global Atmospheric Research-EDGAR (<http://edgar.jrc.ec.europa.eu/>)
- Για τα δεδομένα και τις προβλέψεις για τον πληθυσμό ανά περιοχή: United Nations (<http://esa.un.org/wpp/>)
- Για τα δεδομένα και τις προβλέψεις για την συνολική (και ανά κλάδο) οικονομική δραστηριότητα: World Bank (<http://data.worldbank.org/>) και IMF-World Economic Outlook (<http://www.imf.org/external/ns/cs.aspx?id=28>)
- Για τα κόστη και τις αποδόσεις των ενεργειακών τεχνολογιών (κυρίως τεχνολογίες ηλεκτροπαραγωγής): TECHPOL και PRIMES database (μη διαθέσιμη ελεύθερα)

3.2 Βασικά χαρακτηριστικά του ΠΡΟΜΗΘΕΑ

Ο ορίζοντας πρόβλεψης του ΠΡΟΜΗΘΕΑ είναι η περίοδος 2011-2050 σε ετήσια βάση. Ωστόσο, για την περίοδο 2011-2014 το μοντέλο προσομοιώνει την εξέλιξη των κυριότερων μεταβλητών με βάση πραγματικά δεδομένα και επίσημες εκτιμήσεις όταν αυτές είναι διαθέσιμες από διάφορες πηγές ή/και βάσεις δεδομένων (κυρίως από την ENERDATA, EUROSTAT και IMF-World Economic Outlook). Στο μοντέλο, οι χώρες του κόσμου ομαδοποιούνται σε 10 μεγάλες περιοχές του σύμφωνα με τα οικονομικά, πολιτικά, ενεργειακά και κοινωνικά τους χαρακτηριστικά:

1. Η Ευρωπαϊκή ένωση των 15 (**EU15**), η οποία περιέχει εκτός από τις 15 χώρες της Ευρωπαϊκής Ένωσης (Αυστρία, Βέλγιο, Δανία, Ελλάδα, Γαλλία, Γερμανία, Φινλανδία, Ιταλία, Ιρλανδία, Ηνωμένο Βασίλειο, Ισπανία, Πορτογαλία, Ολλανδία, Λουξεμβούργο, Σουηδία), τη Νορβηγία και την Ελβετία

2. Τα 12 νέα μέλη της Ευρωπαϊκής Ένωσης⁵ (**NMS12**) (Τσεχία, Σλοβακία, Σλοβενία, Μάλτα, Κύπρος, Ουγγαρία, Λιθουανία, Λετονία, Εσθονία, Πολωνία, Βουλγαρία και Ρουμανία)
3. Βόρεια Αμερική (**NOAM**), που περιλαμβάνει τις Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής και τον Καναδά
4. Δυτικός Ειρηνικός (**WPAC**), που περιλαμβάνει την Ιαπωνία, τη Νότια Κορέα, την Αυστραλία και τη Νέα Ζηλανδία
5. Κίνα (**CHN**) που περιλαμβάνει το Χονγκ-Κόνγκ
6. Ινδία (**IND**)
7. Πρώην Σοβιετική Ένωση εκτός από τις χώρες της Βαλτικής (**CIS**), η οποία περιλαμβάνει την Ρωσία την Ουκρανία, την Αρμενία, το Αζερμπαϊτζάν, την Λευκορωσία, την Γεωργία, την Μολδαβία, το Καζακστάν, το Κυργιστάν, το Τουρκμενιστάν και το Ουζμπεκιστάν.
8. Μέση Ανατολή (η περιοχή καλύπτει από τη Μεσόγειο μέχρι τα σύνορα του Ιράν με το Αφγανιστάν και το Πακιστάν) και Βόρεια Αφρική (Αίγυπτος, Λιβύη, Τυνησία, Αλγερία, Μαρόκο) (**MENA**)
9. Αναδυόμενες οικονομίες οι οποίες έχουν ετήσιο εισόδημα ανά κάτοικο περισσότερο από 3000 \$ '05 PPP (σε ισοτιμία αγοραστικής δύναμης) το έτος 2010 . Η περιοχή περιλαμβάνει το σύνολο των χωρών της Λατινικής/Νότιας Αμερικής (συμπεριλαμβανομένων της Βραζιλίας και της Αργεντινής), της Κεντρικής Αμερικής (Μεξικό, Κόστα Ρίκα κ.α.) και τις ραγδαία αναπτυσσόμενες οικονομίες της Νοτιοανατολικής Ασίας (**EMRG**)
10. Υπόλοιπο κόσμος, που περιλαμβάνει τις λιγότερο αναπτυγμένες χώρες (**RESTW**). Ειδικά η περιοχή περιέχει τις φτωχότερες οικονομίες του πλανήτη που βρίσκονται κυρίως στην Αφρική και στην Ασία και έχουν εισόδημα ανά κάτοικο λιγότερο από 3000 \$ '05 PPP (σε σταθερά δολάρια).

Το μοντέλο ΠΡΟΜΗΘΕΑΣ χωρίζεται σε υπο-μοντέλα, τα οποία αλληλοεπιδρούν μεταξύ τους με χρονική υστέρηση στις κοινές τους μεταβλητές προκειμένου να αποφευχθεί ο ταυτόχρονος προσδιορισμός στις εξισώσεις του μοντέλου. Τα κυριότερα υπο-μοντέλα του ΠΡΟΜΗΘΕΑ είναι:

- Το υπο-μοντέλο της δημογραφίας και της οικονομικής δραστηριότητας, που προβλέπει τον πληθυσμό, το ακαθάριστο εγχώριο προϊόν (ΑΕΠ), την δραστηριότητα των βασικών κλάδων της οικονομίας (προστιθέμενη αξία της βιομηχανικής παραγωγής, διαθέσιμο εισόδημα των νοικοκυριών, επιβατο-χιλιόμετρα στις μεταφορές κ.α.)
- Το υπο-μοντέλο της προμήθειας ορυκτών καυσίμων το οποίο περιέχει:
 - Πόρους, κοιτάσματα και αποθέματα πετρελαίου και φυσικού αερίου
 - Πόρους και κοιτάσματα μη συμβατικού πετρελαίου (πολύ βαρύ πετρέλαιο από την Βενεζουέλα και πίσσα από την Alberta του Καναδά)
 - Πόρους και κοιτάσματα μη συμβατικού φυσικού αερίου (σχιστολιθικό αέριο, έγκλειστο αέριο και μεθάνιο από κοιτάγματα γαιανθράκων)

⁵ Εξαιρείται η Κροατία, η οποία είναι το 28^ο μέλος της Ευρωπαϊκής Ένωσης από το 2013

- Παραγωγή υδρογονανθράκων ανά περιοχή με βάση τα αποθέματα, τα συνολικά κοιτάσματα, τις επενδύσεις στις παραγωγικές υποδομές και το κόστος εξόρυξης (που διαφέρει ανά χώρα, καύσιμο και κοιτάσμα)
- Καμπύλες κόστους-παραγωγής για τη βιομάζα (ανά περιοχή με βάση τις δυνατότητες παραγωγής και τους πόρους βιομάζας) και το ουράνιο
- Το υπο-μοντέλο της τελικής ενεργειακής ζήτησης στον κλάδο της βιομηχανίας (και μη ενεργειακές χρήσεις) και στον κλάδο των νοικοκυριών, ο οποίος εμπεριέχει επίσης την γεωργία και τον κλάδο των υπηρεσιών.
- Ο τομέας των μεταφορών με ιδιωτικά επιβατικά αυτοκίνητα αναπαρίσταται λεπτομερώς στον ΠΡΟΜΗΘΕΑ, διακρίνοντας εναλλακτικές τεχνολογίες αυτοκινήτων (π.χ. αυτοκίνητα με κινητήρα εσωτερικής καύσης, υβριδικά οχήματα, ηλεκτρικά αυτοκίνητα και αυτοκίνητα με κυψέλες υδρογόνου). Οι υπόλοιποι κλάδοι των μεταφορών (οδικές μεταφορές φορτίων, σιδηροδρομικές μεταφορές, επιβατικά αεροπλάνα και μεταφορές με πλοία, υπερ-πόντιες μεταφορές) αναπαρίστανται με λιγότερη λεπτομέρεια στο μοντέλο.
- Το μοντέλο της ηλεκτροπαραγωγής στο οποίο 28 τεχνολογίες παραγωγής ηλεκτρισμού ανταγωνίζονται για να καλύψουν την ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας από τους τελικούς καταναλωτές (συμπεριλαμβανομένων των ιδιο-καταναλώσεων και των απωλειών δικτύου). Το μοντέλο επίσης περιλαμβάνει αναπαράσταση της καμπύλης διάρκειας φορτίου, τεχνικές και οικονομικές δυνατότητες για παραγωγή από ΑΠΕ και των τεχνολογιών δέσμευσης και αποθήκευσης διοξειδίου του άνθρακα (CCS)
- Το υπο-μοντέλο παραγωγής υδρογόνου, που προσδιορίζει αναλυτικά 18 τεχνολογίες για την συγκεντρωτική παραγωγή υδρογόνου
- Το υπο-μοντέλο αποθήκευσης, μεταφοράς και διανομής του υδρογόνου
- Το μοντέλο των τιμών των ορυκτών καυσίμων, που προβλέπει την εξέλιξη των διεθνών τιμών για το πετρέλαιο, το φυσικό αέριο και τον άνθρακα με βάση την παγκόσμια κατανάλωση, το κόστος εξόρυξης και τα διαθέσιμα αποθέματα και κοιτάσματα, και τις τιμές καταναλωτή για τις διάφορες ενεργειακές μορφές και καύσιμα, με τις τελευταίες να διαφοροποιούνται για κάθε τομέα της τελικής ζήτησης.
- Το υπο-μοντέλο κλίματος, το οποίο υπολογίζει τις συγκεντρώσεις των αερίων του θερμοκηπίου και συνεπώς την μέση παγκόσμια αλλαγή της θερμοκρασίας, με βάση τους δείκτες συμβολής στο φαινόμενο του θερμοκηπίου (GWP) όπως προσδιορίστηκαν από την Τέταρτη Έκθεση Αξιολόγησης της Διακυβερνητικής Επιτροπής για την Αλλαγή του Κλίματος (IPCC [1])
- Το μοντέλο των καμπυλών «μάθησης» δύο παραγόντων των τεχνολογιών του ενεργειακού συστήματος, το οποίο ενδογεντοποιεί την τεχνική πρόοδο μέσω της μάθησης από την έρευνα (R&D) και την εμπειρία (*learning by doing*). Στο μοντέλο έχουν εκτιμηθεί οι δυναμικές για 51 τεχνολογικές επιλογές για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, την θέρμανση στα νοικοκυριά, την παραγωγή/αποθήκευση/μεταφορά υδρογόνου και τα επιβατικά αυτοκίνητα.

Το παρακάτω σχήμα παρουσιάζει το συνοπτικό διάγραμμα ροής μεταξύ των υπομοντέλων του ΠΡΟΜΗΘΕΑ [84]:

- Συγκριτική αξιολόγηση των εναλλακτικών αλυσίδων παραγωγής ενέργειας (π.χ. οικονομία υδρογόνου σε σχέση με την οικονομία βασισμένη στην ηλεκτρική ενέργεια ή την οικονομία υδρογονανθράκων)
- Αλληλεπιδράσεις μεταξύ του ενεργειακού συστήματος και του περιβάλλοντος
- Συγκριτική αξιολόγηση σεναρίων, στα οποία χρησιμοποιούνται εναλλακτικές υποθέσεις για τις εξωγενείς υποθέσεις (π.χ. κοιτάσματα υδρογονανθράκων, κόστος τεχνολογιών, αυτόνομη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης) και τις ενεργειακές και κλιματικές πολιτικές (π.χ. φόρος άνθρακα, επιδοτήσεις στις ΑΠΕ, επενδύσεις σε έρευνα και ανάπτυξη για τεχνολογίες χαμηλού άνθρακα).

3.3 Μοντελοποίηση της ζήτησης ενέργειας

3.3.1 Ζήτηση ενέργειας για βιομηχανία και νοικοκυριά

Η ζήτηση για τα ενεργειακά προϊόντα είναι ένα μέσο για την απόκτηση χρήσιμων υπηρεσιών από την ενέργεια (π.χ. μεταφορές, θέρμανση, βιομηχανικές χρήσεις κ.α.). Η τελική ζήτηση ενέργειας στο μοντέλο προσδιορίζεται κυρίως από τρεις τομείς: βιομηχανία, οικιακός τομέας (ο οποίος περιλαμβάνει τα νοικοκυριά, τον τομέα των υπηρεσιών και την γεωργία) και τις μεταφορές. Μεταξύ των τριών κύριων τομέων, το μοντέλο προσδιορίζει υπο-τομείς:

- Στην **βιομηχανία**, ο ΠΡΟΜΗΘΕΑΣ αναπαριστά ξεχωριστά την ζήτηση για τις βιομηχανικές χρήσεις που απαιτούν θερμότητα/ατμό, την ζήτηση για ηλεκτρική ενέργεια και τις μη ενεργειακές χρήσεις των καυσίμων. Ο άνθρακας, το πετρέλαιο, το φυσικό αέριο, η τεχνολογία συμπαραγωγής ατμού και ηλεκτρικής ενέργειας (CHP) και οι κυψέλες υδρογόνου⁶ ανταγωνίζονται για να καλύψουν την ζήτηση για τις μη ηλεκτρικές βιομηχανικές χρήσεις σε κάθε περιοχή του ΠΡΟΜΗΘΕΑ. Ο σκοπός του υπο-μοντέλου της βιομηχανικής ζήτησης είναι να αντιπροσωπεύσει όσο το δυνατόν με μεγαλύτερη ακρίβεια την εξέλιξη του μίγματος καυσίμων της ζήτησης ενέργειας για βιομηχανικές δραστηριότητες με βάση διαφορετικούς δείκτες ενεργειακής έντασης (κατανάλωση ενέργειας προς αξία παραγωγής), την δομή της ενεργειακής ζήτησης και τις δυνατότητες υποκατάστασης όσον αφορά ενεργειακές τεχνολογίες και καύσιμα ή την πιθανότητα για εξοικονόμηση ενέργειας.
- Στον **οικιακό τομέα**, το μοντέλο διαχωρίζει δυο βασικές κατηγορίες ενεργειακής ζήτησης: την κατανάλωση για θέρμανση χώρων, μαγείρεμα και θέρμανση νερού που υπόκειται σε ανταγωνισμό μεταξύ καυσίμων και ενεργειακών μορφών και την ζήτηση για ειδικές χρήσεις που καλύπτονται μόνο από ηλεκτρική ενέργεια (ηλεκτρικές συσκευές για μη-θερμαντικούς σκοπούς, φωτισμός, ηλεκτρονικές συσκευές, κατανάλωση για air-conditioning, ψυγεία κ.α.). Οι οικιακοί καταναλωτές

⁶ Η συμπερίληψη των τεχνολογιών συμπαραγωγής και των κυψελών υδρογόνου σαν ανταγωνιστικές τεχνολογίες βασίζεται στο σκεπτικό ότι η χρησιμοποίησή τους για παραγωγή ηλεκτρισμού καταλήγει και σε παραγωγή ποσότητας ατμού, η οποία αφαιρείται από την συνολική ζήτηση για μη ηλεκτρικές χρήσεις.

αποφασίζουν για το επίπεδο της ενεργειακής τους κατανάλωσης λαμβάνοντας υπόψη τις ανάγκες τους για θέρμανση και ηλεκτρισμό, οι οποίες καθορίζονται από τις αλλαγές στο εισόδημά τους και την σχετική μεταβολή στις τιμές των καυσίμων. Οι ανάγκες θέρμανσης των νοικοκυριών καλύπτονται από ανταγωνιστικές τεχνολογίες, οι οποίες μοντελοποιούνται ενδελεχώς. Αυτές είναι: πετρέλαιο, φυσικό αέριο, άνθρακας (κυρίως στις αναπτυσσόμενες χώρες), ηλεκτρικές αντιστάσεις, αντλίες θερμότητας και κυψέλες υδρογόνου. Ο ΠΡΟΜΗΘΕΑΣ αναπαριστά ρητά την ζήτηση ενέργειας από τα νοικοκυριά για θέρμανση χώρων και νερού, ενσωματώνοντας ειδική μεταχείριση προκειμένου να ληφθούν υπόψη οι κλιματικές συνθήκες ανά περιοχή (π.χ. καύσωνες και έντονη ξηρασία στις περιοχές της Αφρικής, της Μέσης Ανατολής και της Λατινικής Αμερικής σε αντίθεση με την Ρωσία και την Βόρεια Αμερική που έχουν ιδιαίτερα μεγάλες ανάγκες θέρμανσης λόγω χαμηλής θερμοκρασίας και μεγάλων χώρων δαπέδου ανά οίκημα).

Η μετατροπή των ενεργειακών προϊόντων σε ωφέλιμη ενέργεια για τους τελικούς καταναλωτές απαιτεί κεφαλαιουχικό εξοπλισμό. Σε μια τυπική εξίσωση του ΠΡΟΜΗΘΕΑ για την ωφέλιμη ενεργειακή ζήτηση, οι κύριες επεξηγηματικές μεταβλητές είναι οι δείκτες οικονομικής δραστηριότητας και τα κόστη της ενέργειας. Η παρακάτω εξίσωση περιγράφει τον βασικό μηχανισμό για την πρόβλεψη της μελλοντικής ζήτησης:

$$\ln(D_{i,t}/D_{i,t-1}) = \alpha + \beta \ln(A_{i,t}/A_{i,t-1}) + \sum_{l=0}^p \gamma_l \left(\ln \left(\frac{AVCOST_{i,t-l}}{AVCOST_{i,t-l-1}} \right) \right) + u_{i,t} \quad (1)$$

Η μεταβλητή $D_{i,t}$ αναπαριστά την ωφέλιμη ζήτηση ενέργειας του υπο-τομέα i την χρονιά t , $A_{i,t}$ είναι ο κατάλληλος δείκτης δραστηριότητας (π.χ. βιομηχανική παραγωγή, διαθέσιμο εισόδημα των νοικοκυριών, αριθμός επιβατικών αυτοκινήτων), η μεταβλητή $AVCOST_{i,t}$ αναπαριστά τον σταθμισμένο μέσο όρο του κόστους των διαφορετικών τεχνολογιών/καυσίμων (το οποίο περιλαμβάνει το σταθερό και τα μεταβλητό κόστος και το κόστος καυσίμου-συμπεριλαμβανομένου του πιθανού κόστους για τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα), το α είναι η σταθερή παράμετρος (παράμετρος τάσης που αντιπροσωπεύει την αυτόνομη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης), η παράμετρος β αντιπροσωπεύει την ελαστικότητα της ζήτησης ενέργειας ως προς τον δείκτη δραστηριότητας και $\sum_{l=0}^p \gamma_l$ είναι η ελαστικότητα ως προς το μέσο κόστος της ενέργειας για τον συγκεκριμένο τομέα. Τέλος, το $u_{i,t}$ είναι ένας όρος σφάλματος, ο οποίος αντιπροσωπεύει το σύνολο των μεταβλητών που δεν έχουν μοντελοποιηθεί με σαφήνεια στην παραπάνω εξίσωση, το άθροισμά τους υποτίθεται ότι ακολουθεί την κανονική κατανομή με μηδενικό μέσο και σταθερή διακύμανση και σε ορισμένες περιπτώσεις εμφανίζει σειριακή συσχέτιση, η οποία διαμορφώνεται μέσω ενός συστήματος αυτοπαλινδρόμησης.

Η ενεργειακή ζήτηση ανά κλάδο συνδέεται με τις επενδυτικές αποφάσεις και τις τεχνολογικές επιλογές στο επίπεδο του τελικού καταναλωτή. Αυτό σημαίνει ότι η βραχυχρόνια συμπεριφορά των καταναλωτών (όταν το απόθεμα κεφαλαίου μπορεί να θεωρηθεί ως σταθερό) διαφέρει από την μακροχρόνια συμπεριφορά, όταν δηλαδή

υπάρχει η δυνατότητα αλλαγής ενεργειακής τεχνολογίας και κεφαλαιουχικού εξοπλισμού. Συνεπώς, η εξίσωση (1) συλλαμβάνει τόσο τις βραχυπρόθεσμες όσο και τις μακροπρόθεσμες αντιδράσεις της ζήτησης στην εξέλιξη των τιμών των καυσίμων.

Διαφορετικές εξισώσεις σταθερής ελαστικότητας έχουν εκτιμηθεί για κάθε τομέα της ενεργειακής ζήτησης και για κάθε περιοχή που αναπαρίσταται στο μοντέλο. Καθώς η βραχυπρόθεσμη εξέλιξη της ενεργειακής κατανάλωσης συνήθως δεν ελέγχεται άμεσα από τον τελικό καταναλωτή, αλλά καθορίζεται από την ήδη εγκατεστημένη τεχνολογία και είναι σε μεγάλο βαθμό ενσωματωμένη στα χαρακτηριστικά του πάγιου ενεργειακού εξοπλισμού, οι αντιδράσεις της ενεργειακής ζήτησης σε μεταβολές των τιμών των καυσίμων και σε κλιματικές πολιτικές συχνά συνεπάγονται μεγάλες καθυστερήσεις, που αναπαρίστανται με τις ελαστικότητες γ_i . Όλες οι τιμές ενέργειας, οι δείκτες οικονομικής δραστηριότητας και τα κόστη των διαφόρων τεχνολογικών επιλογών που έχουν ενσωματωθεί στις εκτιμήσεις του μοντέλου έχουν μετατραπεί σε τιμές σε σταθερά δολάρια του 2005 (\$ 05). Η μετατροπή των ονομαστικών τιμών σε πραγματικές γίνεται χρησιμοποιώντας τον αποπληθωριστή του ΑΕΠ.

Οι δείκτες δραστηριότητας προέρχονται από το μοντέλο της δημογραφίας και της οικονομικής δραστηριότητας, το οποίο έχει μια ιεραρχική δομή με τις μεταβλητές να εξαρτώνται (μερικώς) από μια γενική στοχαστική τάση, από την εκτιμημένη εξίσωση κάθε περιοχής και από έναν ανεξάρτητο τυχαίο όρο. Το δημογραφικό μοντέλο του ΠΡΟΜΗΘΕΑ είναι σχετικά απλό και είναι ρυθμισμένο ώστε να αναπαράγει σαν μέσο το σενάριο μέσης γονιμότητας όπως κατασκευάστηκε από τον ΟΗΕ [85], ενώ οι μέσοι όροι των προβλέψεων για την οικονομική μεγέθυνση (αύξηση του ΑΕΠ κάθε περιοχής) αναπαράγουν τα μακρο-οικονομικά αποτελέσματα του παγκόσμιου μοντέλου γενικής ισορροπίας GEM-E3, το οποίο έχει χρησιμοποιηθεί εκτεταμένα από την Ευρωπαϊκή Επιτροπή για αναλύσεις οικονομικών, ενεργειακών και κλιματικών πολιτικών⁷. Εκτός από τα αποτελέσματα του GEM-E3, οι μακρο-οικονομικές προβλέψεις της IEA [86], του Economic Outlook του OECD [87] καθώς και οι βραχυπρόθεσμες εκτιμήσεις του Διεθνούς Νομισματικού Ταμείου IMF [88] χρησιμοποιήθηκαν για την μοντελοποίηση της εξέλιξης του ΑΕΠ μέχρι το 2050 στον ΠΡΟΜΗΘΕΑ.

Αυτοπαλινδρομικές σχέσεις για την αύξηση του ΑΕΠ ανά κάτοικο εκτιμήθηκαν οικονομετρικά για όλες τις περιοχές του ΠΡΟΜΗΘΕΑ και η συνδιακύμανση τους έχει ληφθεί υπόψη. Πολύ μακροχρόνιες χρονολογικές σειρές του ΑΕΠ ανά κάτοικο, οι οποίες έχουν αντληθεί από την βάση δεδομένων [88], χρησιμοποιήθηκαν έτσι ώστε να ποσοτικοποιηθεί λεπτομερώς η μεταβλητότητα στην υποκείμενη/υποβόσκουσα οικονομική ανάπτυξη. Οι μεταβολές του ΑΕΠ επίσης υπόκεινται σε βραχυπρόθεσμη (κυκλική) διακύμανση, η οποία παρουσιάζει ισχυρή συνδιακύμανση μεταξύ των περιοχών του μοντέλου, όπως παρατηρείται συνήθως στις παγκόσμιες αγορές.

⁷ Το λεπτομερές εγχειρίδιο και ορισμένες εφαρμογές του μοντέλου GEM-E3 μπορούν να βρεθούν στο: <http://www.e3mlab.eu/e3mlab/>

Το επίπεδο της συνολικής οικονομικής δραστηριότητας όπως μετρείται με τον δείκτη ΑΕΠ, έχει ισχυρή άμεση επίπτωση σε πολλές μεταβλητές του μοντέλου (πχ. ενεργειακή ζήτηση από τους τελικούς καταναλωτές, διεθνείς τιμές καυσίμων, συνολική παραγωγή ηλεκτρισμού, εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα). Από την άλλη πλευρά, δεν μοντελοποιείται σχεδόν καμία ανάδραση από το ενεργειακό σύστημα στο ΑΕΠ, καθώς ο ΠΡΟΜΗΘΕΑΣ είναι ένα ενεργειακό μοντέλο μερικής ισορροπίας, του ίδιου τύπου όπως τα IEA-WEM [37] και το POLES [39]. Από την άλλη πλευρά, στις περιοχές CIS και MENA, η επίδραση των διεθνών τιμών των καυσίμων στα έσοδα από τις εξαγωγές τους και συνεπώς στο ΑΕΠ λαμβάνεται υπόψη (καθώς σε αυτές τις περιοχές οι εξαγωγές πετρελαίου και φυσικού αερίου αντιπροσωπεύουν ένα ιδιαίτερα υψηλό ποσοστό του ΑΕΠ). Σε αντίθεση, τα μοντέλα γενικής ισορροπίας μπορούν να ερευνήσουν τις μακροοικονομικές επιπτώσεις από την εφαρμογή ενεργειακών ή κλιματικών πολιτικών στο ΑΕΠ, την εγχώρια παραγωγή ανά κλάδο, τις επενδύσεις, το εμπόριο, την απασχόληση και την ιδιωτική κατανάλωση.

Το δημογραφικό και το μοντέλο οικονομικής δραστηριότητας καθορίζουν και άλλους δείκτες δραστηριότητας, όπως η βιομηχανική παραγωγή (προστιθέμενη αξία), το διαθέσιμο εισόδημα των νοικοκυριών και το ποσοστό της ιδιοκτησίας επιβατικών αυτοκινήτων (αυτοκίνητα ανά χίλιους κατοίκους) σαν άμεσες ή έμμεσες συναρτήσεις του ΑΕΠ της κάθε περιοχής. Όσον αφορά τον τελευταίο δείκτη δραστηριότητας, το μοντέλο κάνει διάκριση μεταξύ βραχυπρόθεσμων και μακροπρόθεσμων καμπυλών διεξόδου με στοχαστική μετάβαση μεταξύ τους (λεπτομέρειες στο κεφάλαιο 5).

Οι στοχαστικές μεταβάσεις χρησιμοποιούνται για να αναπαραστήσουν διαρθρωτικές αλλαγές, τη μεταρρύθμιση της ενεργειακής αγοράς και εναλλακτικά πρότυπα κατανάλωσης. Σε γενικές γραμμές, οι στοχαστικές μεταβάσεις έχουν εφαρμοστεί στις εξισώσεις ζήτησης ενέργειας στον ΠΡΟΜΗΘΕΑ για τη μοντελοποίηση των διαρθρωτικών αλλαγών που συμβαίνουν όταν μια αναπτυσσόμενη χώρα/περιοχή φτάνει σε επίπεδα εισοδήματος τυπικά για μια ανεπτυγμένη οικονομία (όπως η Βόρεια Αμερική, η Ιαπωνία και η ΕΕ). Σε μια τέτοια περίπτωση, γίνεται η υπόθεση ότι η ειδική εξίσωση ενεργειακής ζήτησης για αυτή την περιοχή σταδιακά αντικαθίσταται από την αντίστοιχη εξίσωση για τις ανεπτυγμένες περιοχές. Για παράδειγμα, η εξέλιξη του ποσοστού της ιδιοκτησίας αυτοκινήτων ανά κάτοικο στις αναπτυσσόμενες περιοχές αρχικά υποτίθεται ότι ακολουθεί εξισώσεις, οι οποίες έχουν εκτιμηθεί οικονομικά με βάση τα ιστορικά δεδομένα για τις συγκεκριμένες περιοχές. Αυτές οι εξισώσεις σταδιακά αντικαθίστανται από εξισώσεις εκτιμημένες από ιστορικά στοιχεία των χωρών της ΕΕ (εκτίμηση με panel data) συμπεριλαμβανομένων των παραμέτρων που χρησιμοποιούνται για την προσομοίωση πιθανών επίπεδων κορεσμού για το ποσοστό ιδιωτικής ιδιοκτησίας αυτοκινήτων ανά κάτοικο.

Η τελική ενεργειακή ζήτηση ικανοποιείται από μια σειρά από επιλογές (συνδυασμός τεχνολογίας και καυσίμου) που μοντελοποιούνται ρητά στον ΠΡΟΜΗΘΕΑ και χαρακτηρίζονται από το χρησιμοποιούμενο καύσιμο και συγκεκριμένες τεχνολογίες. Αξιοσημείωτες μεταξύ των τελευταίων είναι:

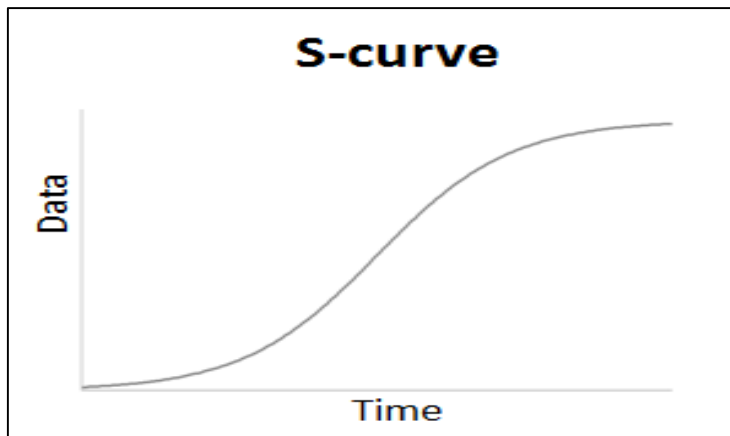
- για λέβητες θέρμανσης: ορυκτά καύσιμα (φυσικό αέριο, άνθρακας), πετρελαϊκά προσόντα διύλισης (ντίζελ, βενζίνη, LPG) επιλογές ηλεκτρικής ενέργειας (αντιστάσεις και αντλίες θερμότητας) και κυψέλες υδρογόνου
- για βιομηχανικές χρήσεις: φυσικό αέριο, άνθρακας, βαρύ πετρέλαιο, ηλεκτρική ενέργεια, συνδυασμένη παραγωγή ηλεκτρισμού και θερμότητας και κυψέλες υδρογόνου (με ή χωρίς αναμορφωτή)
- για οδικές μεταφορές: συμβατικά οχήματα (χρησιμοποιώντας βενζίνη, πετρέλαιο ντίζελ, βιοκαύσιμα και υδρογόνο), υβριδικά αυτοκίνητα (συμβατικά και plug-in), ηλεκτρικά οχήματα και αυτοκίνητα με υδρογόνο που κινούνται με κυψέλες καυσίμου (με ή χωρίς αναμορφωτή).

3.3.2 Ζήτηση ενέργειας για μεταφορές

Ο ΠΡΟΜΗΘΕΑΣ διακρίνει τον τομέα των επιβατικών οδικών μεταφορών, τα θαλάσσια υπερπόντια πλοία και τους υπόλοιπους τομείς των μεταφορών (ναυσιπλοΐα, σιδηρόδρομοι και αεροπορία). Εξαιτίας της μεγάλης σημασίας του τομέα των επιβατικών αυτοκινήτων για την εξέλιξη του παγκόσμιου ενεργειακού συστήματος και τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα, το προτεινόμενο μοντέλο δίνει ιδιαίτερο βάρος στον συγκεκριμένο τομέα και αναπαριστά ενδελεχώς τις τεχνολογίες αυτοκινήτων. Το μοντέλο για τις οδικές μεταφορές προβλέπει την δραστηριότητα σε όρους ιδιοκτησίας επιβατικών αυτοκινήτων ανά κάτοικο. Η δυναμική τόσο του αποθέματος όσο και της χρησιμοποίησης των επιβατικών αυτοκινήτων προσομοιώνεται με βάση την εξέλιξη του ΑΕΠ και του διαθέσιμου εισοδήματος των νοικοκυριών, ενώ μοντελοποιείται και η επίδραση μη οικονομικών παραγόντων που επιτρέπουν την εμφάνιση φαινομένων κορεσμού στην αγορά επιβατικών αυτοκινήτων κυρίως στις ανεπτυγμένες οικονομίες με εισόδημα ανά κάτοικο πάνω από 35.000\$ '05. Γενικά, η αύξηση του ΑΕΠ ανά κάτοικο προκαλεί αύξηση της ιδιοκτησίας αυτοκινήτων, η οποία ακολουθεί μια λογιστική logistic ή σιγμοειδή (S-shaped) καμπύλη, η οποία προσομοιάζει φαινόμενα απογείωσης και κορεσμού. Η εξίσωση (2) και το Γράφημα 3-2 παρουσιάζουν την σιγμοειδή εξίσωση

$$f_t = \frac{L}{1+e^{-kA_t}} \quad (2)$$

Όπου L είναι η ανώτατη τιμή της συνάρτησης, η μεταβλητή A_t αναπαριστά έναν δείκτη οικονομικής δραστηριότητας και η παράμετρος k συμβολίζει τον βαθμό κλίσης της καμπύλης.



Γράφημα 3-2: Γενική μορφή της καμπύλης S που χρησιμοποιείται εκτενώς στο μοντέλο

Στις αναπτυσσόμενες οικονομίες, εκτός από τις στοχαστικές εξισώσεις που έχουν εκτιμηθεί ξεχωριστά για κάθε περιοχή σε μια περίοδο με χαμηλά εισοδήματα, η εξέλιξη του αποθέματος των αυτοκινήτων εξαρτάται επίσης από τα επίπεδα κορεσμού με βάση οικονομετρικές εκτιμήσεις από ένα σύνολο δεδομένων για τις οικονομικά ανεπτυγμένες χώρες. Αυτές οι εξισώσεις αντικαθιστούν σταδιακά τις οικονομετρικά εκτιμημένες εξισώσεις των αναπτυσσόμενων περιοχών, καθώς οι τελευταίες έχουν εκτιμηθεί σε περιόδους με αρκετά χαμηλά ποσοστά ιδιοκτησίας αυτοκινήτων και δεν μπορούν να αντιπροσωπεύσουν με ακρίβεια την περίοδο μετά το 2040 όπου το εισόδημα ανά κάτοικο προβλέπεται να έχει αυξηθεί σημαντικά. Από την άλλη πλευρά, το ποσοστό ιδιοκτησίας στις αναπτυγμένες οικονομίες έχει φτάσει ήδη ή προβλέπεται να φτάσει σύντομα σε σημείο κορεσμού. Οι αναπτυσσόμενες χώρες προβλέπεται να αποτελέσουν τον κύριο μοχλό για την αύξηση του παγκόσμιου στόλου των επιβατικών αυτοκινήτων εξαιτίας της γρήγορης αύξησης του πληθυσμού και της οικονομικής του δραστηριότητας, των καλύτερων συνθηκών ζωής και του πολύ χαμηλού τωρινού ποσοστού ιδιοκτησίας αυτοκινήτων ανά κάτοικο, πχ. η Κίνα είχε μόλις 31 αυτοκίνητα ανά χίλιους κατοίκους το 2010, ενώ το ποσοστό στην Ινδία είναι ακόμα χαμηλότερο (11 αυτοκίνητα ανά χίλιους κατοίκους).

Η μέση κατανάλωση ανά αυτοκίνητο επηρεάζεται από ένα εύρος παραγόντων, η εξέλιξη των οποίων προσομοιώνεται στο μοντέλο είτε άμεσα είτε έμμεσα. Οι πιο σημαντικοί από τους παράγοντες είναι ο βαθμός χρησιμοποίησης των αυτοκινήτων (που μετρείται σε χιλιόμετρα ανά χρόνο), οι συνθήκες οδήγησης (στις πόλεις ή έξω από αυτές), το μέσο μέγεθος των αυτοκινήτων και οι τεχνολογικές βελτιώσεις που οδηγούν σε καλύτερες αποδόσεις καυσίμου. Στις αναπτυσσόμενες οικονομίες, υπάρχει μια γενική τάση αύξησης της οδήγησης σε πόλεις σε συνθήκες κυκλοφοριακής συμφόρησης (εξαιτίας της ολοένα αυξανόμενης αστικοποίησης) κατά την περίοδο 2010-2050. Επίσης, το μέγεθος των αυτοκινήτων προβλέπεται να έχει μια τάση για αύξηση καθώς το μέσο εισόδημα των νοικοκυριών αυξάνεται. Η βελτιωμένη ενεργειακή απόδοση των αυτοκινήτων εξαιτίας των αυξημένων εισαγωγών από τις τεχνολογικά αναπτυγμένες οικονομίες (Ευρωπαϊκή Ένωση, ΗΠΑ, Ιαπωνία) οδηγεί σε μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης ανά επιβατοχιλιόμετρο. Παράλληλα, οι αυξήσεις στις τιμές των καυσίμων

για τους καταναλωτές εξαιτίας των αυξήσεων στην διεθνή τιμή του πετρελαίου και της σταδιακής μείωσης των ενεργειακών επιδοτήσεων που υπάρχουν σε αρκετές αναπτυσσόμενες χώρες (ΔΟΕ [89]) οδηγούν σε μια σχετική αύξηση της ενεργειακής αποδοτικότητας στις μεταφορές.

Ο τομέας των επιβατικών μεταφορών έχει μοντελοποιηθεί με μεγάλη λεπτομέρεια και διακρίνει 13 τύπους αυτοκινήτων οι οποίοι ανταγωνίζονται για να καλύψουν την συνολική ζήτηση για οδικές μεταφορές (με βάση τον μηχανισμό που περιγράφεται στην επόμενη ενότητα)

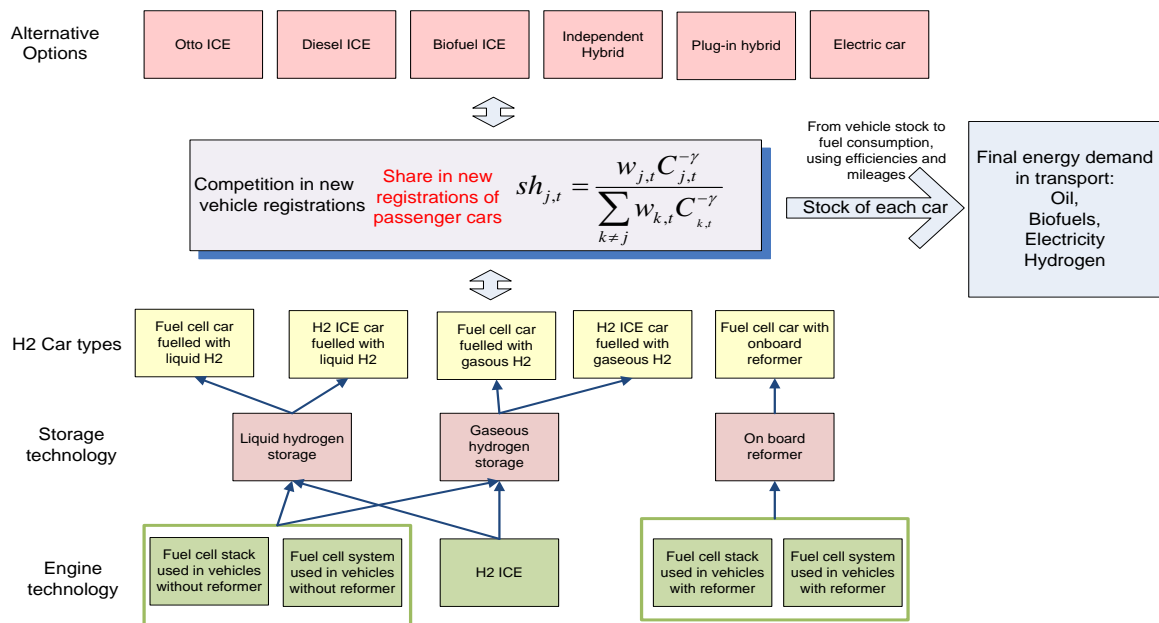
- Αυτοκίνητα με μηχανές εσωτερικής καύσης, τα οποία χρησιμοποιούν βενζίνη, ντίζελ, βιοκαύσιμα και υδρογόνο (υγρό ή αέριο)
- Υβριδικά αυτοκίνητα (συμβατικά και plug-in υβριδικά, που χρησιμοποιούν βενζίνη, ντίζελ ή βιοκαύσιμα)
- Ηλεκτρικά αυτοκίνητα που φορτίζονται αποκλειστικά με μπαταρίες
- Αυτοκίνητα υδρογόνου που χρησιμοποιούν κυψέλες καυσίμου ή βενζίνη (με ενσωματωμένο μεταρρυθμιστή σε υδρογόνο)

Ο ανταγωνισμός των τεχνολογιών για τις καινούργιες ταξινομήσεις ιδιωτικών αυτοκινήτων αναπαρίσταται με μια συνάρτηση «ψευδο»-ελαχιστοποίησης του συνολικού κόστους (Γράφημα 3-3). Σύμφωνα με αυτήν την συνάρτηση τα μερίδια των τεχνολογιών καθορίζονται από το μακροχρόνιο οριακό κόστος τους (το οποίο περιλαμβάνει τα κόστη κεφαλαίου (ανηγμένα ανά έτος), τα σταθερά και μεταβλητά κόστη λειτουργίας και τα κόστη καυσίμου μαζί με τους πιθανούς φόρους στις εκπομπές άνθρακα), ενώ εξαρτώνται από παραμέτρους που αντιπροσωπεύουν την προθυμία και την ετοιμότητα των καταναλωτών να αγοράσουν την συγκεκριμένη τεχνολογία. Το μοντέλο επίσης είναι εξοπλισμένο με ένα μηχανισμό προκειμένου να προσομοιώνει τις επιπτώσεις του κοινωνικού δικτύου (μμητισμός, καταναλωτική συμπεριφορά) και του δικτύου υποδομών στις αποφάσεις των καταναλωτών (π.χ. επιπρόσθετο κόστος στην αγορά αυτοκινήτου για την ανάπτυξη υποδομών επαναφόρτισης των μπαταριών ή/και υποδομών μεταφοράς και διανομής υδρογόνου).

Το παρακάτω διάγραμμα παρουσιάζει όλες τις τεχνολογίες αυτοκινήτων και τον συνδυασμό των πρωτογενών συστατικών τους (κινητήρας, αποθήκευση επί του οχήματος και ενσωματωμένος μεταρρυθμιστής). Δύο είδη οχημάτων με κινητήρες που χρησιμοποιούν υδρογόνο περιλαμβάνονται στο μοντέλο, τα αυτοκίνητα με κυψέλες καυσίμου και αυτά με κινητήρα εσωτερικής καύσης. Ο κινητήρας με κυψέλη καυσίμου είναι περαιτέρω διαφοροποιημένος όσον αφορά τα stacks και το σύστημα, ενώ οι κινητήρες εσωτερικής καύσης δεν διαφέρουν από αυτούς που χρησιμοποιούνται στα σημερινά συμβατικά αυτοκίνητα. Για την αποθήκευση υδρογόνου, δύο επιλογές περιλαμβάνονται στο μοντέλο: υδρογόνο σε υγρή και σε αέρια μορφή. Επιπλέον, ο ΠΡΟΜΗΘΕΑΣ περιλαμβάνει την δυνατότητα χρησιμοποίησης ενσωματωμένου μεταρρυθμιστή βενζίνης, ώστε να καταστεί δυνατή η παραγωγή υδρογόνου επί του οχήματος και να παρακαμφθεί η ανάγκη για ανάπτυξη υποδομών διανομής και

μεταφοράς υδρογόνου. Συνολικά, στον ΠΡΟΜΗΘΕΑ οι κατηγορίες αυτοκινήτων που χρησιμοποιούν υδρογόνο είναι οι παρακάτω:

- Αυτοκίνητα με κυψέλες καυσίμου με υγρό υδρογόνο
- Αυτοκίνητα με κυψέλες καυσίμου με αέριο υδρογόνο
- Αυτοκίνητα με κυψέλες καυσίμου με ενσωματωμένο μεταρρυθμιστή που χρησιμοποιούν βενζίνη
- Αυτοκίνητα με μηχανή εσωτερικής καύσης που χρησιμοποιούν υγρό υδρογόνο
- Αυτοκίνητα με μηχανή εσωτερικής καύσης που χρησιμοποιούν αέριο υδρογόνο



Γράφημα 3-3: Μοντελοποίηση τεχνολογικού ανταγωνισμού στις επιβατικές μεταφορές

Οι υπόλοιποι υπο-τομείς του κλάδου των μεταφορών (αεροπορία, ναυσιπλοΐα και σιδηροδρομικές μεταφορές) αναπαρίστανται στον ΠΡΟΜΗΘΕΑ με πολύ πιο συγκεντρωτικό τρόπο. Η συνολική ενεργειακή ζήτηση στις μεταφορές (εξαιρουμένων των επιβατικών αυτοκινήτων) μοντελοποιείται με βάση την εξίσωση (1) και εξαρτάται από την αύξηση του ΑΕΠ σε κάθε περιοχή και την εξέλιξη του μέσου κόστους για μεταφορές. Το πετρέλαιο είναι το μοναδικό καύσιμο που χρησιμοποιείται στα αεροπλάνα και στα πλοία, ενώ στους σιδηρόδρομους το πετρέλαιο ανταγωνίζεται με την ηλεκτρική ενέργεια και τον άνθρακα (σε μερικές αναπτυσσόμενες περιοχές). Το μοντέλο προσομοιάζει επίσης την διείσδυση των βιοκαυσίμων σε αυτούς τους τομείς ειδικά στην περίπτωση παγκόσμιας δράσης μετριασμού της κλιματικής αλλαγής. Τέλος, ο ΠΡΟΜΗΘΕΑΣ υπολογίζει ενδογενώς την ενεργειακή ζήτηση από την υπερπόντια ναυσιπλοΐα, η οποία υπολογίζεται μόνο σε παγκόσμιο επίπεδο.

Πίνακας 3-1: Δείκτες, βασικές μεταβλητές και παράμετροι του μοντέλου

Δείκτες:	
i	Τομέας του ενεργειακού συστήματος
j	Τύπος τεχνολογίας ή/και καυσίμου
k	Τύπος τεχνολογίας
t	Διάσταση χρόνου
r	Περιοχή που αναπαρίσταται στο μοντέλο
d	Διαστήματα στην καμπύλη διάρκειας φορτίου
c	Σύμπλεγμα τεχνολογιών (cluster)
Μεταβλητές:	
$AVCOST_{i,t}$	Μέσο ενεργειακό κόστος ανά καταναλωτή
$G_{i,t}$	Ετήσιο “κενό” μεταξύ παραγωγής και ζήτησης ανά τομέα
$CAP_{i,t}$	Ικανότητα παραγωγής ενέργειας από υφιστάμενο εξοπλισμό
$C_{j,t}$	Συνολικό ετησιοποιημένο κόστος της τεχνολογίας j
$VC_{j,t}$	Μεταβλητό κόστος της τεχνολογίας j
$fC_{j,t}$	Σταθερό πάγιο κόστος της τεχνολογίας j
$A_{i,t}$	Δείκτης οικονομικής δραστηριότητας
$D_{i,t}$	Ετήσια ωφέλιμη ζήτηση ενέργειας (σε toe)
$SC_{i,k,t}$	Ποσοστό ετήσιας αποξήλωσης της τεχνολογίας k
$PSC_{i,k,t}$	Ποσοστό πρόωρης ετήσιας αποξήλωσης της τεχνολογίας k
$DEM_{i,k,t}$	Ζήτηση ενέργειας ανά τεχνολογία, τομέα και ανά καύσιμο
$cc_{i,k,t}$	Κόστος κεφαλαίου της τεχνολογίας k
$Sh_{j,t}$	Μερίδιο τεχνολογίας j στην νέα ζήτηση του τομέα i
$INV_{j,t}$	Επενδύσεις στην τεχνολογία j του τομέα i
PE_t	Παραγωγή πετρελαίου στον Περσικό Κόλπο
RP_t	Λόγος αποθεμάτων προς παγκόσμια παραγωγή πετρελαίου
RP_{gas_t}	Λόγος αποθεμάτων προς παγκόσμια παραγωγή φυσικού αερίου
P_{oil_t}	Παγκόσμια τιμή πετρελαίου
P_{gas_t}	Παγκόσμια τιμή φυσικού αερίου
P_{coal_t}	Παγκόσμια τιμή άνθρακα
$Doil_{r,t}$	Ζήτηση πετρελαίου ανά περιοχή r του ΠΡΟΜΗΘΕΑ
$D_{gas_{r,t}}$	Ζήτηση φυσικού αερίου ανά περιοχή r του ΠΡΟΜΗΘΕΑ
$D_{coal_{r,t}}$	Ζήτηση άνθρακα ανά περιοχή r του ΠΡΟΜΗΘΕΑ
$groil_t$	Ακαθάριστες προσθήκες στα παγκόσμια αποθέματα πετρελαίου
$grgas_t$	Ακαθάριστες προσθήκες στα παγκόσμια αποθέματα φυσικού αερίου
P_{cap_t}	Παραγωγική ικανότητα προς παραγωγή πετρελαίου στην Μ. Ανατολή
$NS_{i,k,t}$	Επενδύσεις σε νέο ενεργειακό εξοπλισμό
$K_{k,t}$	Εγκατεστημένη ισχύς τεχνολογίας k
$R_{k,t}$	Αθροιστικές επενδύσεις σε R&D για την τεχνολογία k
$util_{j,t}$	Ενδογενής βαθμός χρησιμοποίησης τεχνολογίας j για ηλεκτροπαραγωγή
$totprod_t$	Συνολική ετήσια ηλεκτροπαραγωγή
$CAP_{i,k,t}$	Εγκατεστημένη ισχύς τεχνολογίας k για ηλεκτροπαραγωγή
$disp_{k,d,t}$	Σειρά χρησιμοποίησης (dispatching) τεχνολογίας k για ηλεκτροπαραγωγή
$\pi_{k,t}$	Ικανοποίηση καμπύλης διάρκειας φορτίου
$cl_{c,t}$	Μέση εγκατεστημένη ισχύς του συμπλέγματος c

Παράμετροι:

$\alpha_{i,t}$	Σταθερή τάση (ενεργειακή αποδοτικότητα)
$\beta_{i,t}$	Ελαστικότητα ζήτησης ενέργειας προς οικονομικό δείκτη
$\gamma_{i,t}$	Ελαστικότητα ζήτησης ενέργειας προς τιμή ενέργειας
$h_{k,t}$	Παράγοντας ρύθμισης της πρόωρης αποξήλωσης
$\varepsilon_{i,k}$	Τοκοχρεολύσιο (συντελεστής ανάκτησης κεφαλαίου)
$mn_{i,k}$	Ετήσιο κόστος συντήρησης
$in_{i,k}$	Ετήσιες ασφαλιστικές εισφορές
$ow_{i,k}$	Φόροι
$vom_{i,k}$	Μεταβλητό κόστος της τεχνολογίας k
$\delta_{i,k}$	Επιτόκιο αναγωγής (προεξοφλητικό)
$lft_{i,k}$	Οικονομική διάρκεια επένδυσης
$fp_{k,i,t}$	Τιμή ενέργειας ανά καύσιμο και τομέα κατανάλωσης
$eff_{k,t}$	Τεχνική απόδοση τεχνολογίας k
$ur_{k,t}$	Βαθμός χρησιμοποίησης της τεχνολογίας k
$w_{k,i,t}$	Συντελεστής «ωριμότητας» της τεχνολογίας k
$\eta_{i,t}$	Βαθμός ευαισθησίας επιλογής ως προς κόστος
M_t	Φορτίο αιχμής
B_t	Φορτίο βάσης
λ_t	Συντελεστής φορτίου
$\nu_{k,d,t}$	Συντελεστής χρήσης της τεχνολογίας k στην καμπύλη διάρκειας φορτίου
ytf_{oil}_t	Ανεξερεύνητα παγκόσμια κοιτάσματα πετρελαίου
ytf_{gas}_t	Ανεξερεύνητα παγκόσμια κοιτάσματα φυσικού αερίου
$\rho_{k,t}$	Παράμετρος εκμάθησης μέσω εμπειρίας
$\sigma_{k,t}$	Παράμετρος εκμάθησης μέσω επενδύσεων σε R&D
$x_{k,c}$	Στάθμιση τεχνολογίας k σε σύμπλεγμα c
$r_{k,c}$	Σημασία συστατικού που ανήκει σε σύμπλεγμα c για την τεχνολογία k

3.4 Ο μηχανισμός υποκατάστασης

Η υποκατάσταση μεταξύ διαφορετικών καυσίμων ή/και τεχνολογικών επιλογών στον ΠΡΟΜΗΘΕΑ διαμορφώνεται μέσω ενός μηχανισμού που είναι παρόμοιος τόσο για την τελική ζήτηση (για τους τομείς της βιομηχανίας, των νοικοκυριών και των μεταφορών) και την προσφορά ενέργειας (παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και την παραγωγή υδρογόνου που παρουσιάζονται στις ενότητες 3.5 και 3.6 αντίστοιχα). Ως εκ τούτου, ο αναλυτικός μηχανισμός υποκατάστασης παρουσιάζεται στην παρούσα ενότητα, καθώς ισχύει για τους τομείς της τελικής ζήτησης ενέργειας; ένας παρόμοιος μαθηματικός μηχανισμός εφαρμόζεται για να καθορίσει τον βέλτιστο συνδυασμό των τεχνολογιών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Κεντρικό ρόλο σε αυτόν τον μηχανισμό παίζει η έννοια του “κενού-gap” το οποίο ορίζεται για κάθε έτος ως η διαφορά μεταξύ της ζήτησης ενέργειας και της ποσότητας ενέργειας που μπορεί

να ικανοποιηθεί με τον υπάρχοντα εξοπλισμό/απόθεμα τεχνολογιών⁸. Η γενική μαθηματική διατύπωση για το «gar» στην ζήτηση είναι:

$$G_{i,t} = D_{i,t} - CAP_{i,t} \quad (2)$$

Στην παραπάνω εξίσωση, η μεταβλητή $CAP_{i,t}$ αναπαριστά την συνολική ικανότητα παραγωγής ενέργειας από τον υφιστάμενο εξοπλισμό σε κάθε υποτομέα i ο οποίος έχει εγκατασταθεί μέχρι τον χρόνο $t-1$ και δεν έχει αφαιρεθεί τον χρόνο t :

$$CAP_{i,t} = \sum_k (1 - SC_{i,k,t}) * DEM_{i,k,t-1} \quad (3)$$

Στην εξίσωση (3), η άθροιση περιέχει όλες τις ανταγωνιστικές τεχνολογίες k , η μεταβλητή $DEM_{i,k,t}$ αναπαριστά την ζήτηση ενέργειας που ικανοποιείται από την τεχνολογία k τον χρόνο t και η μεταβλητή $SC_{i,k,t}$ είναι το συνολικό ποσοστό “scrapping” της τεχνολογίας k , το οποίο συμπεριλαμβάνει το φυσιολογικό scrapping, όταν ο ενεργειακός εξοπλισμός (που περιλαμβάνει συσκευές των νοικοκυριών, ιδιωτικά αυτοκίνητα, εργοστάσια παραγωγής ηλεκτρισμού κλπ.) φτάσει στο τέλος της διάρκειας ζωής του, και το πρόωρο scrapping, το οποίο προκαλείται από αυξήσεις στα μεταβλητά κόστη και στα κόστη καυσίμου και άνθρακα που καθιστούν τη συνέχιση της λειτουργίας του ενεργειακού εξοπλισμού μη βιώσιμη οικονομικά. Η συμπερίληψη της συγκεκριμένης μορφής scrapping είναι σημαντική προκειμένου να επιτευχθεί η μοντελοποίηση του γρήγορου τεχνολογικού μετασχηματισμού σε περίπτωση ισχυρής δράσης κατά της κλιματικής αλλαγής ή ταχείας αύξησης των διεθνών τιμών των ορυκτών καυσίμων. Σε αυτές τις περιπτώσεις, η ανανέωση του στοκ/αποθέματος των ενεργειακών τεχνολογιών επιταχύνεται (ανανέωση του κεφαλαιουχικού εξοπλισμού), ενώ παράλληλα η αντίδραση των καταναλωτών σε αλλαγές του ενεργειακού κόστους γίνονται πιο άμεσες. Η γενική αλγεβρική διατύπωση για το ποσοστό πρόωρης καταστροφής-scrapping στο μοντέλο είναι⁹:

$$PSC_{k,t} = 1 - \frac{VC_{k,t}^{-\gamma_t}}{h_{k,t} * \sum_{j \neq k} (C_{j,t}^{-\gamma_t}) + VC_{k,t}^{-\gamma_t}} \quad (4)$$

Όπου η μεταβλητή $prescr_{k,t}$ συμβολίζει το ποσοστό πρόωρης αντικατάστασης της ενεργειακής τεχνολογίας k , το $VC_{k,t}$ αναπαριστά το μεταβλητό κόστος λειτουργίας και συντήρησης (το οποίο περιλαμβάνει και το κόστος καυσίμου) της τεχνολογίας k και η μεταβλητή $C_{j,t}$ είναι το συνολικό κόστος χρησιμοποίησης της τεχνολογίας j το οποίο συμπεριλαμβάνει το κεφαλαιουχικό και το μεταβλητό κόστος (ο δείκτης j αναπαριστά το σύνολο των ανταγωνιστικών τεχνολογιών σε έναν τομέα i συμπεριλαμβανομένης

⁸ Αν το gar είναι αρνητικό, κανένας ανταγωνισμός δεν λαμβάνει χώρα στο μοντέλο για την συγκεκριμένη χρονική περίοδο.

⁹ Στις εξισώσεις (4)-(6) ο δείκτης που αναπαριστά τον τομέα i παραλείπεται για λόγους αναγνωσιμότητας.

της τεχνολογίας k). Ο παράγοντας $h_{k,t}$ είναι στοχαστικός και χρησιμοποιείται για σκοπούς «ρύθμισης», ενώ η ελαστικότητα γ_t (η οποία είναι επίσης στοχαστική) είναι ένα μέτρο της ευαισθησίας των επενδυτικών αποφάσεων σε σχέση με την μεταβολή του κόστους των τεχνολογιών.

Στις περισσότερες περιπτώσεις, η ενεργειακή ζήτηση δεν μειώνεται με ταχύτερο ρυθμό από το συνολικό «scrapping» και συνεπώς το “κενό-gap” είναι θετικό. Ο ανταγωνισμός μεταξύ των τεχνολογιών για να καλύψουν την αυξανόμενη ενεργειακή ζήτηση αναπαρίσταται σε όρους ποσοστών των ανταγωνιστικών επιλογών στο gap. Στις πολύ σπάνιες περιπτώσεις που το τελευταίο είναι αρνητικό (κυρίως σε σενάρια ιδιαίτερα αυστηρής δράσης για την μείωση των εκπομπών άνθρακα που οδηγούν σε μείωση της κατανάλωσης ενέργειας), δεν λαμβάνει χώρα ανταγωνισμός μεταξύ των τεχνολογιών. Η κατανομή των καινούργιων επενδύσεων αναπαρίσταται με μια συνάρτηση ψευδο-ελαχιστοποίησης του συνολικού κόστους και καθορίζεται από το συνολικό κόστος των ανταγωνιστικών τεχνολογιών.

Η τιμολογιακή πολιτική με βάση το μέσο εκτιμώμενο κόστος (*levelised costs*) της κάθε τεχνολογικής επιλογής για ένα μεγάλο χρονικό διάστημα αποτελεί μια ορθολογική πολιτική, ιδιαίτερα στα αρχικά στάδια της επένδυσης, η οποία αποτελεί ένα χρήσιμο μέτρο για την σύγκριση εναλλακτικών επενδύσεων σε τεχνολογίες παραγωγής ηλεκτρισμού ή υποδομές υψηλής έντασης κεφαλαίου (Fane et al., 2007 [200]). Το μέσο εκτιμώμενο κόστος αναπαριστά το ύψος της τιμολόγησης που πρέπει να εφαρμοστεί έτσι ώστε ο επενδυτής να ανακτήσει το αρχικό του κεφάλαιο μέχρι το τέλος της οικονομικής ζωής της επένδυσης. Σε γενική μορφή, το μέσο εκτιμώμενο κόστος υπολογίζεται με βάση την παρακάτω σχέση:

$$\text{Μέσο εκτιμώμενο κόστος} = \frac{I_0 + \sum_{t=1}^T \gamma^t \cdot AC_t}{\sum_{t=1}^T \gamma^t \cdot Q_t}$$

$$\varepsilon = 1/(1 + \delta)$$

όπου I_0 είναι το ύψος της αρχικής επένδυσης, ο όρος AC_t ορίζει το ετήσιο κόστος της επένδυσης, ενώ ο όρος Q_t αναπαριστά τον ετήσιο όγκο των πωλήσεων. Ο παράγοντας γ αποτελεί τον όρο αναγωγής των παραπάνω μεγεθών σε παρούσα αξία λαμβάνοντας υπόψη το επιτόκιο αναγωγής δ του επενδυτή.

Το συνολικό κόστος της τεχνολογίας k την χρονική περίοδο t καθορίζεται τόσο από τα σταθερά όσο και από τα μεταβλητά κόστη. Η μεταβλητή $cc_{k,t}$ αναπαριστά το ύψος της αρχικής επένδυσης (ή κόστος αγοράς) ανά τεχνολογία, ενώ lft_k είναι η διάρκεια ζωής της τεχνολογίας k και η παράμετρος δ το ετήσιο προεξοφλητικό επιτόκιο. Ο παράγοντας $\gamma_{k,t}$ ορίζει τον συντελεστή ανάκτησης κεφαλαίου ή το τοκοχρεολύσιο για τη μετατροπή του κόστους αγοράς σε ετήσιες ισοδύναμες ράντες διάρκειας n ετών. Ο παράγοντας του τοκοχρεολυσίου είναι δυνατό να διαφοροποιηθεί ανά τεχνολογική επιλογή και τομέα του ενεργειακού συστήματος.

$$\varepsilon_{i,k} = \frac{\delta_{i,k}(1 + \delta_{i,k})^{lft_k}}{(1 + \delta_{i,k})^{lft_i} - 1} \quad (5)$$

Το συνολικό μέσο εκτιμώμενο κόστος μιας τεχνολογικής επιλογής εκτός από τις δαπάνες για την αγορά κεφαλαιουχικού εξοπλισμού εμπεριέχει και τα ετήσια πάγια έξοδα $fc_{k,t}$, τα οποία περιλαμβάνουν το ετήσιο κόστος συντήρησης $mn_{i,k}$, ετήσιες ασφαλιστικές εισφορές $in_{i,k}$ και τους φόρους $ow_{i,k}$.

$$fc_{i,k} = mn_{i,k} + in_{i,k} + ow_{i,k} \quad (6)$$

Το μεταβλητό κόστος κάθε τεχνολογίας $VC_{k,t}$ αποτελείται από δυο κυρίως μέρη: (α) $vom_{k,t}$ που αναφέρεται στο μεταβλητό κόστος λειτουργίας και συντήρησης (β) το κόστος του αντίστοιχου καυσίμου, δηλαδή η τιμή για τον τελικό καταναλωτή $fp_{k,t}$ προς τον βαθμό της τεχνικής απόδοσης $eff_{k,t}$

$$vc_{k,t} = vom_{k,t} + \frac{fp_{k,t}}{eff_{k,t}} \quad (7)$$

Τελικά, το μέσο κόστος της τεχνολογίας k αποτελείται από το ετησιοποιημένο κόστος επένδυσης, τα ετήσια πάγια έξοδα και τα μεταβλητά κόστη λειτουργίας

$$C_{k,t} = \frac{\varepsilon_{k,t} * cc_{k,t} + fc_{k,t}}{ur_{k,t}} + vc_{i,k} \quad (8)$$

Όπου η μεταβλητή $ur_{k,t}$ αντιπροσωπεύει τον βαθμό χρησιμοποίησης της κάθε τεχνολογίας. Το προεξοφλητικό επιτόκιο είναι διαφορετικό ανά τομέα και είναι συνάρτηση του μακροχρόνιου επιτοκίου. Το προεξοφλητικό επιτόκιο επηρεάζει ιδιαίτερα το κόστος των τεχνολογιών και συνεπώς τον ανταγωνισμό τους καθώς μια σχετικά υψηλή τιμή θα τείνει να ευνοεί τις τεχνολογίες με χαμηλά κεφαλαιουχικά κόστη (εκτενής ανάλυση για το προεξοφλητικό επιτόκιο γίνεται σε επόμενη ενότητα).

Τα κόστη κεφαλαίου, τα σταθερά και μεταβλητά κόστη λειτουργίας καθώς και ο βαθμός απόδοσης κάθε τεχνολογίας υπολογίζονται στο μοντέλο της τεχνικής προόδου με βάση τις παγκόσμιες επενδύσεις σε R&D και την ανάπτυξη/εφαρμογή των τεχνολογιών σε όλες τις περιοχές του μοντέλου. Η ενδογενής τεχνολογική πρόοδος οδηγεί σε βελτίωση των οικονομικών και τεχνικών χαρακτηριστικών των τεχνολογιών μέσω των καμπυλών μάθησης.

Το ποσοστό κάθε τεχνολογίας k στο «κενό» για το έτος t υπολογίζεται με βάση τον παρακάτω τύπο (για αναλυτική παρουσίαση δες ενότητα 3.10.2):

$$sh_{k,t} = \frac{w_{k,t} * c_{k,t}^{-\eta_t}}{\sum_k w_{k,t} * c_{k,t}^{-\eta_t}} \quad (9)$$

Η εξίσωση (9) καθορίζει το μερίδιο αγοράς της τεχνολογίας k στο «gap» με βάση το συνολικό της κόστος $c_{k,t}$. Στην εξίσωση (9), οι στοχαστικές παράμετροι η_t αντιπροσωπεύουν τον βαθμό ευαισθησίας του ποσοστού της τεχνολογίας $sh_{k,t}$ ως προς το συνολικό κόστος της τεχνολογίας, ενώ οι στοχαστικοί παράγοντες/ βάρη $w_{k,t}$ αντανakλούν τον σχετικό παράγοντα «ωριμότητας» κάθε τεχνολογίας από την άποψη τόσο της τεχνολογικής ωριμότητας όσο και της προθυμίας και ετοιμότητας των ενεργειακών καταναλωτών να την υιοθετήσουν. Τα μερίδια των επιλογών στο “gap” καθορίζουν τις ετήσιες επενδύσεις σε νέες ενεργειακές τεχνολογίες k ($INV_{i,k,t}$) για κάθε τομέα του ενεργειακού συστήματος i (οχήματα, εργοστάσια ηλεκτροπαραγωγής κ.α.).

$$INV_{i,k,t} = Sh_{i,k,t} \cdot G_{i,t} \quad (10)$$

Οι παράγοντες $w_{k,t}$ διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στην αναπαράσταση της διαδικασίας διάχυσης των νέων τεχνολογιών στις περιοχές. Ο βαθμός διείσδυσης των τεχνολογιών στις διάφορες περιοχές του ΠΡΟΜΗΘΕΑ εξαρτάται από το συνολικό κόστος (το οποίο είναι στενά διασυνδεδεμένο μεταξύ των περιοχών). Επίσης, πέρα από οικονομικούς παράγοντες (κόστος, απόδοση, τιμή χρησιμοποιούμενου καυσίμου) η τεχνολογική διάχυση επηρεάζεται επίσης από μια σειρά από άλλους παράγοντες, που συμπεριλαμβάνουν τον μιμητισμό των καταναλωτών, τη διάχυση της πληροφορίας, το διεθνές εμπόριο, την ανάπτυξη αναγκαίων υποδομών και των αποτελεσμάτων δικτύου (“network effects”). Στον ΠΡΟΜΗΘΕΑ οι συντελεστές ωριμότητας ακολουθούν μια στοχαστική πορεία/τάση, η οποία καθορίζεται από μια παγκόσμια συνιστώσα και μια ανεξάρτητη συνιστώσα ανά περιοχή. Η ωριμότητα των τεχνολογιών που ανήκουν σε συστάδες τεχνολογιών (“technological clusters”) εμφανίζουν επίσης στατιστική εξάρτηση από άλλες τεχνολογίες που ανήκουν στην ίδια συστάδα. Αξιοσημείωτες περιπτώσεις όπου ισχύει το παραπάνω είναι:

- Τα ηλεκτρικά και τα plug-in υβριδικά επιβατικά αυτοκίνητα
- Οι διαφορετικές τεχνολογίες κυψελών καυσίμου που χρησιμοποιούνται για να καλύψουν την ενεργειακή ζήτηση στις επιβατικές μεταφορές καθώς και στους βιομηχανικούς και οικιακούς τομείς
- Στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, η αποδοχή της υπόγειας αποθήκευσης του διοξειδίου του άνθρακα επηρεάζει τη διείσδυση των εναλλακτικών τεχνολογιών CCS οι οποίες κατά τα άλλα είναι διαφορετικές (οι τεχνολογίες oxyfuel, pre-combustion and post-combustion)

Σε δύο περιπτώσεις, η στοχαστική εξάρτηση που μοντελοποιήθηκε πήγε ένα βήμα παραπέρα προκειμένου να αναλύσει πιθανολογικά τις προοπτικές ενός ριζικού μετασχηματισμού του παγκόσμιου ενεργειακού συστήματος. Οι δυο περιπτώσεις είναι:

- Ο μετασχηματισμός προς ένα εξ-ηλεκτρισμένο παγκόσμιο πρότυπο με εκτεταμένη διείσδυση της ηλεκτρικής ενέργειας στους τομείς της βιομηχανίας, της θέρμανσης στα νοικοκυριά και κυρίως των οδικών μεταφορών. Η τελευταία συνοδεύεται από εκτεταμένη ανάπτυξη του συστήματος μεταφοράς και διανομής ηλεκτρισμού και

των υποδομών επαναφόρτισης μπαταριών παράλληλα με σημαντική βελτίωση των τεχνολογικών και οικονομικών χαρακτηριστικών των μπαταριών

- Μετάβαση σε ένα ενεργειακό σύστημα με βάση το υδρογόνο (χρήση για μεταφορές καθώς και για σταθερές ενεργειακές χρήσεις), το οποίο περιλαμβάνει την ανάπτυξη ενός ξεχωριστού συστήματος παραγωγής, διανομής και χρήσης υδρογόνου.

Για τις δύο αυτές συγκεκριμένες περιπτώσεις, εκτός από τη στοχαστική εξάρτηση που χαρακτηρίζει τα τεχνολογικά clusters, χρησιμοποιήθηκαν λογιστικές (logistic) καμπύλες διείσδυσης. Οι καμπύλες αυτές προσομοιώνουν τα φαινόμενα «απογείωσης» και «κορεσμού», τα οποία εξαρτώνται από μη-ντετερμινιστικά (στοχαστικά) κατώφλια που επιτυγχάνονται από τις αντίστοιχες τεχνολογίες τόσο σε παγκόσμιο επίπεδο όσο και σε επίπεδο περιοχής (π.χ. μερίδιο των ηλεκτρικών αυτοκινήτων στον παγκόσμιο στόλο οχημάτων, ποσοστό τελικής ζήτησης ενέργειας που καλύπτεται από ηλεκτρισμό ή υδρογόνο).

Ο λεπτομερής προσδιορισμός της στοχαστικής εξάρτησης στην διαδικασία της τεχνολογικής διάχυσης επιτρέπει την καλύτερη και πιο ρεαλιστική απεικόνιση της κατανομής της διείσδυσης των ίδιων των τεχνολογιών στο ενεργειακό μίγμα, αλλά επίσης συμβάλλει στην πιο αξιόπιστη αναπαράσταση της πιθανοτικής κατανομής μιας σειράς άλλων μεταβλητών (ενεργειακή ζήτηση, εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα, παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας), οι οποίες επηρεάζονται από την στατιστική εξάρτηση των διαφόρων παραγόντων που τις καθορίζουν ή τις συναποτελούν.

3.5 Παραγωγή ηλεκτρισμού

Ο ΠΡΟΜΗΘΕΑΣ περιέχει ένα αρκετά αναλυτικό μοντέλο για την αναπαράσταση του συστήματος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας σε κάθε περιοχή με την μεγαλύτερη δυνατή ακρίβεια. Η γενική μέθοδος που χρησιμοποιείται είναι παρόμοια με τα παγκόσμια ντετερμινιστικά μοντέλα του ενεργειακού συστήματος [37] και [39].

Η συνολική παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας καθορίζεται από την τελική ζήτηση ηλεκτρισμού στη βιομηχανία, στα νοικοκυριά, στις υπηρεσίες και στις μεταφορές (ηλεκτρικά αυτοκίνητα και σιδηρόδρομοι), την ιδιο-κατανάλωση των σταθμών παραγωγής ηλεκτρισμού και από τις απώλειες μεταφοράς και διανομής φορτίου στο δίκτυο. Οι τελευταίες υπολογίζονται με βάση εκτιμημένες εξισώσεις για κάθε περιοχή του ΠΡΟΜΗΘΕΑ και το μοντέλο υποθέτει μείωση του ποσοστού των απωλειών στις αναπτυσσόμενες χώρες σε σχέση με τα σημερινά τους επίπεδα (τα οποία είναι πολύ υψηλά κυρίως σε περιοχές όπως η Μέση Ανατολή, η Βόρειος Αφρική και η Ρωσία) εξαιτίας της συνεχούς βελτίωσης του δικτύου μεταφοράς και διανομής. Σε όλες τις μελέτες τάσεων του ενεργειακού συστήματος, η παγκόσμια ζήτηση ηλεκτρισμού προβλέπεται να αυξηθεί σημαντικά, ενώ το ποσοστό της τελικής ζήτησης ενέργειας που καλύπτεται από ηλεκτρισμό αυξάνεται, εξαιτίας της:

- Μεγάλης διείσδυσης των ηλεκτρικών βιομηχανικών διεργασιών (σε βάρος των ορυκτών καυσίμων) και αυξημένης ζήτησης για συγκεκριμένες εφαρμογές που απαιτούν ηλεκτρική ενέργεια στην βιομηχανία, όπως οι ηλεκτρικοί κινητήρες
- Ταχείας διείσδυσης των ηλεκτρικών συσκευών στα νοικοκυριά, π.χ. κλιματιστικά, ψυγεία, καταψύκτες, πλυντήρια, τηλεοράσεις και μια ποικιλία συσκευών, οι οποίες στις αναπτυσσόμενες χώρες απέχουν πολύ από το να φτάσουν στα επίπεδα κορεσμού
- Σταδιακή διείσδυση των ηλεκτρικών και των plug-in υβριδικών αυτοκινήτων στον τομέα των επιβατικών μεταφορών (κυρίως μετά το 2030)
- Οι κλιματικές πολιτικές οδηγούν σε υποκατάσταση της καύσης υδρογονανθράκων από ηλεκτρική ενέργεια, η οποία έχει καλύτερη ενεργειακή απόδοση και δεν παράγει διοξείδιο του άνθρακα στο σημείο της τελικής κατανάλωσης. Έτσι, ο ηλεκτρισμός (δεδομένου ότι αυξάνεται συνεχώς το μερίδιο των τεχνολογιών χαμηλού άνθρακα στην ηλεκτροπαραγωγή) παρέχει έναν τρόπο μείωσης των εκπομπών σε τομείς που είναι σχετικά μη ευέλικτοι στις υποκαταστάσεις μεταξύ ενεργειακών μορφών και συνεπώς στην μείωση εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα.

Είκοσι οκτώ τεχνολογίες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας ανταγωνίζονται για να ικανοποιήσουν τις συνολικές ανάγκες σε ηλεκτρισμό (Πίνακας 3-2):

- Τεχνολογίες καύσης άνθρακα: συμβατικός θερμικός σταθμός (χρησιμοποιεί άνθρακα ή λιγνίτη), θερμικός σταθμός στον οποίον γίνεται καύση σε υπερ-κριτική θερμοκρασία (supercritical pulverized coal) και σταθμός ολοκληρωμένης αεριοποίησης άνθρακα (Integrated Coal Gasification)
- Τεχνολογίες πετρελαίου: θερμικός σταθμός πετρελαίου και ντιζελογεννήτριες που χρησιμοποιούνται για την κάλυψη φορτίου αιχμής
- Τεχνολογίες φυσικού αερίου: θερμικός σταθμός φυσικού αερίου, αεριοστρόβιλος ανοικτού κύκλου, σταθμός φυσικού αερίου συνδυασμένου κύκλου
- Πυρηνικοί σταθμοί: το μοντέλο διακρίνει μεταξύ υπαρχόντων τεχνολογιών (πυρηνικοί αντιδραστήρες 2^{ης} και 3^{ης} γενιάς) και πυρηνικών σταθμών 4^{ης} γενιάς (οι οποίοι προβλέπεται να είναι εμπορικά διαθέσιμοι μετά το 2040)
- Υδροηλεκτρικοί σταθμοί
- Τεχνολογίες βιομάζας: θερμικός σταθμός βιομάζας και αεριοποίηση βιομάζας (με ή χωρίς CCS)
- Αιολική ενέργεια: αιολικά πάρκα (συστάδες ανεμογεννητριών) στην στεριά ή υπεράκτια-offshore
- Ηλιακή ενέργεια: φωτοβολταϊκά πάνελ και εργοστάσια με συγκεντρωμένη ηλιακή ενέργεια (θερμικά ηλιακά)
- Κυψέλες καυσίμου, που χρησιμοποιούν ως καύσιμο υδρογόνο ή φυσικό αέριο
- Συνδυασμένη παραγωγή ηλεκτρισμού και θερμότητας με φυσικό αέριο

Τεχνολογίες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας			
1	Συμβατικός σταθμός άνθρακα (CCT)	14	Πυρηνικός σταθμός 2ης/3ης γενιάς (NUC)
2	Συμβατικός σταθμός λιγνίτη (LCT)	15	Πυρηνικός σταθμός 4ης γενιάς (NND)
3	Άνθρακας σε υπερκριτική θερμοκρασία (PFC)	16	Μεγάλα υδροηλεκτρικά (HYD)
4	Ολοκληρωμένη αεριοποίηση άνθρακα (IGCC)	17	Μικρά υδροηλεκτρικά (SHY)
5	Συμβατικός σταθμός φυσικού αερίου (GCT)	18	Αιολικά πάρκα στην στεριά (WND)
6	Αεριοστρόβιλος ανοικτού κύκλου (GGT)	19	Υπεράκτια αιολικά πάρκα (WNO)
7	Σταθμός συνδυασμένου κύκλου με φυσικό αέριο (GGC)	20	Φωτοβολταικά (DPV)
8	Συνδυασμένη παραγωγή ηλεκτρισμού και θερμότητας (CHP)	21	Θερμικά ηλιακά (SPP)
9	Συμβατικός σταθμός πετρελαίου (OCT)	22	Συμβατικός σταθμός βιομάζας (BF2)
10	Αεριοστρόβιλος ανοικτού κύκλου (OGC)	23	Αεριοποίηση βιομάζας (BGT)
11	Άνθρακας σε υπερκριτική θερμοκρασία με CCS (PSS)	24	Αεριοποίηση βιομάζας με CCS (BGS)
12	Ολοκληρωμένη αεριοποίηση άνθρακα με CCS (ICS)	25	Κυψέλες καυσίμου με υδρογόνο (HFC)
13	Συνδυασμένος κύκλος με φυσικό αέριο και CCS (GGS)	26	Κυψέλες καυσίμου με φυσικό αέριο (GFC)

Πίνακας 3-2: Επισκόπηση των τεχνολογιών παραγωγής ηλεκτρισμού του μοντέλου

Στο μοντέλο γίνεται η υπόθεση ότι οι τεχνολογίες χάνουν ένα μέρος της παραγωγής τους ετησίως όχι μόνο λόγω παλαιότητας (τέλος της διάρκειας ζωής τους), αλλά και λόγω της οικονομικά ασύμφορης χρήσης τους. Αυτός ο μηχανισμός αποκαλείται *'pre-mature replacement'*, καθώς «καταστρέφεται» κομμάτι της παραγωγής χωρίς να υπάρχει λόγος παλαιότητας, αλλά για οικονομικούς λόγους (εξίσωση 4).

Η αποξήλωση και ο ανταγωνισμός μεταξύ των εναλλακτικών τεχνολογιών για τις νέες επενδύσεις στην ηλεκτροπαραγωγή ακολουθούν το υπόδειγμα όπως περιεγράφηκε στην προηγούμενη ενότητα. Οι συνολικές επενδύσεις σε εγκατεστημένη ισχύ σε κάθε περιοχή καθορίζονται από την εξέλιξη της ζήτησης ηλεκτρισμού, το «scraping» των εργοστασίων, τα ήδη υιοθετημένα σχέδια για την αποξήλωση των παλαιών και μη αποδοτικών μονάδων, τις επενδύσεις που έχουν ήδη αποφασιστεί σε συγκεκριμένες μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας μέχρι την περίοδο 2015-2016, κυρίως όσον αφορά τους σταθμούς πυρηνικής ενέργειας και τις ΑΠΕ (όπως προκύπτουν από ενδελεχή βιβλιογραφική ανάλυση και επεξεργασία δεδομένων), και το περιθώριο ασφάλειας του ηλεκτρικού συστήματος.

Η κατανομή της συνολικής επένδυσης στις επιμέρους τεχνολογίες παραγωγής ηλεκτρισμού καθορίζεται από το συνολικό κόστος τους, το οποίο περιέχει το κόστος

κεφαλαίου (ετησιοποιημένο με προεξοφλητικό επιτόκιο 9%), το σταθερό και μεταβλητό κόστος λειτουργίας, το κόστος καυσίμου και το πιθανό κόστος εκπομπών άνθρακα. Το μοντέλο επίσης περιλαμβάνει επιπρόσθετα κόστη για την ενσωμάτωση των ΑΠΕ διακοπτόμενης ισχύος (ανεμογεννήτριες και φωτοβολταϊκά) στο δίκτυο παροχής και κόστη για την δέσμευση και την υπόγεια αποθήκευση του διοξειδίου του άνθρακα από τις τεχνολογίες CCS. Τέλος, εξαιτίας της μεγάλης διάρκειας που απαιτείται για την αδειοδότηση και την κατασκευή των πυρηνικών σταθμών σε συνδυασμό με το γεγονός ότι η κατασκευή τους συνήθως αποτελεί προϊόν πολιτικών αποφάσεων και εγείρει περιβαλλοντικές ανησυχίες στην κοινή γνώμη, οι επενδύσεις στην πυρηνική ενέργεια καθορίζονται εξωγενώς μέχρι το 2025.

Οι επενδύσεις στις τεχνολογίες ΑΠΕ εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από το κόστος κεφαλαίου. Από την άλλη πλευρά, οι τεχνολογίες ΑΠΕ χαρακτηρίζονται από περιορισμούς ως προς το δυναμικό τους, οι οποίοι λαμβάνονται υπόψη στο μοντέλο (εξίσωση 7) με την μορφή γνησίως αυξουσών καμπυλών κόστους-παραγωγής που χρησιμοποιούνται σαν περιορισμός στην εκτεταμένη διείσδυση των ΑΠΕ στην ηλεκτροπαραγωγή. Καθώς η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από μια τεχνολογία προσεγγίζει το μέγιστο τεχνικό δυναμικό, οι διαθέσιμες τοποθεσίες για χωροθέτηση των ΑΠΕ σταδιακά εξαντλούνται και συνεπώς οι νέες μονάδες κατασκευάζονται σε περιοχές με όλο και χαμηλότερα ποσοστά διαθεσιμότητας (και συνεπώς μεγαλύτερο κόστος παραγωγής ηλεκτρισμού). Αυτό οδηγεί σε καμπύλη προσφοράς όπου το κόστος αυξάνει μη-γραμμικά με τη σταδιακή εξάντληση του δυναμικού των ΑΠΕ σε κάθε περιοχή. Για τον καθορισμό των καμπυλών, εκτεταμένη βιβλιογραφική ανασκόπηση χρησιμοποιήθηκε (Hoogwijk, 2004 [90], Ackermann et al., 2001 [91], Bartle 2002, [92], De Vries et al., 2006 [93], Hoogwijk et al., 2004 [94]). Για τις καμπύλες κόστους-παραγωγής των τεχνολογιών βιομάζας, ο ΠΡΟΜΗΘΕΑΣ ενσωματώνει τεχνικές και οικονομικές εκτιμήσεις για το δυναμικό της βιομάζας (Fischer and Schrattenholzer 2001 [95], Yamamoto et al. 2001 [96], Parikka 2004 [97], Moreira 2006 [98])

Για την μοντελοποίηση του μηχανισμού χρησιμοποιήθηκε μια λογιστική συνάρτηση (*logistic function*), η οποία αναπαριστά τον δείκτη διαθεσιμότητας των νέων επενδύσεων σε ΑΠΕ ($util_{j,t}$) σαν συνάρτηση της ηλεκτροπαραγωγής από την συγκεκριμένη τεχνολογία ($prod_{j,t}$) με βάση την παρακάτω εξίσωση:

$$util_{j,t} = \left(\frac{1}{1 + e^{-\beta + \alpha \cdot prod_{j,t-1}}} + \varepsilon_t \right) * u_{j,t} \quad (11)$$

Όπου η μεταβλητή $u_{j,t}$ παριστάνει το θεωρητικό τεχνικό μέγιστο του συντελεστή διαθεσιμότητας της τεχνολογίας j , $util_{j,t}$ είναι η πραγματική διαθεσιμότητα της τεχνολογίας καθώς η παραγωγή της $prod_{j,t}$ αυξάνεται, οι παράμετροι α and β έχουν εκτιμηθεί για κάθε περιοχή του ΠΡΟΜΗΘΕΑ χρησιμοποιώντας δεδομένα από την διεθνή βιβλιογραφία ([90-98]) και το ε_t είναι ο όρος σφάλματος της εξίσωσης.

Η προέλευση ανά τομέα της ζήτησης ηλεκτρισμού χρησιμοποιείται για να κατασκευαστεί η ετήσια καμπύλη φορτίου, λαμβάνοντας υπόψη ότι οι ενεργοβόροι βιομηχανικοί κλάδοι αποτελούν κυρίως φορτία βάσης, ενώ οι αιχμές του φορτίου

χαρακτηρίζουν την ζήτηση από τα νοικοκυριά. Το μοντέλο χρησιμοποιεί οικονομετρικά εκτιμημένους συντελεστές φορτίου οι οποίοι διαφοροποιούνται ανάλογα με τον τελικό καταναλωτή και την περιοχή. Η χρήση της εγκατεστημένης ισχύος των μονάδων ηλεκτροπαραγωγής σε κάθε χρονική περίοδο (*dispatching of power plants*) είναι ενδογενής στο μοντέλο και καθορίζεται από την ετήσια καμπύλη διάρκειας φορτίου σε συνδυασμό με τα μεταβλητά κόστη λειτουργίας, το κόστος των καυσίμων και την εγκατεστημένη ισχύ των τεχνολογιών (η μέθοδος περιγράφεται πιο αναλυτικά στις μελέτες [99, 84]). Σύμφωνα με την σχετικά απλουστευτική μέθοδο, ο χρόνος χωρίζεται σε εννέα διαστήματα, που συμβολίζονται με τον δείκτη d , $d=0,..,8$. Η ετήσια καμπύλη διάρκειας φορτίου προσεγγίζεται από ένα ορθογώνιο τμήμα το οποίο αντιπροσωπεύει το φορτίο βάσης και ένα εκθετικό τμήμα, που αντιπροσωπεύει τις μικρότερες διάρκειες φορτίου (φορτίο αιχμής και ενδιάμεσα φορτία). Η συνολική παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας για το έτος t προσεγγίζεται ($TOTPROD_t$) χρησιμοποιώντας τον τύπο:

$$TOTPROD_t = \sum_{d=0}^8 [(M_t - B_t) * e^{-\lambda_t * (0.25+d)}] + 9 * B_t \quad (12)$$

Όπου M_t είναι η ζήτηση για το φορτίο αιχμής, B_t είναι η ζήτηση για το φορτίο βάσης και η παράμετρος λ_t υπολογίζεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$\frac{1 - e^{-8.76 * \lambda_t}}{\lambda_t} = \frac{PROD_t - 8.76 * B_t}{M_t - B_t} \quad (13)$$

Όπου η μεταβλητή $PROD_t$ αντιπροσωπεύει την παραγωγή ηλεκτρισμού τον χρόνο t . Ο βαθμός χρησιμοποίησης των διαφόρων τεχνολογιών παραγωγής k σε κάθε χρονική διάστημα d ($d=0,..,8$) υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση:

$$\sum_k CAP_{k,t} * e^{-\frac{\pi_{i,t}}{disp_{k,d,t}}} = (M_t - B_t) e^{-\lambda_t * (0.25+d)} + B_t \quad (14)$$

η οποία για κάθε χρονικό διάστημα d , επιλύεται ως προς $\pi_{i,t}$. Στον παραπάνω ορισμό, το $CAP_{k,t}$ είναι η εγκατεστημένη ισχύς της τεχνολογίας k τον χρόνο t και η μεταβλητή $disp_{k,t}$ είναι μια ενδιάμεση μεταβλητή, η οποία χρησιμοποιείται για να κατατάξει τις τεχνολογίες ηλεκτροπαραγωγής ανάλογα με το μεταβλητό τους κόστους σε κάθε διάστημα d της καμπύλης διάρκειας φορτίου:

$$disp_{j,d,t} = \frac{v_{k,d,t} * VC_{k,t}^{-\gamma}}{\sum_k v_{k,d,t} * VC_{k,t}^{-\gamma}} \quad (15)$$

Όπου η μεταβλητή $VC_{j,t}$ αντιπροσωπεύει τα μεταβλητά λειτουργικά κόστη και τα κόστη καυσίμου, δηλαδή το βραχυχρόνιο οριακό κόστος κάθε τεχνολογίας ηλεκτροπαραγωγής.

Η τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας καθορίζεται σαν συνάρτηση του μέσου μακροχρόνιου οριακού κόστους της ηλεκτροπαραγωγής (σταθμισμένος μέσος του κόστους των τεχνολογιών) και διαφοροποιείται ανά τελικό καταναλωτή (βιομηχανία, νοικοκυριά) αντικατοπτρίζοντας το διαφορετικό κόστος της παροχής ανά τομέα. Οι

διαφορές προκύπτουν κυρίως από το γεγονός ότι εναλλακτικές τεχνολογίες παρέχουν ηλεκτρισμό σε διαφορετικά τμήματα της καμπύλης διάρκειας φορτίου (πχ τα πυρηνικά εργοστάσια καλύπτουν φορτία βάσης, ενώ οι αεριοστρόβιλοι με φυσικό αέριο φορτία αιχμής), αλλά και από τις οικονομίες κλίμακας στη μεταφορά, στη διανομή και στο κόστος του δικτύου στους διαφορετικούς τύπους καταναλωτών.

3.6 Παραγωγή και υποδομές υδρογόνου

Ο ΠΡΟΜΗΘΕΑΣ περιλαμβάνει 18 τεχνολογίες παραγωγής υδρογόνου (H_2), οι οποίες ανταγωνίζονται για την κεντρική παραγωγή του H_2 (Πίνακας 3-3). Το υπομοντέλο του υδρογόνου υπολογίζει τα τελικά κόστη των τεχνολογιών υδρογόνου με βάση τα τεχνικά και οικονομικά χαρακτηριστικά τους, το μερίδιο τους στις νέες επενδύσεις για κάθε χρόνο, το ποσοστό της παραγωγής που αποξηλώνεται, την ετήσια παραγωγή υδρογόνου από κάθε τεχνολογία και τέλος το μέσο κόστος για παραγωγή υδρογόνου, με βάση το κόστος της κάθε τεχνολογίας και το ποσοστό παραγωγής της (σε σχέση με τη συνολική ζήτηση).

Το κόστος παραγωγής υδρογόνου αποτελείται από το ετησιοποιημένο κόστος κεφαλαίου, με τη χρήση στοχαστικού προεξοφλητικού επιτοκίου με μέσο όρο 8%, το σταθερό και μεταβλητό κόστος λειτουργίας και συντήρησης και το κόστος των καυσίμων. Οι τεχνολογίες ανταγωνίζονται για να ικανοποιήσουν τη συνολική ζήτηση υδρογόνου, η οποία αποτελείται από ζήτηση για βιομηχανικές χρήσεις, ζήτηση για οικιακή χρήση και ζήτηση από τις μεταφορές (αυτοκίνητα με κυψέλες καυσίμου ή με κινητήρα εσωτερικής καύσης που χρησιμοποιούν υδρογόνο). Οι επενδύσεις καθορίζονται με βάση το συνολικό κόστος παραγωγής της κάθε τεχνολογίας και ο ανταγωνισμός τους μοντελοποιείται όπως στις εξισώσεις (2)-(6) της ενότητας 3.4. Μια αναλυτική περιγραφή των τεχνικών και οικονομικών χαρακτηριστικών καθώς και της λειτουργίας των τεχνολογιών παραγωγής υδρογόνου δίδεται στην εργασία [100].

Η ενδεχόμενη ανάπτυξη της οικονομίας του υδρογόνου πρέπει να συνοδεύεται από την ανάπτυξη εκτεταμένων υποδομών για την αποθήκευση, μεταφορά και διανομή υδρογόνου. Αναγνωρίζεται ευρέως ότι ένα ενεργειακό σύστημα βασισμένο στο υδρογόνο θα ήταν ιδιαίτερα πολύπλοκο ως προς τις υποδομές και ένας μεγάλος αριθμός πιθανών διαμορφώσεων αυτών των υποδομών είναι δυνατός [100]. Η βάση τεχνολογικών δεδομένων του μοντέλου περιέχει πολλαπλές επιλογές για υγρή και αέρια αποθήκευση και διανομή υδρογόνου (αγωγοί, φορτηγά, πρατήρια καυσίμων), παρέχοντας ευελιξία στην επιλογή των συστατικών μιας μελλοντικής οικονομίας υδρογόνου. Ωστόσο, η πλήρης αναπαράσταση του συστήματος αποθήκευσης, μεταφοράς και διανομής υδρογόνου είναι ιδιαίτερα σύνθετη, δεδομένου ότι δεν είναι δυνατή η εκτεταμένη και οικονομικά αποδοτική ανάπτυξη των υποδομών χωρίς αυξημένη ζήτηση υδρογόνου (δηλαδή τα «*network effects*» διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στην ανάπτυξη των υποδομών).

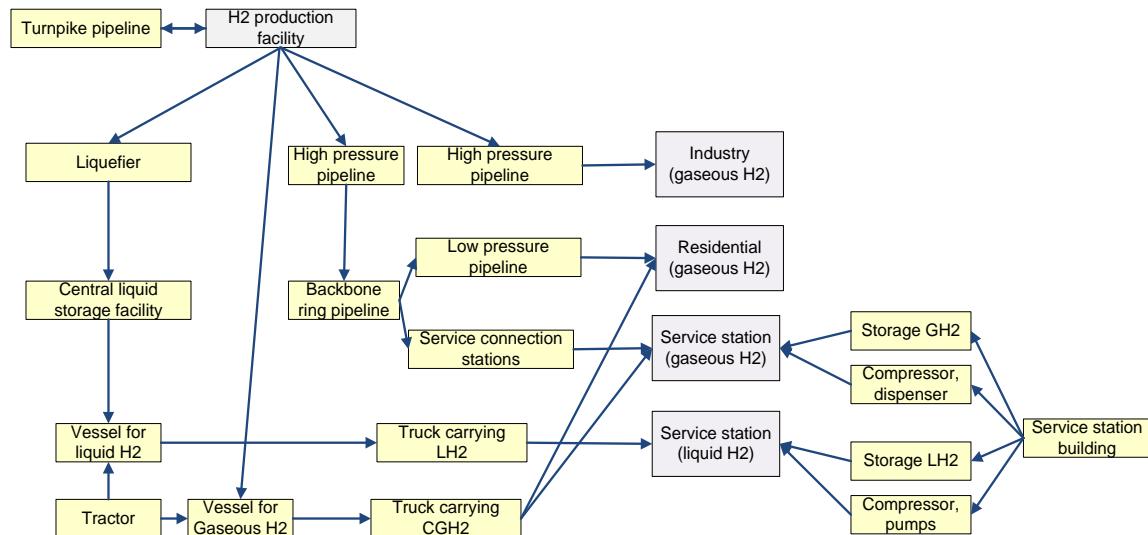
Τεχνολογίες Παραγωγής Υδρογόνου			
1	Ανασχηματισμός ατμού του φυσικού αερίου	10	Αεριοποίηση βιομάζας σε μεγάλη κλίμακα
2	Ανασχηματισμός ατμού του φυσικού αερίου με CCS	11	Αεριοποίηση βιομάζας σε μεγάλη κλίμακα με CCS
3	Ηλιακός ανασχηματισμός του μεθανίου	12	Αεριοποίηση βιομάζας σε μικρή κλίμακα
4	Μερική οξείδωση άνθρακα	13	Πυρόλυση βιομάζας
5	Μερική οξείδωση άνθρακα με CCS	14	Θερμόλυση υψηλής θερμοκρασίας με ηλιακή ενέργεια
6	Αεριοποίηση άνθρακα	15	Θερμόλυση υψηλής θερμοκρασίας με πυρηνική ενέργεια
7	Αεριοποίηση άνθρακα με CCS	16	Ηλεκτρόλυση με χρήση πυρηνικής ενέργειας
8	Μερική οξείδωση πετρελαίου	17	Ηλεκτρόλυση με χρήση αιολικής ενέργειας
9	Μερική οξείδωση πετρελαίου με CCS	18	Ηλεκτρόλυση απευθείας από το ηλεκτρικό δίκτυο

Πίνακας 3-3 Επισκόπηση των τεχνολογιών παραγωγής ηλεκτρισμού του μοντέλου

Προκειμένου να ληφθεί μια έμμεση αίσθηση για τη μελλοντική διαμόρφωση των υποδομών υδρογόνου, ένας συνδυασμός του εφοδιασμού φυσικού αερίου και των δικτύων διανομής για τα προσόντα διυλισμένου πετρελαίου είναι ο κατάλληλος. Από αυτή την άποψη, σωληνώσεις μπορούν να διανεμούν υδρογόνο σε περιοχές υψηλής ζήτησης (π.χ. αστικά κέντρα) και φορτηγά σε περιοχές χαμηλότερης ζήτησης (π.χ. αγροτικές). Το μοντέλο υποθέτει ότι εγκαταστάσεις κεντρικής παραγωγής και διανομής χτίζονται σε αστικές περιοχές. Το υδρογόνο μπορεί να αποθηκευτεί είτε σε αέρια είτε σε υγρή μορφή. Εντούτοις, λαμβάνοντας υπόψη τις υψηλές δαπάνες της παράδοσης υγρού υδρογόνου (που οφείλονται κυρίως στη διαδικασία υγροποίησης), το υγρό υδρογόνο είναι πιθανότερο να χρησιμοποιηθεί σε οχήματα υδρογόνου σε σύγκριση με στατικές εφαρμογές (βιομηχανία, νοικοκυριά).

Η τυποποιημένη διαμόρφωση της οικονομίας του υδρογόνου στον ΠΡΟΜΗΘΕΑ αναφέρεται σε μια "μέση" περιοχή που τροφοδοτείται με υδρογόνο, κατά τη διάρκεια μιας περιόδου σταδιακής απογείωσης της ζήτησης. Η αναπαράσταση του δικτύου των υποδομών ξεκινά με ένα εργοστάσιο παραγωγής υδρογόνου το οποίο συνδέεται με έναν κεντρικό αγωγό (turndown pipeline), ο οποίος χρησιμοποιείται ως μέσο αποθήκευσης, εργαλείο διαχείρισης του φορτίου και ως παροχή επείγουσας ανάγκης σε περιπτώσεις διακοπής της παραγωγής (Γράφημα 3-4). Ο κεντρικός αγωγός διασχίζει την περιοχή και συνδέεται με παρόμοιους κεντρικούς αγωγούς σε γειτονικές περιοχές. Επιπλέον, αγωγοί μικρότερης χωρητικότητας και πίεσης συνδέουν το εργοστάσιο παραγωγής με τις περιοχές υψηλής ζήτησης (αστικές και βιομηχανικές). Το μοντέλο αναγνωρίζει δύο είδη πρατηρίων: αγροτικοί σταθμοί κατά μήκος των δρόμων που διασχίζουν την περιοχή και αστικοί σταθμοί, οι οποίοι συγκεντρώνονται κυρίως στο εξωτερικό δακτύλιο της αστικής περιοχής. Γίνεται η υπόθεση ότι το σύνολο των αγροτικών

σταθμών τροφοδοτείται από φορτηγά που μεταφέρουν υγρό ή αέριο υδρογόνο. Ο ΠΡΟΜΗΘΕΑΣ ενσωματώνει επίσης τον ανταγωνισμό μεταξύ των αέριων ή υγρών επιλογές αποθήκευσης και μεταξύ αγωγών και φορτηγών. Το παρακάτω σχήμα περιέχει μια λεπτομερή απεικόνιση των υποδομών αποθήκευσης, μεταφοράς και διανομής υδρογόνου. Στην μελέτη [100] παρουσιάζονται αναλυτικά τα τεχνικά και οικονομικά χαρακτηριστικά των συγκεκριμένων τεχνολογιών και αναλύονται οι πιθανές διαμορφώσεις του συστήματος υποδομών μιας οικονομίας υδρογόνου.



Γράφημα 3-4: Επισκόπηση του συστήματος υποδομών μεταφοράς και διανομής υδρογόνου όπως αναπαρίσταται στο μοντέλο

3.7 Παραγωγή υδρογονανθράκων και διαμόρφωση διεθνών τιμών ορυκτών καυσίμων

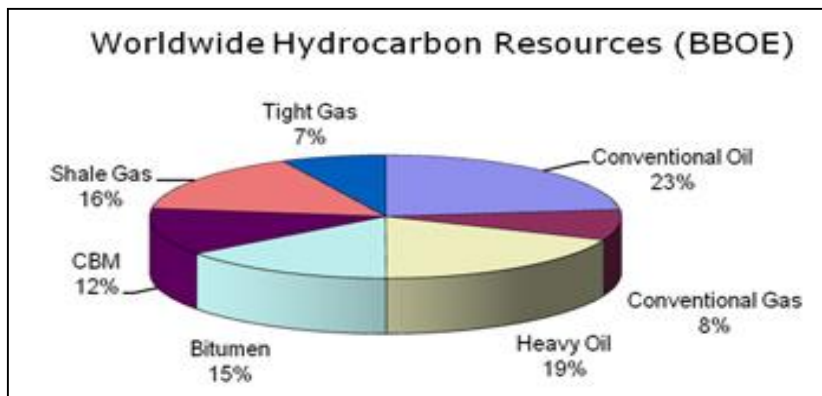
3.7.1 Κατηγοριοποίηση των κοιτασμάτων υδρογονανθράκων

Η κατανόηση και ακριβής μοντελοποίηση των κοιτασμάτων πετρελαίου είναι ιδιαίτερα σημαντική για την ανάλυση των προοπτικών του τομέα της παραγωγής υδρογονανθράκων. Τα κοιτάσματα είναι μεγάλα σε μέγεθος, αλλά πεπερασμένα και κατανομημένα με άνισο τρόπο στις περιοχές του κόσμου. Ακόμα και σε χώρες με σημαντικούς σε μέγεθος πόρους ορυκτών καυσίμων, η παραγωγή τείνει να μειωθεί καθώς εξαντλούνται σταδιακά τα διαθέσιμα κοιτάσματα (τις περισσότερες φορές αυτό συμβαίνει όταν η αθροιστική παραγωγή ξεπεράσει το 50% των κοιτασμάτων).

Ο ΠΡΟΜΗΘΕΑΣ ακολουθεί τις κατευθυντήριες γραμμές των αναλύσεων του USGS [101, 102] σε σχέση με την κατηγοριοποίηση των κοιτασμάτων των ορυκτών καυσίμων. Οι συνολικοί πόροι των υδρογονανθράκων ταξινομούνται σε: γνωστά αποθέματα, αύξηση των αποθεμάτων (από γνωστούς ταμειυτήρες καυσίμων) και άγνωστα κοιτάσματα τα οποία δεν έχουν ακόμα ανακαλυφθεί (τεχνικά ανακτήσιμα κοιτάσματα που προκύπτουν από γεωλογικές εκτιμήσεις). Οι εκτιμήσεις τόσο για την

αύξηση των αποθεμάτων όσο και για τα άγνωστα κοιτάσματα είναι αβέβαιες και συνεπώς απεικονίζονται με μια κατανομή πιθανοτήτων με μέση τιμή, διάμεσο και εκατοστημόρια με πιθανότητες 5% και 95% (γνωστά και ως P05 and P95). Η ΔΟΕ στις μελέτες της χρησιμοποιεί τις μέσες τιμές σύμφωνα με τις οποίες τα συνολικά κοιτάσματα πετρελαίου κατηγοριοποιούνται σε περίπου 40% γνωστά αποθέματα, 30% αύξηση των γνωστών αποθεμάτων και 30% τα άγνωστα ως σήμερα κοιτάσματα.

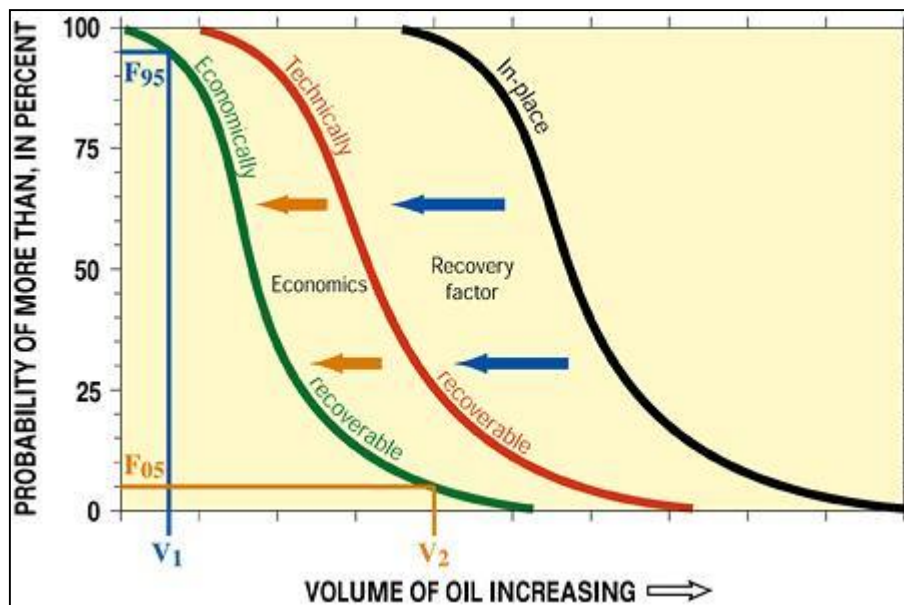
Οι εκτιμήσεις του Ινστιτούτου USGS αναφέρονται σε τεχνικά ανακτήσιμους πόρους ορυκτών καυσίμων και όχι κοιτάσματα που είναι ανακτήσιμα με οικονομικούς όρους. Για παράδειγμα, τα θαλάσσια κοιτάσματα στην Αρκτική περιέχουν μεγάλη ποσότητα πετρελαίου, το οποίο όμως για να είναι ανακτήσιμο θα πρέπει η διεθνής τιμή να διατηρηθεί σε επίπεδα μεγαλύτερα των 100 \$/βαρέλι, να υπάρξουν τεχνολογικές βελτιώσεις και σταδιακή ανάπτυξη των αναγκαίων υποδομών.



Γράφημα 3-5: Ταξινόμηση των παγκόσμιων κοιτασμάτων υδρογονανθράκων (πηγή: ΔΟΕ)

Η παρακάτω εικόνα παρουσιάζει σχηματικά την αθροιστική πιθανότητα για 3 κατηγορίες κοιτασμάτων πετρελαίου, οι οποίες αντιπροσωπεύονται από τις τρεις καμπύλες, δηλαδή οικονομικά ανακτήσιμοι, τεχνικά ανακτήσιμοι και συνολικοί πόροι πετρελαίου στο κοίτασμα. Υπάρχει πιθανότητα τουλάχιστον 95% (F95) να υπάρχει τουλάχιστον ποσότητα V1 οικονομικά ανακτήσιμων κοιτασμάτων πετρελαίου και πιθανότητα 5% (F05) να υπάρχει ποσότητα V2. Οι τεχνικά ανακτήσιμοι πόροι αποτελούν ένα υποσύνολο των συνολικών πόρων πετρελαίου στο κοίτασμα (καθώς ο συντελεστής ανάκτησης είναι μικρότερος από μονάδα).

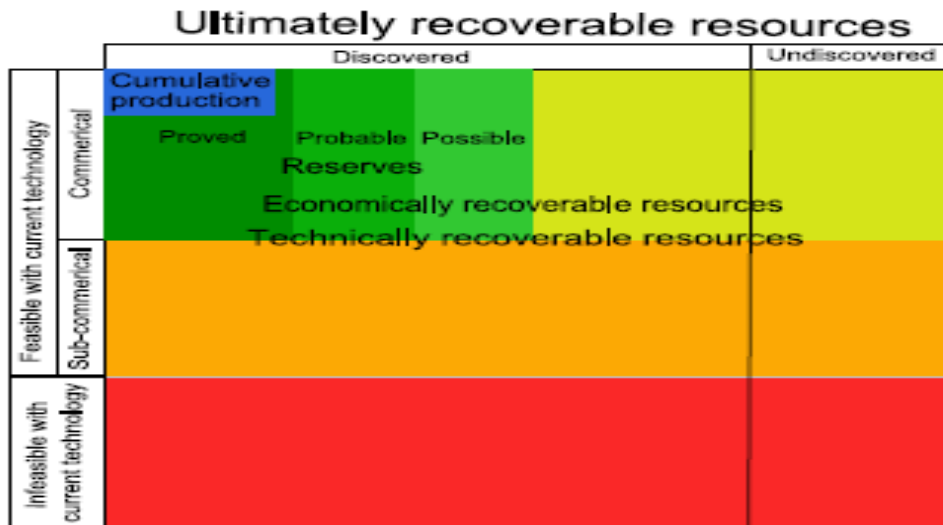
Εκτός από την ταξινόμηση του USGS, τα κοιτάσματα μπορούν να προσδιοριστούν με βάση το σύστημα *Petroleum Resources Management System* (PRMS) [103], το οποίο συμπυκνώνεται στο πλαίσιο των Ηνωμένων Εθνών που καλύπτει όλους τους τύπους ενέργειας και ορυκτών (UNECE, [104]). Η ταξινόμηση PRMS θεωρεί τα αποθέματα σε τρεις κατηγορίες, με διαρκώς αυξανόμενες ποσότητες και μειούμενες πιθανότητες παραγωγής (Γράφημα 3-7).



Γράφημα 3-6: Πιθανότητα εκμετάλλευσης των κατηγοριών κοιτασμάτων υδρογονανθράκων ανάλογα με την κατηγοριοποίησή τους

- Τα αποδεδειγμένα αποθέματα (ή 1P) είναι η ποσότητα καυσίμων που έχει πιθανότητα άνω του 90% να παραχθεί. Αυτό συνεπάγεται όχι μόνο (σχεδόν) βεβαιότητα για την γεωλογική παρουσία των υδρογονανθράκων, αλλά και ικανότητα παραγωγής τους με βάση την σημερινή τεχνολογία και τις τρέχουσες διεθνείς τιμές. Επίσης συνεπάγεται μεγάλη πιθανότητα υλοποίησης ενός έργου παραγωγής/εξόρυξης στο συγκεκριμένο κοιτάσμα (δηλαδή έχει ληφθεί η τελική απόφαση επένδυσης-*Final Investment Decision*).
- Τα πιθανά αποθέματα (ή 2P), δηλαδή η ποσότητα καυσίμων με πιθανότητα άνω του 50% να παραχθεί. Η αβεβαιότητα μπορεί να οφείλεται στην γεωλογία, στους πιθανούς ρυθμούς παραγωγής ή στο αυξημένο κόστος εξόρυξης. Τα 2P αποθέματα συνήθως συμπεριλαμβάνουν τα 1P αποθέματα.
- Τα δυνητικά αποθέματα (ή 3P), δηλαδή η ποσότητα καυσίμων που έχει πιθανότητα μόλις άνω του 10% να εξορυχθεί. Η αβεβαιότητα συνήθως αντικατοπτρίζει την διαθεσιμότητα περιορισμένων μόνο πληροφοριών και δεδομένων για τη γεωλογία και την ικανότητα παραγωγής του κοιτάσματος.

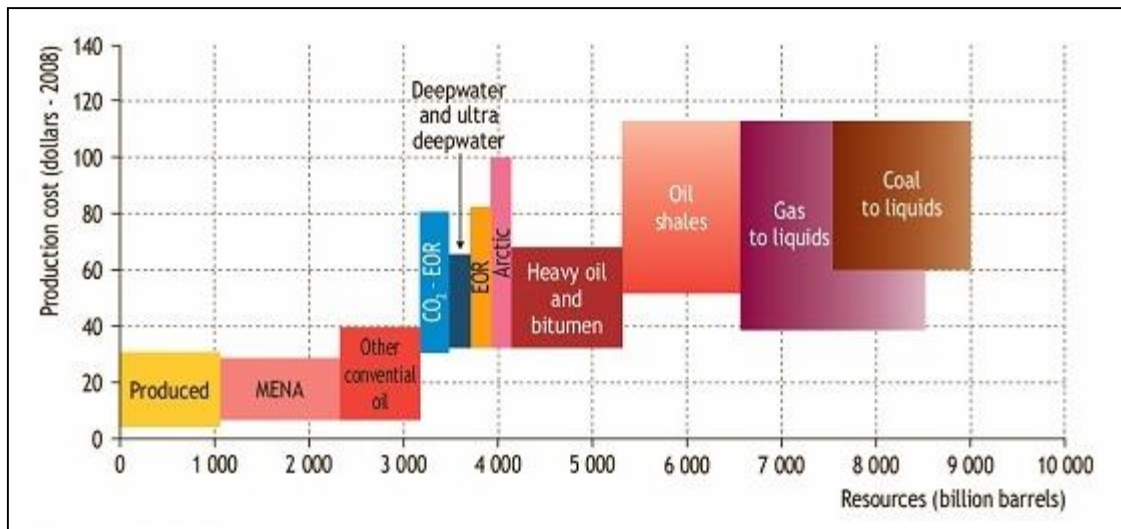
Η ταξινόμηση PRMS περιλαμβάνει μια κατηγορία ενδεχόμενων κοιτασμάτων, τα οποία εκτιμάται ότι είναι τεχνικά, αλλά όχι οικονομικά ανακτήσιμα με βάση την σημερινή τεχνολογία και τις υπάρχουσες διεθνείς τιμές. Επίσης αυτή η κατηγορία περιλαμβάνει περιπτώσεις όπου η εξόρυξη των κοιτασμάτων είναι χαμηλά στη λίστα προτεραιοτήτων της εταιρείας που έχει τα δικαιώματα παραγωγής, ακόμη και αν αυτή είναι οικονομικά αποδοτική.



Γράφημα 3-7: Διάκριση μεταξύ των πόρων και αποθεμάτων υδρογονανθράκων (πηγή UNECE)

Η αβεβαιότητα γύρω από την εξέλιξη των αποθεμάτων πετρελαίου και φυσικού αερίου είναι μια από τις πιο κρίσιμες παραμέτρους για την εξέλιξη του ενεργειακού συστήματος. Το μοντέλο διαχωρίζει τα συμβατικά από τα μη συμβατικά κοιτάσματα πετρελαίου, με τα πρώτα να διαφοροποιούνται μεταξύ πετρελαίου που βρίσκεται στην περιοχή του Κόλπου και στον υπόλοιπο κόσμο. Το μοντέλο, ακολουθώντας τις συμβάσεις του Διεθνούς Οργανισμού Ενέργειας [38] σχετικά με την κατηγοριοποίηση των κοιτασμάτων, διαχωρίζει τα μη συμβατικά κοιτάσματα σε έξτρα βαρύ πετρέλαιο της Βενεζουέλας (*extra heavy fuel oil*), πισσώδεις εκτάσεις με άμμο στην περιοχή Athabasca/Alberta του Καναδά (*oil tar sands*) και έγκλειστο πετρέλαιο που παράγεται κυρίως στην Β. Αμερική (*light tight oil*).

Η παρακάτω απεικόνιση δείχνει το μέγεθος των τύπων κοιτασμάτων, καθώς και το εύρος των τιμών του πετρελαίου που καθιστούν την παραγωγή από αυτούς τους πόρους εφικτή σε εμπορική βάση. Αλλά, προφανώς δεν είναι δυνατή η εξόρυξη του συνόλου των κοιτασμάτων υπό τις τρέχουσες συνθήκες (ιδιαίτερα λαμβάνοντας υπόψη την σημαντική μείωση της τιμής του πετρελαίου την περίοδο 2014/2015) παρά τις τεχνολογικές βελτιώσεις οι οποίες θα οδηγήσουν σε μείωση του κόστους παραγωγής. Όπως παρατηρούμε από το γράφημα, ενώ το μεγαλύτερο μέρος των συμβατικών κοιτασμάτων πετρελαίου έχουν κόστος παραγωγής μικρότερο από 40 \$/βαρέλι, η πλειοψηφία των μη συμβατικών κοιτασμάτων καθώς και τα κοιτάσματα σε βαθιά ύδατα και όσα χρησιμοποιούν τεχνικές βελτιωμένης ανάκτησης πετρελαίου με CO₂ (EOR) μπορούν να παραχθούν μόνο αν οι διεθνείς τιμές του πετρελαίου είναι σταθερά πάνω από 80-100\$. Επίσης, σύμφωνα με πλήθος μελετών, η εξόρυξη των κοιτασμάτων σχιστολιθικού πετρελαίου (η παραγωγή των οποίων αυξήθηκε σημαντικά τα τελευταία χρόνια στις ΗΠΑ) χρειάζεται μια διεθνή τιμή μεταξύ 60-80\$ για να είναι οικονομικά αποδοτική. Ακόμα πιο ακριβή είναι η παραγωγή πετρελαίου από τις διαδικασίες GTL και CTL (διεργασίες διύλισης για την μετατροπή φυσικού αερίου και άνθρακα αντίστοιχα σε πετρελαϊκά προϊόντα).



Γράφημα 3-8: Μέσο κόστος παραγωγής πετρελαίου σε διάφορες χώρες σε \$/βαρέλι (ΔΟΕ [38])

Το παρακάτω γράφημα παρουσιάζει σχηματικά η κατηγοριοποίηση των τύπων πετρελαίου και φυσικού αερίου. Στην κορυφή υπάρχουν τα συμβατικά κοιτάσματα με σχετικά μικρό κόστος εξόρυξης και η γεωλογία των οποίων είναι επαρκώς μελετημένη, ενώ στη συνέχεια τα μη συμβατικά κοιτάσματα. Όσον αφορά το φυσικό αέριο, όσο η διαπερατότητα των ταμιευτήρων φυσικού αερίου μειώνεται, η ποσότητα των πόρων που βρίσκεται σε αυτούς αυξάνεται αλλά αυξάνεται επίσης και το κόστος παραγωγής τους καθώς απαιτούνται ιδιαίτερες τεχνικές εξόρυξης [105] (χαμηλότερα επίπεδα της πυραμίδας). Στο τελευταίο κομμάτι της πυραμίδας βρίσκονται τα κοιτάσματα με το μεγαλύτερο μέγεθος αλλά και το μεγαλύτερο κόστος παραγωγής. Σε συμφωνία με την ανάλυση της ΔΟΕ [86], το μοντέλο υποθέτει μηδενική εκμετάλλευση των κοιτασμάτων ένυδρων αερίων (*gas hydrates*) μέχρι το 2050 εξαιτίας τεχνολογικών αβεβαιοτήτων και ιδιαίτερα αυξημένου κόστους εξόρυξης. Επίσης όσον αφορά το πετρέλαιο που βρίσκεται σε σχιστολιθικούς σχηματισμούς (*kerogen-shale oil*) το μοντέλο υποθέτει ιδιαίτερα χαμηλή εκμετάλλευση των κοιτασμάτων μόνο σε χώρες που ήδη παράγεται (π.χ. Εσθονία, Καναδάς).

Τα κοιτάσματα μη συμβατικού φυσικού αερίου ορίζονται ως οι ταμιευτήρες αερίου από τους οποίους δεν μπορεί να παραχθεί το αέριο σε οικονομικούς ρυθμούς ροής ή σε οικονομικές ποσότητες εκτός αν το φρέαρ διεγερθεί με την τεχνική της υδραυλικής ρωγμάτωσης [107]. Οι συντελεστές ανάκτησης (*recovery factors*) των πόρων μη συμβατικού αερίου είναι πολύ μικρότεροι σε σύγκριση με το συμβατικό αέριο και συνήθως κυμαίνονται μεταξύ 15-30% της συνολικής ποσότητας αερίου στο κοίτασμα [105]. Τα τρία είδη μη συμβατικών πηγών φυσικού αερίου είναι το σχιστολιθικό αέριο (*shale gas*), το έγκλειστο αέριο (*tight gas*) και το μεθάνιο από κοιτάσματα γαιανθράκων (*coalbed methane*). Οι ταμιευτήρες μη συμβατικού αερίου χαρακτηρίζονται από χαμηλό πορώδες και μικρή διαπερατότητα (σε σχέση με τους ταμιευτήρες συμβατικού φυσικού αερίου). Κοινά χαρακτηριστικά των μη συμβατικών κοιτασμάτων είναι ότι η περιεκτικότητα σε αέριο κατ' όγκο πετρώματος είναι

μικρότερη σε σύγκριση με τα συμβατικά κοιτάσματα, είναι διασκορπισμένα σε έκταση δεκάδων χιλιάδων τετραγωνικών χιλιομέτρων και ότι η διαπερατότητα τους είναι ιδιαίτερα χαμηλή. Επομένως, απαιτούνται εξειδικευμένες τεχνολογίες και μέθοδοι για την εξόρυξη του αερίου από το κοιτάσμα (οριζόντια γεώτρηση και υδραυλική ρωγμάτωση) και συνεπώς μεγαλύτερο κόστος παραγωγής συγκριτικά με το συμβατικό αέριο. Επιπλέον, οι μέθοδοι εξόρυξης του μη συμβατικού αερίου έχουν υψηλούς κινδύνους και αρνητικές περιβαλλοντικές και κοινωνικές επιπτώσεις (ανάγκη για περισσότερα φρέατα εξαιτίας χαμηλής διαπερατότητας των κοιτασμάτων, υψηλή κατανάλωση νερού και μόλυνση υπόγειων υδάτων, υψηλές εκπομπές μεθανίου, μεγαλύτερη ενεργειακή κατανάλωση, επιπτώσεις στη βιοποικιλότητα και καταστροφή φυσικού τοπίου).

3.7.2 Μοντελοποίηση των κοιτασμάτων και η επίδρασή τους στην εξέλιξη των διεθνών τιμών

Η αβεβαιότητα που περιβάλλει την ποσότητα του πετρελαίου και του φυσικού αερίου που δεν έχει ακόμα ανακαλυφθεί έχει ενσωματωθεί στον ΠΡΟΜΗΘΕΑ με την μορφή των τεχνικά και οικονομικά ανακτήσιμων κοιτασμάτων. Χρησιμοποιώντας μελέτες που έχουν διεξαχθεί από το γεωλογικό ινστιτούτο USGS [101, 102], πραγματοποιήθηκε στοχαστική ανάλυση προκειμένου να εκτιμήσουμε τις από κοινού κατανομές πιθανοτήτων για τα συμβατικά κοιτάσματα πετρελαίου και φυσικού αερίου (που δεν έχουν ανακαλυφθεί ακόμα) στο έτος έναρξης της διαδικασίας προσομοίωσης. Οι κατανομές των κοιτασμάτων έχουν ισχυρή συνδιακύμανση εξαιτίας κυρίως γεωλογικών λόγων. Μια παρόμοια διαδικασία βασισμένη σε μια σειρά από μελέτες της διεθνούς βιβλιογραφίας ακολουθήθηκε για να εκτιμηθούν οι κατανομές πιθανοτήτων για το μη συμβατικό αέριο σε παγκόσμια κλίμακα (ο μηχανισμός αναπαράστασης περιγράφεται σε επόμενο κεφάλαιο της διατριβής).

Ο ρυθμός ανακάλυψης νέων αποθεμάτων και κοιτασμάτων, καθώς και το ποσοστό ανάκτησης του πετρελαίου είναι ενδογενή στο μοντέλο, συσχετίζονται θετικά με τη διεθνή τιμή του Brent και υπόκεινται σε δικές τους συγκεκριμένες αβεβαιότητες. Οι μικτές (ακαθάριστες) προσθήκες στα αποθέματα του συμβατικού πετρελαίου είναι συνάρτηση των ανεξερεύνητων ακόμα κοιτασμάτων σε κάθε περιοχή, της διεθνούς τιμής του Brent και της παγκόσμια ζήτησης πετρελαίου. Τα ποσοστά ανάκτησης των μη συμβατικών πηγών πετρελαίου είναι συνάρτηση της διεθνούς τιμής πετρελαίου και δρουν ως «διασφάλιση» που εμποδίζει την διατήρηση υψηλών παγκόσμιων τιμών.

Η παραγωγή συμβατικού πετρελαίου στην περιοχή του Περσικού Κόλπου επηρεάζεται από την αναλογία αποθεμάτων προς παραγωγή (RP ratio) στην Μέση Ανατολή και από την παγκόσμια ζήτηση πετρελαίου:

$$\ln\left(\frac{PE_t}{PE_{t-1}}\right) * \sum_{p=1}^l \left(\frac{RP_{t-p}}{RP_{t-p-1}}\right) = a * \ln\left(\frac{\sum_r Doil_{r,t}}{\sum_r Doil_{r,t-1}}\right) + u_t \quad (16)$$

Όπου η μεταβλητή PE_t αντιπροσωπεύει την παραγωγή πετρελαίου στην Μέση Ανατολή την χρονιά t , RP_t είναι η αναλογία αποθεμάτων προς παραγωγή στην περιοχή του Κόλπου, $Doil_{r,t}$ συμβολίζει την ζήτηση πετρελαίου σε κάθε περιοχή του μοντέλου r , u_t είναι ο όρος σφάλματος της εξίσωσης, ενώ οι παράμετροι α και β έχουν εκτιμηθεί οικονομετρικά. Η παραγωγική ικανότητα του πετρελαίου (*productive capacity*) στη Μέση Ανατολή καθορίζεται από τις τάσεις της παραγωγής, αλλά επίσης υπόκειται σε τυχαίες διαταραχές, των οποίων η διακύμανση καθορίζεται από τα διαθέσιμα ιστορικά δεδομένα (π.χ. πετρελαϊκές κρίσεις των δεκαετιών 1970-1980 και μεταγενέστερες).

Η παραγωγή συμβατικού πετρελαίου στις υπόλοιπες περιοχές του κόσμου καθορίζεται από την παγκόσμια ζήτηση, την διεθνή τιμή του πετρελαίου Brent και από τα αποθέματα πετρελαίου (που βρίσκονται εκτός της περιοχής του Κόλπου):

$$\ln\left(\frac{RP_{t-1}}{RP_t}\right) = \alpha + \beta * \ln\left(\frac{\sum_r Doil_{r,t}}{\sum_r Doil_{r,t-1}}\right) + \sum_{k=1}^{k=m} \gamma_k \left(\ln\left(\frac{Poil_{t-k}}{Poil_{t-k-1}}\right)\right) + u_t \quad (17)$$

Όπου u_t είναι ο όρος σφάλματος και οι παράμετροι α , β , γ_k και m έχουν εκτιμηθεί οικονομετρικά.

Η παραγωγή πετρελαίου από τα μη συμβατικά κοιτάσματα καθορίζεται από την παγκόσμια ζήτηση και τις διεθνείς τιμές πετρελαίου καθώς και από την αναλογία των συμβατικών αποθεμάτων προς την παραγωγή πετρελαίου. Συγκεκριμένα το μοντέλο υποθέτει ότι αν η διεθνής τιμή του πετρελαίου ξεπεράσει μια συγκεκριμένη τιμή/κατώφλι (στοχαστική με μέσο όρο τα 200 \$ ανά βαρέλι), η παραγωγή του μη συμβατικού πετρελαίου αυξάνεται μη γραμμικά καθώς όλο και μεγαλύτερο ποσοστό των μη συμβατικών κοιτασμάτων γίνονται οικονομικά αποδοτικά για παραγωγή, αλλά με μεγαλύτερο κόστος εξόρυξης. Αυτό αντικατοπτρίζει την καμπύλη του κόστους εξόρυξης των διαφορετικών κοιτασμάτων πετρελαίου (Γράφημα 3-8).

Οι μικτές προσθήκες στα αποθέματα του συμβατικού φυσικού αερίου είναι συνάρτηση των ανεξερεύνητων κοιτασμάτων, τα οποία καθορίζονται από τους συνολικούς πόρους του φυσικού αερίου, και τις ακαθάριστες προσθήκες στα αποθέματα πετρελαίου, καθώς η έρευνα για συμβατικό πετρέλαιο αυξάνει την πιθανότητα ανακάλυψης φυσικού αερίου. Οι ακαθάριστες προσθήκες στα αποθέματα φυσικού αερίου υπολογίζονται από την ακόλουθη εξίσωση:

$$\ln(grgas_t) = \alpha * \ln(groil_t) + \beta * \ln(ytfgas_{t-1}) + u_t \quad (18)$$

Όπου η μεταβλητή $grgas_t$ αντιπροσωπεύει τις ακαθάριστες προσθήκες στα αποθέματα φυσικού αερίου την χρονιά t , $groil_t$ αντιπροσωπεύει τις ακαθάριστες προσθήκες στα αποθέματα συμβατικού πετρελαίου, $ytfgas_t$ είναι τα κοιτάσματα φυσικού αερίου τα οποία δεν έχουν ακόμα εξερευνηθεί (με βάση τις μελέτες του USGS [101, 102]), u_t είναι ο όρος σφάλματος και οι παράμετροι α και β έχουν εκτιμηθεί οικονομετρικά. Η εξέλιξη των αποθεμάτων συμβατικού πετρελαίου και φυσικού αερίου

συμπληρώνονται από την αύξηση των αποθεμάτων τους από ήδη γνωστά κοιτάσματα και προκύπτουν με βάση πρόσφατες εκτιμήσεις του USGS [112].

Εκτός από τα συμβατικό φυσικό αέριο, στο μοντέλο έχουν εισαχθεί και τα μη συμβατικά κοιτάσματα αερίου (σχιστολιθικό, έγκλειστο και μεθάνιο από κοιτάσματα άνθρακα), των οποίων η αβεβαιότητα προέρχεται από μια ποικιλία αξιολογήσεων και μελετών [108-111]. Η διαδικασία παραγωγής των κατανομών πιθανοτήτων για τα μη συμβατικά κοιτάσματα περιγράφονται εκτενώς στο κεφάλαιο 5 της διατριβής.

Εκτός από την στατιστική εξάρτηση που προκύπτει από γεωλογικούς παράγοντες και τις τεχνολογίες εξερεύνησης και εξόρυξης υδρογονανθράκων, τα κοιτάσματα των ορυκτών καυσίμων συνδέονται επίσης μέσω της εξάρτησης των διεθνών τιμών τους. Οι διεθνείς τιμές των ορυκτών καυσίμων (πετρέλαιο, φυσικό αέριο και άνθρακας) είναι ενδογενείς στον ΠΡΟΜΗΘΕΑ. Αυτό αποτελεί ένα σημαντικό χαρακτηριστικό του μοντέλου, δεδομένου ότι η εξέλιξη των τιμών των ορυκτών καυσίμων αποτελεί έναν βασικό μοχλό της εξέλιξης του παγκόσμιου ενεργειακού συστήματος. Από την άλλη πλευρά, πολλά μοντέλα ενέργειας-οικονομίας θεωρούν τις διεθνείς τιμές των καυσίμων ως εξωγενείς [113,37] ή σπάνια παρουσιάζουν τις προβλέψεις για εξέλιξή τους [38, 39]. Η ντετερμινιστική εκδοχή του ΠΡΟΜΗΘΕΑ¹⁰ έχει χρησιμοποιηθεί σε πρόσφατες σημαντικές μελέτες της Ευρωπαϊκής Επιτροπής, όπως το *Energy Trends* για το 2050 [114] και ο ενεργειακός οδικός χάρτης Ενέργειας και Κλιματικής Αλλαγής της ΕΕ για το 2050 [8], ώστε να παρέχουν την εξέλιξη των τιμών εισαγωγής των ορυκτών καυσίμων στην Ευρωπαϊκή Ένωση με βάση εναλλακτικά σενάρια για την εξέλιξη του ενεργειακού συστήματος και των κοιτασμάτων των υδρογονανθράκων.

Η διεθνής τιμή του πετρελαίου ($P_{oil,t}$) καθορίζεται από την εξέλιξη της παγκόσμιας ζήτησης και προσφοράς πετρελαίου (εξίσωση 18) και εξαρτάται από την αναλογία παραγωγικής ικανότητας ως προς την παραγωγή πετρελαίου στην Μέση Ανατολή ($PCAP_t$) και από το παγκόσμιο λόγο RP ενώ οι παράμετροι α , β και γ_l είναι οικονομετρικά εκτιμημένες και το $u_{oil,t}$ αντιπροσωπεύει τον όρο σφάλματος της εξίσωσης.

$$\ln(P_{oil,t}) = \alpha + \beta * \ln(PCAP_{t-1}) + \sum_{l=0}^p \gamma_l (\ln RP_{t-l}) + u_{oil,t} \quad (19)$$

Η διεθνής τιμή του φυσικού αερίου ($P_{gas,t}$) εξαρτάται από την διεθνή τιμή του πετρελαίου (εξαιτίας της σύνδεσής της στα μακροχρόνια συμβόλαια εισαγωγής αερίου-*oil price indexing*) and του λόγου των παγκοσμίων αποθεμάτων προς την παραγωγή ($RP_{gas,t}$) με βάση την εξίσωση (19).

$$\ln(P_{gas,t}) = \delta + \sum_{l=0}^p \zeta_l \ln(P_{oil,t-l}) + \sum_{m=0}^r \eta_m (\ln(RP_{gas,t-m})) + u_{gas,t} \quad (20)$$

¹⁰ Στην οποία όλες οι παράμετροι εισόδου, οι εξωγενείς μεταβλητές και οι ελαστικότητες παίρνουν την μέση τους τιμή.

Οι τιμές εισαγωγής του φυσικού αερίου σε κάθε περιοχή του ΠΡΟΜΗΘΕΑ καθορίζονται από την εξέλιξη των διεθνών τιμών του αερίου και το κόστος μεταφοράς από τις σημαντικότερες περιοχές εξαγωγών («mark-up» κόστη). Τα στοιχεία για το κόστος εξόρυξης και μεταφοράς διαφέρουν ανά περιοχή του ΠΡΟΜΗΘΕΑ, π.χ. η παραγωγή στις περιοχές της Μέσης Ανατολής, της Βορείου Αφρικής και την Ρωσίας έχει πολύ χαμηλότερο κόστος σε σχέση τόσο με τα συμβατικά κοιτάσματα στην Ευρώπη ή στην Κίνα όσο και με την παραγωγή μη συμβατικού αερίου. Για την ποσοτικοποίηση του κόστους παραγωγής φυσικού αερίου, χρησιμοποιήθηκε ένα εκτεταμένο σύνολο μελετών, με βασικότερες τις [109], [111] και [115].

Η σημασία του λόγου R/P (αποθέματα προς παραγωγή) για την εξέλιξη των διεθνών τιμών του πετρελαίου και του φυσικού αερίου είναι σαφής αντανάκλαση του ολιγοπωλιακού χαρακτήρα των αγορών για τα καύσιμα. Σε κάθε περίπτωση, οι εξισώσεις έχουν εκτιμηθεί οικονομετρικά σε ιστορικές περιόδους όπου η ισχύς των καρτέλ των υδρογονανθράκων (π.χ. ΟΠΕΚ) ήταν έντονη και άρα τα ολιγοπωλιακά rents (επιπρόσθετη πληρωμή η οποία προκύπτει εξαιτίας της αποκλειστικότητας ή της έλλειψης ενός συντελεστή παραγωγής) και άλλα «mark-up» κόστη (περιθώρια επιπλέον κέρδους) ανταναικλώνονται σε όλες τις εκτιμημένες παραμέτρους του μοντέλου συμπεριλαμβάνοντας και τις σταθερές παραμέτρους τάσης, οι οποίες έχουν την δυνατότητα να μεταβάλλονται ώστε να ανταναικλούν διαφορετικές διαμορφώσεις της αγοράς των ορυκτών καυσίμων (πχ. καρτέλ, ολιγοπώλιο, τέλειος ανταγωνισμός).

Η διεθνής τιμή του άνθρακα (P_{coal_t}) καθορίζεται μόνο από την παγκόσμια ζήτηση άνθρακα (D_{COAL_t}) και όχι από την παραγωγή, καθώς γίνεται η υπόθεση ότι τα αποθέματα και τα κοιτάσματα του άνθρακα είναι άφθονα (τουλάχιστον μέχρι το 2050) σύμφωνα με την ανάλυση της BGR [116]. Επιπλέον, το κόστος εξόρυξης και μεταφοράς μεγάλου μέρους των κοιτασμάτων είναι χαμηλό και σε κάθε περίπτωση τουλάχιστον μικρότερο από την τρέχουσα διεθνή τιμή του άνθρακα [86], ενώ υπάρχουν υψηλές προοπτικές για την παγκόσμια προμήθεια άνθρακα από τους μεγαλύτερους εξαγωγείς παγκοσμίως (Αυστραλία, Ινδονησία, Κολομβία, Η.Π.Α., Νότια Αφρική) καθώς τα υπό κατασκευή και προτεινόμενα έργα είναι επαρκή για να καλύψουν την παγκόσμια ζήτηση με σχετικά χαμηλό κόστος [117]. Επιπλέον, η διεθνής τιμή του άνθρακα συνδέεται εν μέρει με την διεθνή τιμή του πετρελαίου (εξίσωση 17), όπως παρατηρείται συνήθως στις παγκόσμιες αγορές, κυρίως εξαιτίας του *oil price indexing* καθώς και του κόστους μεταφοράς του άνθρακα που επηρεάζεται από την τιμή του πετρελαίου (η συνδιακύμανση των διεθνών τιμών πετρελαίου και του άνθρακα είναι 0.87 την περίοδο 1985-2014). Στον ΠΡΟΜΗΘΕΑ, η διεθνής τιμή του άνθρακα αντιπροσωπεύει τον μέσο όρο των τιμών εισαγωγής άνθρακα στις χώρες του ΟΟΣΑ (ο δείκτης χρησιμοποιείται από την ΔΟΕ για τις Προοπτικές του Παγκόσμιου Ενεργειακού συστήματος [86]).

$$\ln(P_{coal_t}) = \theta + \sum_{l=0}^p \lambda_l \ln(P_{oil_{t-l}}) + \sum_{m=0}^r \xi_m (\ln(D_{coal_{t-m}})) + u_{coal,t} \quad (21)$$

Για λόγους επεξήγησης, τα αποτελέσματα των οικονομετρικών εκτιμήσεων για τις διεθνείς τιμές του πετρελαίου και του φυσικού αερίου που έχουν εκτελεστεί στο

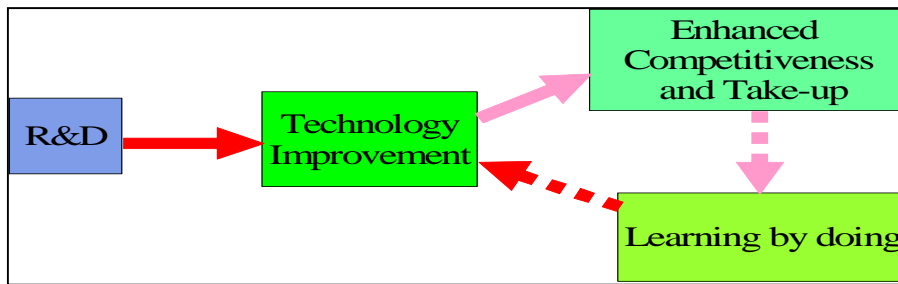
προγραμματιστικό περιβάλλον E-VIEWS για την περίοδο 1980-2010 συνοψίζονται στο Παράρτημα Α του κεφαλαίου 3.

3.8 Τεχνολογική πρόοδος

3.8.1 Μοντελοποίηση της τεχνολογικής προόδου

Η ενδογεννοποίηση της τεχνολογικής αλλαγής στα μοντέλα ενέργειας-οικονομίας έχει αναγνωριστεί ως ιδιαίτερα σημαντική πτυχή για την αναπαράσταση των μετασχηματισμών του ενεργειακού συστήματος (Kouvaritakis et al. [118]). Η σημασία της αναγνωρίζεται επίσης στο πλαίσιο του σχεδιασμού κλιματικής και οικονομικής πολιτικής (Baker et al. 2008 [119]). Οι παραδοσιακές αναλύσεις της τεχνολογικής προόδου έχουν από καιρό αναγνωρίσει τη σημασία της «μάθησης μέσω της εμπειρίας» (*learning by doing*) στην μείωση του κόστους και την βελτίωση των τεχνικών επιδόσεων των τεχνολογιών (Arrow 1962 [120]). Ωστόσο, είναι επίσης ευρέως αποδεκτό ότι οι επενδύσεις στην έρευνα και στην ανάπτυξη (R&D) είναι δυνατό να συμβάλουν άμεσα στην βελτίωση των τεχνικών και οικονομικών χαρακτηριστικών των ενεργειακών τεχνολογιών. Έτσι, προκειμένου να αντιμετωπιστούν θέματα πολιτικής σχετικά με την οικονομική αποτελεσματικότητα των επενδύσεων σε έρευνα και καινοτομία είναι σαφές ότι το R&D πρέπει να εισαχθεί ρητά στον προσδιορισμό της τεχνολογικής προόδου στα μοντέλα ενέργειας-οικονομίας.

Ο πυρήνας στην ενδογενή αναπαράσταση της τεχνολογική αλλαγής που έχει εισαχθεί στον PROMHΘEA, είναι ο προσδιορισμός της καμπύλης μάθησης δυο παραγόντων (TFLC) και η ενδογεννοποίηση της τεχνικής προόδου τόσο από την μάθηση μέσω εμπειρίας όσο και μέσω επενδύσεων στην έρευνα (R&D). Σύμφωνα με αυτό τον προσδιορισμό, οι επενδύσεις στο R&D οδηγούν άμεσα στην τεχνολογική βελτίωση, η οποία με τη σειρά της ενισχύει την ανταγωνιστικότητα της συγκεκριμένης τεχνολογίας και οδηγεί σε αύξηση της υιοθέτησής της από τους ενεργειακούς καταναλωτές και της διείσδυσής της στο παγκόσμιο ενεργειακό σύστημα. Η αύξηση της αξιοποίησης των τεχνολογιών θέτει σε κίνηση τον μηχανισμό εκμάθησης μέσω της εμπειρίας, η οποία οδηγεί σε περαιτέρω τεχνολογική βελτίωση, περαιτέρω διείσδυση της τεχνολογίας κ.λπ. Με αυτή την έννοια, η μάθηση μέσα από την εμπειρία λειτουργεί ως επιταχυντής των επιπτώσεων των αρχικών αποτελεσμάτων των επενδύσεων σε R&D. Ο μηχανισμός της τεχνικής προόδου με βάση την καμπύλη μάθησης δυο παραγόντων παρουσιάζεται στο Γράφημα 3-9. Σαφώς, ο κύκλος της τεχνολογικής προόδου χαρακτηρίζεται από φαινόμενα επιβράδυνσης, τα οποία οδηγούν σε πεπερασμένες συνολικές επιπτώσεις στις τεχνολογικές μεταβολές. Παρ' όλη την επιβράδυνση, η συμπερίληψη τέτοιων μηχανισμών στο μοντέλο έχει την τάση να εισαγάγει στοιχεία της αστάθειας, κυρίως αποτελέσματα "*lock-in*", αφού υπάρχει η πιθανότητα η μαζική χρηματοδότηση του R&D για ορισμένες τεχνολογικές επιλογές να οδηγήσει σε μείωση των επενδύσεων έρευνας για άλλες επιλογές, οι οποίες δεν μπορούν να επωφεληθούν από την πρόοδο μέσω της εμπειρίας που θα μπορούσαν να είχαν απολαύσει αν η αρχικές επενδύσεις στο R&D ήταν διαφορετικά κατανομημένες μεταξύ των ενεργειακών τεχνολογιών.



Γράφημα 3-9: Μηχανισμοί τεχνολογικής προόδου στο μοντέλο

Υπάρχουν επαρκείς αποδείξεις¹¹ ότι ο μηχανισμός αυτός είναι μια ακριβής και αξιόπιστη αναπαράσταση του τρόπου που η τεχνική πρόοδος έχει συμβεί στο παρελθόν. Η στοχαστική μεθοδολογία με βάση την καμπύλη μάθησης TFLC αποτυπώνει την εγγενή αβεβαιότητα που υπάρχει στην συσχέτιση των επενδύσεων σε R&D με τις αντίστοιχες τεχνολογικές βελτιώσεις. Ο ΠΡΟΜΗΘΕΑΣ ενσωματώνει επίσης την έννοια του τεχνικού δυναμικού (floor cost), δηλαδή ενός κατώτατου ορίου (κατώφλι) το οποίο όταν ξεπεραστεί δεν υπάρχει η δυνατότητα περαιτέρω τεχνολογικής βελτίωσης, όπως προκύπτει από την ανάλυση τεχνολογικών προοπτικών που υπάρχει στη βάση δεδομένων TECHPOL. Τα οικονομικά στοιχεία των τεχνολογιών στο έτος βάσης προέρχονται από την βάση δεδομένων του μοντέλου PRIMES και τη βάση δεδομένων TECHPOL, οι οποίες έχουν παραχθεί από χρηματοδοτούμενα από την ΕΕ ερευνητικά προγράμματα (όμως δεν είναι διαθέσιμες ελεύθερα). Η τεχνική πρόοδος οδηγεί στη βελτίωση των οικονομικών και τεχνικών χαρακτηριστικών και τη μείωση του συνολικού κόστους των ενεργειακών τεχνολογιών, δηλαδή του κόστους κεφαλαίου, του σταθερού και μεταβλητού κόστους λειτουργίας και στην αύξηση της τεχνικής απόδοσης.

Ο ΠΡΟΜΗΘΕΑΣ βελτιώνει την παραδοσιακή αναπαράσταση μέσω της καμπύλης μάθησης δυο παραγόντων, ενσωματώνοντας αποτελέσματα λόγω συμπλέγματος τεχνολογιών (cluster), τα οποία είναι απαραίτητα σε περιπτώσεις γρήγορου και δραστικού μετασχηματισμού του ενεργειακού συστήματος. Η βασική ιδέα είναι ότι η τεχνολογική πρόοδος προς μια συγκεκριμένη κατεύθυνση ενισχύει την μείωση του κόστους παρόμοιων τεχνολογιών, σε βαθμό που εξαρτάται από την «εγγύτητα» τους. Ένα σύμπλεγμα ορίζεται ως μια ομάδα τεχνολογιών που μοιράζονται ένα κοινό συστατικό, π.χ. οι τεχνολογίες παραγωγής ηλεκτρισμού από αιολική ενέργεια (on-shore και off-shore) έχουν κοινό συστατικό την τεχνολογία των ανεμογεννητριών, τα ηλεκτρικά και τα plug-in υβριδικά αυτοκίνητα μοιράζονται την τεχνολογία των ηλεκτρικών μπαταριών, οι τεχνολογίες υδρογόνου έχουν κοινό συστατικό τις κυψέλες καυσίμου κλπ. Οι ενεργειακές τεχνολογίες μπορούν να ανήκουν σε διαφορετικές ομάδες (clusters), όταν αποτελούνται από περισσότερα του ενός συστατικά, π.χ. η τεχνολογία συνδυασμένου κύκλου με φυσικό αέριο αποτελεί μέρος τριών τεχνολογικών συμπλεγμάτων: του αεριοστρόβιλου, του αμοστρόβιλου (τουρμπίνα ατμού) και του

¹¹ Αυτό έχει επιβεβαιωθεί από οικονομετρικές εκτιμήσεις που έχουν πραγματοποιηθεί σε ένα σχετικά μεγάλο δείγμα παρατηρήσεων και ενεργειακών τεχνολογιών

λέβητα ανάκτησης θερμότητας. Το κοινό συστατικό θεωρείται ότι είναι η τεχνολογία εκμάθησης και κάθε συστατικό της τεχνολογίας έχει τις δικές του προδιαγραφές και παραμέτρους μάθησης.

Πιο συγκεκριμένα, έστω ότι ο δείκτης i συμβολίζει μια τεχνολογία και c είναι ένα πλέγμα τεχνολογιών (cluster). Η μεταβλητή $cc_{k,t}$ συμβολίζει το κόστος κεφαλαίου της τεχνολογίας k την χρονική περίοδο t , το $K_{k,t}$ αντιπροσωπεύει την εγκατεστημένη ισχύ της τεχνολογίας i την χρονική περίοδο t και η μεταβλητή $R_{k,t}$ τις αθροιστικές επενδύσεις σε R&D (που περιλαμβάνουν το δημόσιο και το ιδιωτικό R&D) οι οποίες έχουν πραγματοποιηθεί για την τεχνολογία i μέχρι την χρονική περίοδο t . Η γενική διατύπωση των εξισώσεων για τις καμπύλες τεχνολογικής εκμάθησης με δυο παράγοντες όπως έχουν εκτιμηθεί στο μοντέλο είναι η παρακάτω:

$$cc_{k,t} = cc_{k,t-1} \prod_{c=1}^l \left(\frac{cl_{c,t}}{cl_{c,t-1}} \right)^{r_{k,c} a_{k,t}} \left(\frac{K_{k,t-1}}{K_{k,t-2}} \right)^{\rho_{k,t} (1 - \sum_{c=1}^l r_{k,c})} \left(\frac{R_{k,t-1}}{R_{k,t-2}} \right)^{\sigma_{k,t}} e^{u_{k,t}} \quad (22)$$

Όπου έχουμε ορίσει την παρακάτω μεταβλητή σαν τον σταθμισμένο μέσο όρο της εγκατεστημένης ισχύος των τεχνολογιών που ανήκουν στο σύμπλεγμα c .

$$cl_{c,t} = \sum_{k=1}^n x_{k,c} \cdot K_{k,t-1} \quad (23)$$

Στον παραπάνω προσδιορισμό της τεχνολογικής προόδου στο μοντέλο, οι παράμετροι εκμάθησης είναι οι $\rho_{k,t}$ (μέσω εμπειρίας) και $\sigma_{k,t}$ (μέσω επενδύσεων σε έρευνα), ενώ το $u_{k,t}$ αντιπροσωπεύει μια τυχαία διαταραχή (όρος σφάλματος) με μηδενική μέση τιμή (λευκός θόρυβος). Κάθε τεχνολογία k έχει ένα στάθμισμα-βάρος $x_{k,c}$ σε κάθε τεχνολογικό σύμπλεγμα που συμμετέχει, το οποίο αντιπροσωπεύει την σημασία της γενικής τεχνολογίας του συμπλέγματος στην δομή του συνολικού κόστους της τεχνολογίας i . Επιπλέον, ορίζεται μια επιπλέον στάθμιση $r_{k,c}$, η οποία αντανακλά την σημασία του συστατικού που ανήκει στο σύμπλεγμα c για κάθε τεχνολογία k και έχει προσαρμοστεί ως προς το ρυθμό μάθησης του συμπλέγματος c .

Συνολικά, ο PROMHΘΕΑΣ περιέχει εξισώσεις εκμάθησης δυο παραγόντων (TFLC) για τις παρακάτω ενεργειακές τεχνολογίες:

- Παράμετροι κόστους κεφαλαίου για 44 τεχνολογικές επιλογές
- Σταθερά λειτουργικά κόστη και κόστη συντήρησης για 34 τεχνολογίες με βάση την αύξηση της αυτοματοποίησης, την αξιοπιστία και τις οικονομίες κλίμακας
- Παράμετροι μεταβλητού κόστους για 7 τεχνολογίες
- Παράμετροι απόδοσης για 20 τεχνολογίες

Όσον αφορά τα συμπλέγματα τεχνολογιών, η προσπάθεια στον ΠΡΟΜΗΘΕΑ έχει αφιερωθεί στο να τυποποιηθούν στον μεγαλύτερο δυνατό βαθμό οι ενεργειακές τεχνολογίες, οι οποίες έχουν ταξινομηθεί σε τέσσερις κατηγορίες:

1. Οι τεχνολογίες που ανήκουν σε ένα σύμπλεγμα
2. Οι τεχνολογίες που δεν ανήκουν σε κανένα σύμπλεγμα (stand-alone technologies), οι οποίες δεν ταξινομούνται σε κανένα τεχνολογικό *cluster*
3. Οι τεχνολογίες τέλειου συμπλέγματος, τα τεχνικά και οικονομικά χαρακτηριστικά των οποίων συνδέονται απευθείας μεταξύ τους (πχ οι τεχνολογίες με ανεμογεννήτριες στην στεριά και υπεράκτιες).
4. Οι τεχνολογίες υδρογόνου με κυψέλες καυσίμου

Στην πρώτη κατηγορία ανήκουν οι παρακάτω 19 τεχνολογίες (κυρίως τεχνολογίες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας)

Technology Description	Technology Short Name
Large Hydro	hyd
Nuclear (2nd and 3d gen.)	nuc
New Nuclear (4th gen.)	nnd
Lignite Conventional Thermal	lct
Coal Conventional Thermal	cct
Supercritical Pulverised Coal	pfc
Integrated Coal Gasification	icg
Oil Conventional Thermal	oct
Oil fired Open Cycle Gas Turbine	ogc
Gas Conventional Thermal	gct
Gas Turbine Open Cycle	ggt
Gas Turbine Combined Cycle	ggc
Cogeneration from gas	chp
Small Hydro (<25MW)	shy
Solar Thermal Power Plant Cyllindro-Parabolic	spp
Building Integrated PV	dpv
Biomass Thermal	bf2
Biomass Gasification plus Combined Cycle	bgt
Hydrogen from Coal Partial Oxidation	cpo
Hydrogen from Biomass Pyrolysis	bpy

Πίνακας 3-4: Ενεργειακές τεχνολογίες που ανήκουν σε ένα σύμπλεγμα -cluster

Παρακάτω παρουσιάζεται ο πίνακας W (Πίνακας 3-5), ο οποίος περιέχει τα βάρη κάθε συστατικού στο συνολικό κόστος της κάθε τεχνολογίας. Στις στήλες του πίνακα έχουν τοποθετηθεί τα συμπλέγματα τεχνολογιών του ΠΡΟΜΗΘΕΑ (ατμοστρόβιλος, αεριοστρόβιλος, μπόιλερ, CCS, αεριοποιητής, υδροηλεκτρική τουρμπίνα, ανεμογεννήτρια, πυρηνικός αντιδραστήρας και επεξεργασία βιομάζας), ενώ στις σειρές αναπαρίστανται οι ενεργειακές τεχνολογίες του μοντέλου.

	Steam turbine	Gas turbine	Boiler	Recovery CC boiler	Gasifier	Hydro turbine	Nuclear reactor	Biomass processing
HYD						1		
NUC	1						1	
NND	1						1	
LCT	1		1					
CCT	1		1					
PFC	1		1					
ICG	0.4	0.6		0.4	1			
OCT	1		1					
OGC		1						
GCT	1		1					
GGT		1						
GGC	0.33	0.67		0.33				
SHY						1		
SPP	1							
BF2								1
BGT	0.4	0.6		0.4	1			1
BPY					0.5			0.5

Πίνακας 3-5: Ο πίνακας τεχνολογικών συμπλεγμάτων W που χρησιμοποιείται στο μοντέλο

Οι τεχνολογίες που δεν ανήκουν σε κανένα σύμπλεγμα και συνεπώς στην τεχνική τους πρόοδο δεν παίζει ρόλο η μεταβλητή $cl_{c,t}$ των εξισώσεων (18) και (19) είναι οι εξής: φωτοβολταϊκα, ανεμογεννήτριες, συμβατικά επιβατικά αυτοκίνητα, οι εναλλακτικές τεχνολογίες δέσμευσης διοξειδίου του άνθρακα (pre-combustion, post-combustion και oxyfuel) και η παραγωγή υδρογόνου από ηλεκτρόλυση. Στην τρίτη κατηγορία (τέλειου συμπλέγματος), ανήκουν οι εξής τεχνολογίες:

- Τα κόστη των υπεράκτιων αιολικών πάρκων είναι απόλυτα συσχετισμένα με το κόστος των ανεμογεννητριών
- Το κόστος και η τεχνική απόδοση των ηλεκτρικών αυτοκινήτων με μπαταρίες και των plug-in υβριδικών
- Τα υβριδικά αυτοκίνητα συνδέονται με την τεχνική πρόοδο τόσο των συμβατικών όσο και των ηλεκτρικών αυτοκινήτων
- Οι τεχνολογίες παραγωγής ηλεκτρισμού και υδρογόνου που χρησιμοποιούν συγκεντρωμένη ηλιακή ενέργεια (SHT and SPP) και πυρηνική ενέργεια (NHT and NUC) είναι εξαρτημένες μεταξύ τους
- Οι τεχνολογίες ηλεκτρόλυσης για παραγωγή υδρογόνου μέσω του ηλεκτρικού δικτύου, μέσω ανεμογεννητριών και από πυρηνικούς σταθμούς

Στην τελευταία κατηγορία ανήκουν οι τεχνολογίες με κυψέλες υδρογόνου που χρησιμοποιούνται για να καλύψουν την μελλοντική ζήτηση για υδρογόνο στην βιομηχανία, στα νοικοκυριά και στις οδικές μεταφορές. Στο μοντέλο υπάρχει μια ενιαία εξίσωση για το κεφαλαιουχικό κόστος των κυψελών καυσίμου, η οποία προβλέπει την εξέλιξη του κόστους τους με βάση την συνολική εγκατεστημένη ισχύ σε όλους τους

κλάδους. Από την άλλη τα κόστη λειτουργίας και ο βαθμός απόδοσης των τεχνολογιών διαφοροποιούνται ανάλογα με την συγκεκριμένο κλάδο και την τελική χρήση.

Ο ρυθμός εκμάθησης ορίζεται ως το ποσοστό μείωσης του κόστους των τεχνολογιών που επιτυγχάνεται σε κάθε διπλασιασμό της εγκατεστημένης ισχύος ή/και των αθροιστικών επενδύσεων σε έρευνα και ανάπτυξη. Οι οικονομετρικές εκτιμήσεις για τους ρυθμούς εκμάθησης των ενεργειακών τεχνολογιών, οι οποίες έχουν μεγάλες δυνατότητες μείωσης του κόστους τους και βρίσκονται στα αρχικά στάδια εμπορικής διεύθυνσης, έχουν συμπληρωθεί από εκτιμήσεις από εκτενή βιβλιογραφική αναδρομή [121], [122]. Οι τεχνολογίες αυτές είναι κυρίως οι ΑΠΕ για ηλεκτροπαραγωγή (πχ ανεμογεννήτριες, φωτοβολταϊκά και ηλιακά θερμικά), οι τεχνολογίες δέσμευσης και αποθήκευσης διοξειδίου του άνθρακα (CCS) και οι μπαταρίες για τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα. Ο Πίνακας 3-6 παρουσιάζει τις μέσες τιμές για τους ρυθμούς εκμάθησης των παραπάνω τεχνολογιών μέσω εμπειρίας και επενδύσεων σε έρευνα και ανάπτυξη (μέσες τιμές της αντίστοιχης εκτιμημένης καμπύλης πιθανοτήτων).

Τεχνολογίες παραγωγής ηλεκτρισμού	Εκμάθηση μέσω εμπειρίας	Εκμάθηση μέσω επενδύσεων σε R&D
Ανεμογεννήτριες	0.09	0.09
Φωτοβολταϊκά συστήματα	0.17	0.12
Τεχνολογίες CCS	0.07	0.07
Ηλεκτρικά αυτοκίνητα	0.09	0.12
Ηλιακά θερμικά	0.11	0.09
Πυρηνικοί σταθμοί	0.02	0.015
Τεχνολογία αεριοποίησης	0.04	0.03
Τεχνολογίες βιομάζας	0.04	0.02

Πίνακας 3-6: Ρυθμοί εκμάθησης για τις σημαντικότερες τεχνολογίες ηλεκτροπαραγωγής

Λαμβάνοντας υπόψη το γεγονός ότι η τεχνολογική αλλαγή είναι μια διαδικασία που χαρακτηρίζεται από θεμελιώδη αβεβαιότητα, σημαντικές παράμετροι που καθορίζουν τις επιπτώσεις των επενδύσεων σε R&D για την ανάπτυξη των ενεργειακών τεχνολογιών και την εξέλιξη του κόστους τους έχουν μοντελοποιηθεί ρητώς. Οι παράμετροι των καμπυλών μάθησης δυο παραγόντων στον ΠΡΟΜΗΘΕΑ είναι από κοινού κατανομημένες τυχαίες μεταβλητές και συνδιακυμαίνονται. Οι προβολές που έχουν αναπτυχθεί με τον ΠΡΟΜΗΘΕΑ (στοχαστικές ή ντετερμινιστικές) ενσωματώνουν επίσης τις αβεβαιότητες σχετικά με το μέγεθος και την κατεύθυνση των επενδύσεων σε R&D που σχετίζεται με την ενέργεια, οι οποίες είναι ενδογενείς. Αναλύοντας τις ιστορικές παρατηρήσεις του R&D για τις ενεργειακές τεχνολογίες και χρησιμοποιώντας ανάλυση τεχνολογικών προοπτικών, το μοντέλο περιλαμβάνει εξισώσεις που συνδέουν τις επενδύσεις σε R&D με οικονομικούς παράγοντες, όπως η αύξηση του ΑΕΠ και το συνολικό κόστος της ενέργειας για τους τελικούς καταναλωτές σε κάθε περιοχή.

3.8.2 Προσαρμογή των τεχνο-οικονομικών στοιχείων στο μοντέλο

Από την φύση του υποδείγματος που χρησιμοποιεί ευρέως τεχνικές οικονομετρίας, το μοντέλο έχει σχεδιαστεί έτσι ώστε να είναι προσαρμοσμένο στα ιστορικά δεδομένα για την χρονική περίοδο πριν το 2010. Σε ορισμένες περιπτώσεις ο ορίζοντας έχει επεκταθεί ώστε να καλύπτει για κάποιες βασικές μεταβλητές του ενεργειακού συστήματος την περίοδο μέχρι το 2013 (ή την τελευταία χρονιά για την οποία υπάρχουν διαθέσιμα στατιστικά στοιχεία). Οι κυριότερες βάσεις δεδομένων που χρησιμοποιεί ο ΠΡΟΜΗΘΕΑΣ είναι η ENERDATA για τις ενεργειακές καταναλώσεις και τις τεχνολογίες ηλεκτροπαραγωγής (<http://www.enerdata.net/>), η IEA για αναλυτικά ενεργειακά ισοζύγια (<http://www.iea.org/statistics/>), η EUROSTAT για τις ενεργειακές και μακροοικονομικές μεταβλητές για τις χώρες της Ευρωπαϊκής Ένωσης (<http://ec.europa.eu/eurostat>), η βάση δεδομένων EDGAR για τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα ανά περιοχή (<http://edgar.jrc.ec.europa.eu/>), βάσεις δεδομένων για δημογραφικά και μακροοικονομικά δεδομένα και προβλέψεις των χωρών εκτός ΕΕ (<http://esa.un.org/wpp/>, <http://data.worldbank.org/> και www.imf.org/external). Οι υποθέσεις για τα κόστη των ενεργειακών τεχνολογιών καθορίζονται από τις βάσεις δεδομένων TECHPOL και PRIMES database (μη διαθέσιμη ελεύθερα). Το συνολικό κόστος των τεχνολογιών συμπεριλαμβάνει το κεφαλαιουχικό κόστος, τα σταθερά και μεταβλητά κόστη λειτουργίας και συντήρησης, το κόστος αποξήλωσης του σταθμού, τον βαθμό τεχνικής απόδοσης των τεχνολογιών, την διαθεσιμότητά τους (βαθμός χρησιμοποίησης) και επιπρόσθετες πληροφορίες διάρκεια ζωής, χρόνος κατασκευής, ενδεικτικό κόστος χρησιμοποιούμενου καυσίμου κλπ.). Ο Πίνακας 3-7 παρουσιάζει το κεφαλαιουχικό κόστος των σημαντικότερων τεχνολογιών ηλεκτροπαραγωγής του υποδείγματος το 2010.

Τεχνολογίες παραγωγής ηλεκτρική ενέργειας	Κόστος σε € 2010/kW
Συμβατικός σταθμός άνθρακα	1500
Άνθρακας σε υπερκριτική θερμοκρασία	1770
Ολοκληρωμένη αεριοποίηση άνθρακα	2760
Συμβατικός σταθμός φυσικού αερίου	1600
Σταθμός συνδυασμένου κύκλου με φυσικό αέριο	850
Σταθμός πετρελαίου	1500
Πυρηνικός σταθμός 2ης/3ης γενιάς	3500
Μεγάλα υδροηλεκτρικά	2310
Αιολικά πάρκα στην στεριά	1430
Υπεράκτια αιολικά πάρκα	3500
Φωτοβολταικά	1860
Θερμικά ηλιακά	5800
Συμβατικός σταθμός βιομάζας	2600

Πίνακας 3-7: Κεφαλαιουχικό κόστος τεχνολογιών ηλεκτροπαραγωγής το 2010

Για την προσαρμογή των μεταβλητών στις ιστορικές τιμές του έτους βάσης, πραγματοποιείται προσαρμογή συγκεκριμένων παραμέτρων του μοντέλου ώστε αυτό

να αναπαράγει με ακρίβεια τόσο τα ενεργειακά ισοζύγια των παρελθόντων ετών (ζήτηση ανά κλάδο και καύσιμο, δομή ηλεκτροπαραγωγής, παραγωγή ενέργειας) όσο και το κόστος και τις τιμές των διάφορων ενεργειακών προϊόντων (τελικές τιμές για τους καταναλωτές, διεθνείς τιμές καυσίμων). Συνήθως, οι παράμετροι των εξισώσεων του μηχανισμού υποκατάστασης και επενδύσεων των τεχνολογιών μεταβάλλονται για να αναπαραστήσουν την ιστορική εξέλιξη των αντίστοιχων ενεργειακών μεταβλητών, π.χ. στο μοντέλο ηλεκτροπαραγωγής, οι τιμές των παραμέτρων w της εξίσωσης επιλογής τεχνολογιών (6) μεταβάλλονται έτσι ώστε να αναπαραστήσουν τα ιστορικά δεδομένα για την διάρθρωση της ηλεκτροπαραγωγής ανά χώρα. Το συνολικό κόστος για την παραγωγή ηλεκτρισμού που προκύπτει από το σταθμισμένο κόστος των τεχνολογιών επιδρά στις τιμές της ηλεκτρικής ενέργειας για τους τελικούς καταναλωτές. Τα αποτελέσματα της προσαρμογής ελέγχονται με βάση συγκεκριμένες μελέτες, ενώ γίνεται η χρήση άνω και κάτω ορίων για να αποδοθούν διαφορές ανά περιοχή του ΠΡΟΜΗΘΕΑ και για να εξαχθούν οι κατά το δυνατόν πιο ρεαλιστικές τιμές για τις ενδογενείς μεταβλητές του συστήματος.

3.9 Προσομοίωση ενεργειακών και κλιματικών πολιτικών

Στην παρούσα ενότητα περιγράφεται η υλοποίηση συγκεκριμένων μέτρων και ενεργειακών, τεχνολογικών και κλιματικών πολιτικών στο πλαίσιο του μοντέλου. Ο σκοπός των πολιτικών είναι να επηρεάσουν τις αποφάσεις των παραγόντων του ενεργειακού συστήματος και να οδηγήσουν σε οικονομικά αποδοτική, ασφαλή, βιώσιμη και φιλική στο περιβάλλον μακροχρόνια εξέλιξη του παγκόσμιου συστήματος ενέργειας. Οι πολιτικές επηρεάζουν την συμπεριφορά και τις προτιμήσεις όλων των παραγόντων του συστήματος (εταιρείες ηλεκτροπαραγωγής, ιδιώτες καταναλωτές, πάροχοι υποδομών, βιομηχανίες) με σκοπό την διαφοροποίηση των μελλοντικών εξελίξεων από τις μακροχρόνιες τάσεις.

3.9.1 Εσωτερικοποίηση του εξωτερικού κόστους των εκπομπών (φόρος στο διοξείδιο του άνθρακα)

Η παραγωγή και η κατανάλωση ενέργειας επιφέρουν αρνητικές συνέπειες στο φυσικό περιβάλλον και στην κοινωνία σαν αποτέλεσμα των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα, το οποίο παγιδεύει την ηλιακή θερμότητα στην γήινη ατμόσφαιρα και συμβάλλει έτσι στο φαινόμενο του θερμοκηπίου. Οι πιο σημαντικές περιβαλλοντικές συνέπειες αφορούν την κλιματική αλλαγή εξαιτίας της επακόλουθης αύξησης της μέσης παγκόσμιας θερμοκρασίας, την ατμοσφαιρική ρύπανση (μικροσωματίδια, οξείδια του αζώτου, μονοξείδιο του άνθρακα κ.α.), την μόλυνση των υδάτινων αποθεμάτων, τους κινδύνους για την βιοποικιλότητα και την διατροφική ασφάλεια. Ο φόρος άνθρακα αποτελεί έναν περιβαλλοντικό φόρο που επιβάλλεται στις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα με σκοπό τη μείωση του CO₂ από ενεργειακές, βιομηχανικές και χρήσεις γης, συμβάλλοντας έτσι στην άμβλυνση της κλιματικής αλλαγής. Η ιδέα για τη δημιουργία μιας διεθνούς αγοράς άνθρακα βασίστηκε στο ότι η συγκέντρωση του άνθρακα είναι (σχεδόν) η ίδια σε κάθε μέρος του κόσμου μια δεδομένη στιγμή. Αυτό το

χαρακτηριστικό κάνει την αγορά του άνθρακα μοναδική, αφού εμπορεύεται ένα παγκόσμιο δημόσιο αγαθό, η παραγωγή του οποίου όμως είναι ιδιωτική και τοπική.

Οι παραπάνω αρνητικές επιπτώσεις (*negative externalities*) συνήθως δεν επιβαρύνουν άμεσα αυτούς που τις προκαλούν (εργοστάσια παραγωγής ηλεκτρισμού, βιομηχανίες) και συνεπώς δεν λαμβάνονται υπόψη κατά τη λήψη αποφάσεων των παραγόντων του ενεργειακού συστήματος. Ο φόρος άνθρακα είναι ένας έμμεσος φόρος που βασίζεται στην οικονομική αρχή των αρνητικών εξωτερικοτήτων, οι οποίες είναι δαπάνες ή κέρδη που προκαλούνται από την παραγωγή αγαθών και υπηρεσιών και δεν πληρώνονται. Όταν οι επιχειρήσεις ή οι ιδιώτες καταναλωτές καταναλώνουν ορυκτά καύσιμα, εκπέμπουν διοξείδιο του άνθρακα και δημιουργούν ρύπανση που έχει ένα κοινωνικό παγκόσμιο κόστος, μέσω της αύξησης των ατμοσφαιρικών συγκεντρώσεων άνθρακα. Μάλιστα, αρκετές μελέτες έχουν δείξει ότι μερικά από τα αποτελέσματα της κλιματικής αλλαγής (αύξηση στάθμης του νερού, ξηρασία, ερημοποίηση, έντονες βροχοπτώσεις) θα είναι εντονότερα σε περιοχές του κόσμου με ιδιαίτερα χαμηλές εκπομπές άνθρακα, όπως οι αναπτυσσόμενες οικονομίες της Ασίας και της Αφρικής [123]. Η επιβολή του φόρου άνθρακα οδηγεί σε αύξηση της τιμής των ορυκτών καυσίμων και εσωτερικεύει την αρνητική εξωτερικότητα των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα στην απόφαση όλων των ενεργειακών καταναλωτών, σύμφωνα με την αρχή «ο ρυπαίνων πληρώνει». Ο όρος εσωτερικοποίηση αναφέρεται στο γεγονός ότι η επιβολή του φόρου άνθρακα οδηγεί τους παράγοντες του ενεργειακού συστήματος να λαμβάνουν υπόψη το κόστος των εκπομπών άνθρακα στις αποφάσεις τους. Η εσωτερικοποίηση του εξωτερικού κόστους οδηγεί στη μείωση των αρνητικών επιπτώσεων και στην απόδοση δικαιοσύνης μεταξύ των πρακτόρων (*agents*). Ο τρόπος που μπορεί να γίνει αυτή η εσωτερικοποίηση είναι είτε μέσω ρύθμισης (*command and control measures*) είτε άμεσα μέσω μηχανισμών της αγοράς όπως η φορολογία (φόρος στο CO₂, ειδικός φόρος στα καύσιμα).

Κατά την καύση άνθρακα, πετρελαίου και φυσικού αερίου, άτομα CO₂ απελευθερώνονται στην ατμόσφαιρα, σε αντίθεση με πηγές ενέργειας όπως η πυρηνική και οι ΑΠΕ. Ο φόρος άνθρακα εφαρμόζεται μέσω της φορολόγησης της καύσης ορυκτών καυσίμων σε αναλογία με το περιεχόμενο τους σε άνθρακα, αυξάνοντας συνεπώς την ανταγωνιστικότητα των τεχνολογιών με χαμηλή περιεκτικότητα σε άνθρακα (ΑΠΕ, CCS). Η φορολόγηση του διοξειδίου του άνθρακα πραγματοποιείται ήδη στην Ευρωπαϊκή Ένωση μέσω του συστήματος εμπορίας ρύπων (*Emissions Trading System*) για τις ενεργοβόρες βιομηχανίες και για την ηλεκτροπαραγωγή. Αντίθετα, δεν έχει θεσπιστεί φόρος για τους υπόλοιπους τομείς της οικονομίας (π.χ. νοικοκυριά, μεταφορές) εξαιτίας του μεγάλου πλήθους ιδιωτικών καταναλωτών αλλά με λίγες εκπομπές, οι οποίες δεν είναι εύκολο να κατανεμηθούν αξιόπιστα σε αυτούς που τις εκπέμπουν. Τα τελευταία χρόνια, εκτός από τη ΕΕ, αρκετές ακόμα περιοχές σχεδιάζουν να θεσμοθετήσουν συστήματα φορολόγησης που βασίζονται σε μηχανισμούς της αγοράς (Καλιφόρνια, Αυστραλία) και καλύπτουν κυρίως τις εκπομπές άνθρακα από την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και τις βιομηχανίες υψηλής ενεργειακής έντασης.

Συνήθως στις διεθνείς διαπραγματεύσεις για το κλίμα αλλά και στα μοντέλα ενέργειας-οικονομίας, οι κλιματικοί στόχοι τίθενται σε όρους μείωσης των συνολικών εκπομπών άνθρακα σε σχέση με ένα έτος βάσης. Κύριο πρόβλημα αποτελεί η κατανομή του συνολικού στόχου μείωσης των εκπομπών CO₂ ανά τομέα και ανά χώρα έτσι ώστε να ελαχιστοποιείται το αθροιστικό κόστος μείωσης των εκπομπών, όταν γνωρίζουμε ότι κάθε κλάδος έχει διαφορετική καμπύλη οριακού κόστους μείωσης των εκπομπών. Η λύση είναι η εξίσωση των λεγόμενων «τιμών διοξειδίου του άνθρακα» σε όλους τους τομείς και τις χώρες. Η τιμή του άνθρακα ισούται με το οριακό κόστος μείωσης των εκπομπών και είναι ίση με τη διττή αξία ή τη σκιώδη τιμή του περιορισμού μείωσης στις συνολικές εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα.

Ας εξετάσουμε μια θεωρητική/υποθετική κατάσταση στην οποία οι ενεργειακές υπηρεσίες παρέχονται από μια επιχείρηση (π.χ. παροχή ηλεκτρικού ρεύματος), η οποία εφαρμόζει μια συνηθισμένη πρακτική τιμολόγηση των υπηρεσιών με βάση το οριακό κόστος, το οποίο περιλαμβάνει την αξία των εκπομπών άνθρακα, ενώ η επιχείρηση βρίσκεται υπό τον πλήρη περιορισμό μείωσης των εκπομπών. Ας υποθέσουμε ότι η επιχείρηση λειτουργεί με μηδενικό κέρδος (πιο σωστά μηδενικό *super-normal* κέρδος) στο σενάριο αναφοράς, το οποίο δεν περιλαμβάνει περιορισμό στις εκπομπές. Όταν εφαρμόζεται ο περιορισμός εκπομπών άνθρακα, το οριακό κόστος αυξάνεται όχι μόνο εξαιτίας του διαφορετικού μίγματος καυσίμων που είναι πιο ακριβό από το σενάριο αναφοράς, αλλά και εξαιτίας της τιμής του άνθρακα (η σκιώδης τιμή του περιορισμού των εκπομπών). Αν η επιχείρηση τιμολογεί τις παρεχόμενες υπηρεσίες στο οριακό κόστος, θα συλλέξει έσοδα και για την αξία του διοξειδίου του άνθρακα, παρότι η εταιρεία δεν πληρώνει απευθείας για εκπομπές. Συνεπώς, το κέρδος της επιχείρησης θα είναι μεγαλύτερο από το μηδέν; με άλλα λόγια, η επιχείρηση θα εισπράξει κέρδη εις βάρος των τελικών ενεργειακών καταναλωτών. Συνεπώς, η τιμολόγηση οριακού κόστους δεν οδηγεί στη βέλτιστη κατανομή της μείωσης των εκπομπών ανάμεσα σε καταναλωτές και παραγωγούς: η μεγιστοποίηση της ευημερίας των καταναλωτών είναι μεγαλύτερη αν το *super-normal* κέρδος των παραγωγών δινόταν πίσω στους καταναλωτές για να τους επιτρέψει να αυξήσουν την ευημερία τους. Παρόλα αυτά, σύμφωνα με την μικροοικονομία, μακροπρόθεσμα η ελεύθερη είσοδος-έξοδος των επιχειρήσεων στην αγορά τείνει να εξισώσει την οριακή με την μέση κοστολόγηση, έτσι ώστε οι παραγωγοί να έχουν μηδενικά κέρδη. Το μέσο κόστος, εξ ορισμού, δεν περιλαμβάνει άμεσες πληρωμές άνθρακα και έτσι οι τιμές των ενεργειακών υπηρεσιών είναι χαμηλότερες σε σύγκριση με την τιμολόγηση οριακού κόστους, με αποτέλεσμα οι καταναλωτές να αυξήσουν την ωφέλειά τους.

Σε ένα υποθετικό σενάριο, με εισαγωγή φόρου για το διοξείδιο του άνθρακα, η καμπύλη ζήτησης τείνει να μετατοπιστεί πιο αριστερά (σε σύγκριση με το σενάριο μηδενικού φόρου άνθρακα) εξαιτίας της μεταβολής του μίγματος καυσίμων. Η τιμολόγηση οριακού κόστους της παρεχόμενης ενέργειας συνεπάγεται υψηλότερη τιμή (και συνεπώς χαμηλότερο κοινωνικό πλεόνασμα και χαμηλότερη ζήτηση) σε σύγκριση με την περίπτωση τιμολόγησης μέσου κόστους. Συνεπώς, στον ΠΡΟΜΗΘΕΑ κρίθηκε

απαραίτητο να χρησιμοποιήσουμε τιμολόγηση μέσου κόστους για να υπολογιστεί η κατανομή της προσπάθειας μείωσης των εκπομπών ανά περιοχή και τομέα.

Οι τιμές διοξειδίου του άνθρακα που χρησιμοποιούνται στον ΠΡΟΜΗΘΕΑ δεν πρέπει να συνδέονται με συγκεκριμένα μέσα πολιτικής, όπως η φορολόγηση των εκπομπών ή συστήματα εμπορεύσιμων πιστοποιητικών (*cap and trade*). Οι τιμές του άνθρακα δεν επηρεάζουν άμεσα το κόστος των εκπομπών και δεν έχουν καμία επίδραση στα δημόσια έσοδα. Από την άλλη, παρέχουν μια αντίληψη ότι η τιμολόγηση της χρήσης ορυκτών καυσίμων πρέπει να περιλαμβάνει την αξία των εκπομπών άνθρακα και συνεπώς μεταβάλλουν το σχετικό κόστος των καυσίμων και μορφών ενέργειας. Οι επιπτώσεις στη συμπεριφορά των ενεργειακών καταναλωτών θα είναι κυρίως η υποκατάσταση μεταξύ των καυσίμων με επιπτώσεις στο συνολικό κόστος της ενέργειας (εξαιτίας της χρήσης πιο ακριβών καυσίμων και τεχνολογιών και όχι εξαιτίας οποιασδήποτε μορφής άμεσης πληρωμής για τις εκπομπές άνθρακα ή *super-normal* κερδών λόγω του περιορισμού στις εκπομπές). Η συνολική ενεργειακή κατανάλωση μειώνεται μόνο εξαιτίας του ακριβότερου μίγματος καυσίμων και τεχνολογιών.

Συνεπώς, οι τιμές του διοξειδίου του άνθρακα δεν επηρεάζουν άμεσα το budget των παραγωγών και καταναλωτών ενέργειας και δεν παράγουν έσοδα για την κυβέρνηση. Αντίθετα, οι φόροι άνθρακα ή η αγορά δημοπρατούμενων πιστοποιητικών (όπως στο σύστημα EU-ETS) έχουν επίδραση στα εισοδήματα. Με άλλα λόγια, και τα δύο μέσα πολιτικής οδηγούν τόσο σε υποκατάσταση μεταξύ των καυσίμων και αλλαγή του ενεργειακού μίγματος (αποτέλεσμα υποκατάστασης) όσο και σε χαμηλότερη κατανάλωση ενέργειας εξαιτίας του μεγαλύτερου κόστους (αποτέλεσμα εισοδήματος). Από την άλλη πλευρά, ο φόρος άνθρακα και η αγορά των δημοπρατούμενων πιστοποιητικών παράγουν δημόσια έσοδα που μπορούν να ανακυκλωθούν στην οικονομία και συνεπώς διαφέρουν ριζικά από τις «τιμές άνθρακα», δεδομένου ότι οι τελευταίες αποκλείουν αυστηρά κάθε άμεση πληρωμή για τις εκπομπές. Έτσι, από θεωρητική σκοπιά, ο συνδυασμός φόρων άνθρακα για ορισμένους κλάδους (π.χ. παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας) και τιμών άνθρακα για τους υπόλοιπους τομείς της οικονομίας δεν παράγει ακριβώς την ίδια κατανομή μείωσης των εκπομπών με την καθαρή χρήση μόνο τιμών διοξειδίου του άνθρακα (*carbon values*) για όλους τους τομείς. Συνεπώς, δεδομένου ότι ο μηχανισμός ETS είναι μια πολιτική που εφαρμόζεται μόνο στην Ευρωπαϊκή Ένωση και μόνο στην ηλεκτροπαραγωγή και στις ενεργοβόρες βιομηχανίες, ο ΠΡΟΜΗΘΕΑΣ χρησιμοποιεί *carbon values* για την προσομοίωση ενός συνόλου κλιματικών πολιτικών σε όλες τις χώρες του μοντέλου, που χρησιμεύουν ως μέτρο της συνολικής προσπάθειας για μείωση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα.

3.9.2 Αναπαράσταση εναλλακτικών ενεργειακών και κλιματικών πολιτικών

Εκτός από την τιμολόγηση του άνθρακα μέσω *carbon values* (η οποία θεωρείται το πιο ευρέως χρησιμοποιούμενο μέτρο κλιματικής πολιτικής), το μοντέλο αναπαριστά μια σειρά εναλλακτικών πολιτικών για την ενέργεια, το κλίμα, την προώθηση συγκεκριμένων τεχνολογιών και την ανάπτυξη των αναγκαίων υποδομών. Ωστόσο από άποψη μοντελοποίησης τα μέτρα για την αντιμετώπιση των αδυναμιών της αγοράς ή

την άρση των φραγμών είναι εξωγενή στο μοντέλο και συνήθως συμπληρώνουν την επιβολή ενός ανώτατου ορίου εκπομπών. Η εφαρμογή των πολιτικών συνεπάγεται δαπάνες (π.χ. για επενδύσεις) οι οποίες συμπεριλαμβάνονται στο συνολικό κόστος του ενεργειακού συστήματος που χρησιμοποιείται για την αξιολόγηση των πολιτικών. Πολλά από τα παραπάνω μέτρα πολιτικής έχουν διπλό ρόλο: αντιμετώπιση των αδυναμιών της αγοράς και παράλληλα σημαντική μείωση των εκπομπών (π.χ. επιβολή υποχρέωσης εξοικονόμησης ενέργειας ή κατώτατου ορίου στην ανάπτυξη των ΑΠΕ).

Σε πολλές χώρες (και κυρίως σε περιοχές που εξάγουν υδρογονάνθρακες), ο καθορισμός των τιμών ενέργειας για τους τελικούς καταναλωτές δεν αντικατοπτρίζει το οικονομικό κόστος της απόκτησης, μεταφοράς και διανομής των καυσίμων. Η τάση αυτή είναι ιδιαίτερα έντονη όταν συγκρίνεται με το κόστος ευκαιρίας (στην περίπτωση δηλαδή που τα καύσιμα εξάγονταν). Ο ΠΡΟΜΗΘΕΑΣ υποθέτει μια σταδιακή μετάβαση σε πιο «ορθολογική» τιμολόγηση, αν και ο ρυθμός της μετάβασης ποικίλλει σημαντικά ανάλογα με την περιοχή. Σε γενικές γραμμές, τα μέτρα και οι πολιτικές εφαρμόζονται με σταδιακή και συνεχώς αυξανόμενη ένταση κατά την περίοδο 2015-2050.

Σε ένα σενάριο με περιορισμό στις εκπομπές άνθρακα, ο βαθμός βελτίωσης της ενεργειακής απόδοσης εξαρτάται από το σχετικό κόστος-αποτελεσματικότητα των μέτρων εξοικονόμησης ενέργειας. Οι επενδύσεις για την μόνωση των κτιρίων και οι δαπάνες για αγορά υψηλής ενεργειακής απόδοσης εξοπλισμού και οχημάτων αποτελούν ουσιαστικά αποφάσεις κατανομής κεφαλαίων, οι οποίες εξαρτώνται από τα υποκειμενικά προεξοφλητικά επιτόκια των καταναλωτών ενέργειας, καθώς και από τις προσδοκίες σχετικά με τις μελλοντικές επιδόσεις των τεχνολογιών. Οι επενδύσεις στις τεχνολογίες εξοικονόμησης ενέργειας συνεπάγονται εξοικονόμηση χρημάτων κατά τη διάρκεια ζωής της επένδυσης, λόγω της χαμηλότερης κατανάλωσης ενέργειας. Η ακριβής προσομοίωση πολιτικών εξοικονόμησης είναι περίπλοκη καθώς οι αποφάσεις των καταναλωτών είναι αποκεντρωμένες και υπόκεινται σε μεγάλη ποικιλία διαφορετικών συνθηκών (πχ. πρόσβαση σε τραπεζικό δανεισμό, διαθεσιμότητα κεφαλαίων και πρόσβαση σε τεχνικές πληροφορίες και υποστήριξη). Οι πολιτικές προώθησης της ενεργειακής αποτελεσματικότητας μπορούν να πάρουν ποικίλες μορφές, συμπεριλαμβανομένης της μεταρρύθμισης των τιμών (αύξηση φόρων στους τελικούς καταναλωτές ή εξάλειψη των επιδοτήσεων), φορολογικά και δημοσιονομικά κίνητρα, κανονιστικά πρότυπα, απαιτήσεις για χρήση της καλύτερης διαθέσιμης τεχνολογίας (Best Available Technology), εθελοντικές συμφωνίες με κατασκευαστές ενεργειακού εξοπλισμού, πιστοποίηση, την ενεργό διάχυση πληροφοριών σχετικά με τις διαθέσιμες ευκαιρίες εξοικονόμησης στα νοικοκυριά και στους άλλους τομείς κατανάλωσης, διαφημιστικές εκστρατείες κλπ. Ο ΠΡΟΜΗΘΕΑΣ όπως σχεδόν όλα τα παγκόσμια μοντέλα ενέργειας δεν αντιπροσωπεύει ρητώς όλους τους μηχανισμούς μέσω των οποίων λειτουργεί ένα ευρύ φάσμα μέτρων και πολιτικών εξοικονόμησης. Επιπλέον, δεν είναι δυνατό να οριστεί η δόση και η διανομή των διαφορετικών μέτρων εξοικονόμησης ενέργειας ανά τομέα/ περιοχή και χρονική περίοδο και ταυτόχρονα να διατηρηθεί η γενικότητα και η απλότητα του μοντέλου σε παγκόσμιο επίπεδο.

Ως εκ τούτου, με την εξαίρεση των πρότυπων οικονομίας καυσίμου (fuel economy standards) που εισάγονται ρητώς στο μοντέλο, η προσομοίωση των πολιτικών βελτίωσης της ενεργειακής αποδοτικότητας στηρίζεται στην οικονομική μεθοδολογία, όπου ένα επιπλέον σκιώδες κόστος (shadow cost) σχετιζόμενο με την τελική χρήση ενέργειας χρεώνεται στους καταναλωτές (ένας υποθετικός ενεργειακός φόρος). Αυτό ισοδυναμεί με την παραδοχή ότι ανεξάρτητα από τα συγκεκριμένα μέτρα, αυτά θα είναι αποδοτικά με βάση την σύγκριση κόστους-αποτελεσματικότητας εξασφαλίζοντας έτσι ελάχιστο οικονομικό κόστος για έναν δεδομένο στόχο μείωση της κατανάλωσης ενέργειας. Οι τιμές ενεργειακής αποδοτικότητας ("*efficiency values*") είναι βασικό εργαλείο μοντελοποίησης για την προσομοίωση πολιτικών εξοικονόμησης ενέργειας στους τομείς τελικής κατανάλωσης. Το *efficiency value* μετριέται σε ευρώ ανά toe που εξοικονομείται και μπορεί να θεωρηθεί ως ένα όριο κερδοφορίας όλων των τμημάτων των επενδύσεων εξοικονόμησης ενέργειας που έχουν ετήσιο κόστος οριακής εξοικονόμησης ίσο ή μικρότερο από το *efficiency value*. Στο μοντέλο, η τιμή ενεργειακής αποδοτικότητας γίνεται αντιληπτή από τους καταναλωτές ως μια εικονική οριακή τιμή που προκύπτει από την εξοικονόμηση ενέργειας: κάνει κερδοφόρα όλα τα τμήματα της γνησίως αύξουσας καμπύλης κόστους-εξοικονόμησης που βρίσκονται κάτω από αυτή την τιμή και συνεπώς επιλέγονται οι αντίστοιχες επενδύσεις εξοικονόμησης και επιτυγχάνεται μείωση της κατανάλωσης ενέργειας κατά τις επόμενες περιόδους. Οι τιμές ενεργειακής αποδοτικότητας δεν είναι όργανα πολιτικής, αλλά τα επακόλουθα ποσά εξοικονόμησης ενέργειας μπορούν να θεωρηθούν ως στόχοι ή υποχρεώσεις και χρησιμοποιούνται για την προσομοίωση του συνόλου των πολιτικών που στοχεύουν στην αύξηση της ενεργειακής απόδοσης. Οι τιμές ενεργειακής απόδοσης επιφέρουν επενδύσεις που βελτιώνουν τη θερμική ακεραιότητα και μόνωση των υφιστάμενων και των νεο-κατασκευασμένων κατοικιών και κτιρίων και οδηγούν σε ορθολογική χρήση των ενεργειακών συσκευών, σε ταχύτερο ρυθμό επενδύσεων σε ανακαινίσεις κτιρίων, καθώς και σε πιο ριζικές ανακαινίσεις από τη σκοπιά της ενεργειακής εξοικονόμησης. Στα σενάρια περιορισμού των εκπομπών, γίνεται συνήθως η υπόθεση ότι οι τιμές ενεργειακής αποδοτικότητας αυξάνονται, έτσι ώστε να αντικατοπτρίζουν την αύξηση της φιλοδοξίας των σεναρίων όσον αφορά την βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης.

Μια σειρά χωρών τα τελευταία χρόνια έχουν υιοθετήσει πολιτικές με σκοπό την αύξηση της εγκατεστημένης ισχύος των ΑΠΕ (Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας) και την μεγαλύτερη διείσδυση των ΑΠΕ στο ενεργειακό τους μίγμα [8, 125]. Ειδικά για τον τομέα της ηλεκτροπαραγωγής, το μοντέλο υποθέτει εντατικοποίηση της προώθησης των ΑΠΕ σε αρκετές περιοχές, μέσα από εναλλακτικά φορολογικά ή άλλα οικονομικά εργαλεία (π.χ. εγγυημένες τιμές- *feed-in tariffs*, επιδοτήσεις στο αρχικό κεφάλαιο κ.α.) έτσι ώστε να πετύχουν τον στόχο ΑΠΕ για το 2020. Η ένταση των πολιτικών σαφώς διαφέρει ανάλογα με την περιοχή και τις τεχνολογίες (π.χ. οι εγγυημένες τιμές είναι γενικά μεγαλύτερες στα φωτοβολταϊκά σε σύγκριση με την αιολική ενέργεια). Η διείσδυση των ΑΠΕ οδηγεί σε βελτίωση των οικονομικών και τεχνικών επιδόσεων λόγω αποτελεσμάτων εκμάθησης. Από την άλλη πλευρά, η ευρείας κλίμακας ανάπτυξη των ΑΠΕ μετά από ένα σημείο αρχίζει να οδηγεί σε αυξημένα κόστη (π.χ. το υψηλότερο

κόστος της πρώτης ύλης για την παραγωγή βιομάζας, μείωση της διαθεσιμότητας ισχύος για τις ανεμογεννήτριες καθώς οι καλύτερες τοποθεσίες έχουν εξαντληθεί κ.α.).

Η ένταση των πολιτικών ΑΠΕ σε όρους μοντελοποίησης αντικατοπτρίζεται από το οριακό κόστος για την επίτευξη των συγκεκριμένων στόχων, το οποίο μετρείται σε €/MWh. Οι τιμές των ΑΠΕ (*RES values*) είναι παράμετροι παρόμοιες με τις τιμές του άνθρακα που χρησιμοποιούνται στον ΠΡΟΜΗΘΕΑ για να αντιπροσωπεύσουν άγνωστες ακόμα πολιτικές που σχετίζονται με την προώθηση των ΑΠΕ, ώστε να επιτευχθούν οι στόχοι διείσδυσης των ΑΠΕ σε κάθε περιοχή. Εκτός από τις *RES values*, που είναι η κύρια πολιτική προώθησης των ΑΠΕ, το μοντέλο προσομοιώνει τις πολιτικές και στόχους διείσδυσης των ΑΠΕ σε κάθε περιοχή μέσω περιορισμών, εγγυημένων τιμών και επιδοτήσεων στο αρχικό κεφάλαιο της επένδυσης. Καθώς, η τεχνολογική πρόοδος είναι ενδογενής στον ΠΡΟΜΗΘΕΑ, το μοντέλο μπορεί να προσομοιάσει τα αποτελέσματα των επενδύσεων σε έρευνα και ανάπτυξη (R&D), η χρηματοδότηση των οποίων μπορεί να γίνει μέσω των εσόδων από την είσπραξη του φόρου στο διοξείδιο του άνθρακα.

Συνήθως, οι ενεργειακές πολιτικές (π.χ. πολιτικές ενεργειακής εξοικονόμησης, πρότυπα οικονομίας καυσίμου για τα επιβατικά αυτοκίνητα, προώθηση ΑΠΕ, υποδομές επαναφόρτισης μπαταριών για ηλεκτρικά οχήματα, R&D για τεχνολογίες μηδενικού άνθρακα), ενώ έχουν ως στόχο την αντιμετώπιση των ανεπαρειών της αγοράς, την ίδια στιγμή οδηγούν σε σημαντική μείωση εκπομπών άνθρακα. Θεωρητικά υπάρχει μια δυαδικότητα (ισοδυναμία) μεταξύ των παραπάνω πολιτικών και της φορολόγησης του άνθρακα. Η ισοδυναμία είναι δύσκολο να προσδιοριστεί, εάν τα bottom-up μέτρα παίζουν ρόλο στην άρση των εμποδίων εκτός από την μείωση των εκπομπών, π.χ. η υψηλότερη ένταση των πολιτικών εξοικονόμησης ενέργειας, δηλαδή μεγαλύτερες τιμές ενεργειακής αποδοτικότητας, οδηγούν σε μείωση των εκπομπών άνθρακα και συνεπώς σε χαμηλότερες τιμές άνθρακα σε σύγκριση με ένα σενάριο χωρίς μέτρα εξοικονόμησης. Η ανάπτυξη των αναγκαίων υποδομών επιτρέπει μεγαλύτερη αποτελεσματικότητα του τιμών άνθρακα, π.χ. βελτίωση δικτύου για διευκόλυνση των αποκεντρωμένων ΑΠΕ διακοπτόμενης ισχύος, έξυπνα συστήματα (π.χ. έλεγχος επαναφόρτισης μπαταριών, έξυπνη κατανομή της αποκεντρωμένης παραγωγής, έξυπνοι μετρητές που επιτρέπουν την απόκριση της ζήτησης), διασύνδεση των ηλεκτρικών συστημάτων που οδηγεί σε βέλτιστη κατανομή πόρων, υποδομή ανεφοδιασμού για τα εναλλακτικά καύσιμα και τις υποδομές μεταφοράς και αποθήκευσης CO₂ μέσω αγωγών. Αυτές οι υποδομές είναι επενδύσεις υψηλής εντάσεως κεφαλαίου, μη αναστρέψιμες (*irreversible investment*) και τα εμπόδια της αγοράς συνεπάγονται υψηλό κόστος για τα φυσικά μονοπώλια που διαχειρίζονται τις υποδομές. Συνεπώς χρειάζονται συγκεκριμένες πολιτικές για την προώθησή των υποδομών, ενώ καλή πρόβλεψη της μελλοντικής χρήσης τους σε συνδυασμό με δημόσια στήριξη είναι προϋποθέσεις που διευκολύνουν τις επενδυτικές αποφάσεις. Προφανώς, η έγκαιρη υλοποίηση των υποδομών και ο συντονισμός μεταξύ των παραγόντων της αγοράς διευκολύνει την υιοθέτηση και διάχυση τεχνολογιών και οδηγεί σε σημαντικές μειώσεις του κόστους ελάττωσης των εκπομπών. Από την άλλη πλευρά, η αδυναμία συντονισμού των παραγόντων της αγοράς (π.χ. ειδική υποδομή επαναφόρτισης ηλεκτρικών αυτοκινήτων, μείωση κόστους μπαταριών και ταυτόχρονη

υιοθέτηση τους από τους τελικούς καταναλωτές) μπορεί να οδηγήσει σε μη οικονομικά αποδοτικές επενδύσεις και αυξήσεις του κόστους μείωσης των εκπομπών άνθρακα.

Ο καθορισμός του στόχου για τη μείωση των εκπομπών και η προσπάθεια επίτευξής του μέσω των τιμών (ή φόρων) του άνθρακα μπορεί να προκαλέσει υψηλό συνολικό κόστος μείωσης των εκπομπών και να οδηγήσει σε στρεβλωτική κατανομή της μείωσης των εκπομπών στους τομείς και στις χώρες του μοντέλου. Γι' αυτό το λόγο είναι αναγκαία η ενδεδειγμένη αναπαράσταση του συνόλου των παραπάνω πολιτικών, οι οποίες όχι μόνο εξαλείφουν τις στρεβλώσεις και τα εμπόδια της αγοράς (οικονομικής και μη-οικονομικής φύσεως), αλλά συνεισφέρουν στην μείωση των εκπομπών άνθρακα και συνεπώς στην ελάττωση του κόστους περιορισμού της κλιματικής αλλαγής.

3.10 Ειδικά θέματα

3.10.1 Μοντελοποίηση προεξοφλητικού επιτοκίου

Οι παράγοντες του μοντέλου λαμβάνουν αποφάσεις υπολογίζοντας το συνολικό κόστος με βάση ένα προεξοφλητικό επιτόκιο- *discount rate* (ενότητα 3.4), το οποίο ουσιαστικά αντικατοπτρίζει την διαχρονική προτίμηση των καταναλωτών και των παραγωγών ενέργειας. Η έννοια της διαχρονικής προτίμησης είναι καθαρά υποκειμενική και εξαρτάται από την στάθμιση του αρχικού κόστους επένδυσης και του μεταβλητού κόστους λειτουργίας και συντήρησης, η οποία είναι διαφορετική ανά τομέα. Σε μαθηματικούς όρους, αυτός που αποφασίζει χρησιμοποιεί ένα συντελεστή προεξόφλησης d (μετρούμενο ως ποσοστό), ώστε να είναι αδιάφορος όταν έχει να επιλέξει ανάμεσα σε ένα σημερινό ποσό F και ενός μελλοντικού ποσού $F \cdot (1 + \delta)^{-t}$ διαθέσιμο με βεβαιότητα τον χρόνο t . Το μοντέλο υποθέτει ότι ο κάθε παράγοντας του ενεργειακού συστήματος (κλάδοι τελικών καταναλωτών, παραγωγοί ηλεκτρισμού και υδρογονανθράκων) εφαρμόζει διαφορετικό συντελεστή προεξόφλησης, σε αντίθεση με αρκετά μοντέλα ενέργειας-οικονομίας που υποθέτουν συνολική βελτιστοποίηση του κόστους ή της ωφέλειας και συνεπώς ότι ο κεντρικός σχεδιαστής (*central planner*) εφαρμόζει ένα ομοιόμορφο «κοινωνικό» συντελεστή προεξόφλησης για λογαριασμό όλων των παραγόντων του συστήματος που εξετάζεται.

Στον ΠΡΟΜΗΘΕΑ τα προεξοφλητικά επιτόκια που αφορούν μεμονωμένους παράγοντες διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στη λήψη των οικονομικών αποφάσεων, οι οποίες συνήθως βασίζονται στην έννοια του κόστους του κεφαλαίου. Σε κάθε τομέα, το επιτόκιο που χρησιμοποιείται για την προεξόφληση των μελλοντικών δαπανών και εσόδων περιλαμβάνει ένα ασφάλιστρο κινδύνου που αντανακλά τις επιχειρηματικές πρακτικές, διάφορους παράγοντες κινδύνου και το κόστος του τραπεζικού δανεισμού. Το προεξοφλητικό επιτόκιο για τους ατομικούς καταναλωτές (νοικοκυριά) αντανακλά επίσης ένα στοιχείο αποστροφής κινδύνου. Η τιμή του συντελεστή προεξόφλησης επηρεάζεται από αρκετούς παράγοντες, όπως τα επιτόκια που επικρατούν στις κεφαλαιαγορές, η πρόσβαση στις τραπεζικό δανεισμό ή εν γένει στις αγορές για την άντληση κεφαλαίων και κυρίως από την αξία που ο κάθε παράγοντας του συστήματος

προσδίδει στους ιδίους πόρους, όπως το μετοχικό κεφάλαιο ή οι αποταμιεύσεις φυσικών προσώπων, το οποίο ανταναικλά την συμπεριφορά αποστροφής κινδύνου όσον αφορά την πιθανή απώλεια του κεφαλαίου σε σχέση με άλλες, χαμηλού κινδύνου, επιλογές. Συνεπώς η επιλογή του συντελεστή προεξόφλησης αντικατοπτρίζει το κόστος ευκαιρίας άντλησης κεφαλαίων και άρα χρησιμεύει ως ερμηνευτική μεταβλητή στην προσομοίωση των επενδυτικών αποφάσεων των επιχειρήσεων και των ιδιωτών καταναλωτών όσο το δυνατόν πλησιέστερα προς την πραγματικότητα.

Τα επιτόκια ποικίλλουν ανά τομέα και διαφέρουν από τα «κοινωνικά επιτόκια» (συνήθως 4-5%), τα οποία χρησιμοποιούνται στον κοινωνικό μακροπρόθεσμο σχεδιασμό. Στο μοντέλο, τα προεξοφλητικά επιτόκια κυμαίνονται (σε πραγματικούς όρους) από 8% για εταιρείες παραγωγής υδρογονανθράκων ή κεντρικές επενδύσεις σε υποδομές, βιομηχανία και δίκτυα υποδομών και 9% για επενδύσεις στον τομέα της ηλεκτροπαραγωγής (Πίνακας 3-8) μέχρι και 17.5% που εφαρμόζεται στους ιδιώτες καταναλωτές (νοικοκυριά και ιδιωτικές επιβατικές μεταφορές). Παρ' ότι η υλοποίηση ξεχωριστού προεξοφλητικού επιτοκίου ανά κλάδο αποτελεί την πιο ευρέως χρησιμοποιούμενη μέθοδο στα μεγάλης κλίμακας μοντέλα ενέργειας-οικονομίας, εντούτοις εμπεριέχει σημαντικές απλοποιήσεις, καθώς ο τρόπος που λαμβάνουν αποφάσεις οι ιδιώτες καταναλωτές διαφέρει σημαντικά ανάλογα με τα κοινωνικά στερεότυπα (μιμητισμός, καταναλωτικές τάσεις), τα πρότυπα και τις συνήθειες, τα συμπεριφορικά χαρακτηριστικά, την πρόσβαση στην πληροφορία και σε κεφάλαια, την οικονομική και κοινωνική τάξη, το φύλο κ.α. [126], και συνεπώς τα προεξοφλητικά επιτόκια τείνουν να διαφέρουν σημαντικά ανάμεσα σε ομάδες καταναλωτών.

Τομέας ενεργειακού συστήματος	Ετήσιο προεξοφλητικό επιτόκιο
Βιομηχανία	8%
Νοικοκυριά	17.5%
Παραγωγή υδρογονανθράκων	8%
Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας	9%
Παραγωγή υδρογόνου	9%
Επιβατικές ιδιωτικές μεταφορές	18%
Μεταφορές φορτίων	12%
Μη ενεργειακές χρήσεις	9%

Πίνακας 3-8: Υποθέσεις για τα προεξοφλητικά επιτόκια ανά τομέα στον ΠΡΟΜΗΘΕΑ

Το προεξοφλητικό επιτόκιο αποτελείται από ένα επιτόκιο χωρίς ρίσκο (το οποίο είναι κοινό σε όλους τους κλάδους) και από μια σειρά άλλων παραγόντων που διαφοροποιούνται ανά παράγοντα του ενεργειακού συστήματος (ασφάλιστρο κινδύνου των μετοχών, ασφάλιστρα κινδύνου της βιομηχανίας και αποστροφή του κινδύνου). Στο μοντέλο, έχει εκτιμηθεί οικονομετρικά μια εξίσωση που συνδέει το επιτόκιο χωρίς ρίσκο με την αύξηση του ΑΕΠ και συνεπώς στην στοχαστική έκδοση του ΠΡΟΜΗΘΕΑ τα προεξοφλητικά επιτόκια ακολουθούν μια κατανομή πιθανοτήτων με μέσο όρο τις τιμές του παραπάνω πίνακα. Επιπλέον, είναι δυνατή η αλλαγή της τιμής των προεξοφλητικών επιτοκίων ανά σενάριο (ντετερμινιστική ανάλυση), π.χ. η

υλοποίηση ενός κεντρικού σχεδιασμού πολιτικών ενεργειακής εξοικονόμησης θα οδηγήσει σε μείωση του ρίσκου της επένδυσης και άρα του προεξοφλητικού επιτοκίου σε σχέση με το σενάριο αναφοράς; Η μείωση αυτή θα είναι μεγαλύτερη στους κλάδους με υψηλότερο προεξοφλητικό επιτόκιο, δηλαδή στους ιδιώτες καταναλωτές.

3.10.2 Η συνάρτηση επιλογής ενεργειακών τεχνολογιών

Ο ανταγωνισμός μεταξύ των εναλλακτικών επιλογών σε όλους τους τομείς του ενεργειακού συστήματος έχει μοντελοποιηθεί με βάση τη θεωρία διακριτής επιλογής (εξίσωση 9):

$$sh_{k,t} = \frac{w_{k,t} * c_{k,t}^{-\eta_t}}{\sum_k w_{k,t} * c_{k,t}^{-\eta_t}} \quad (9)$$

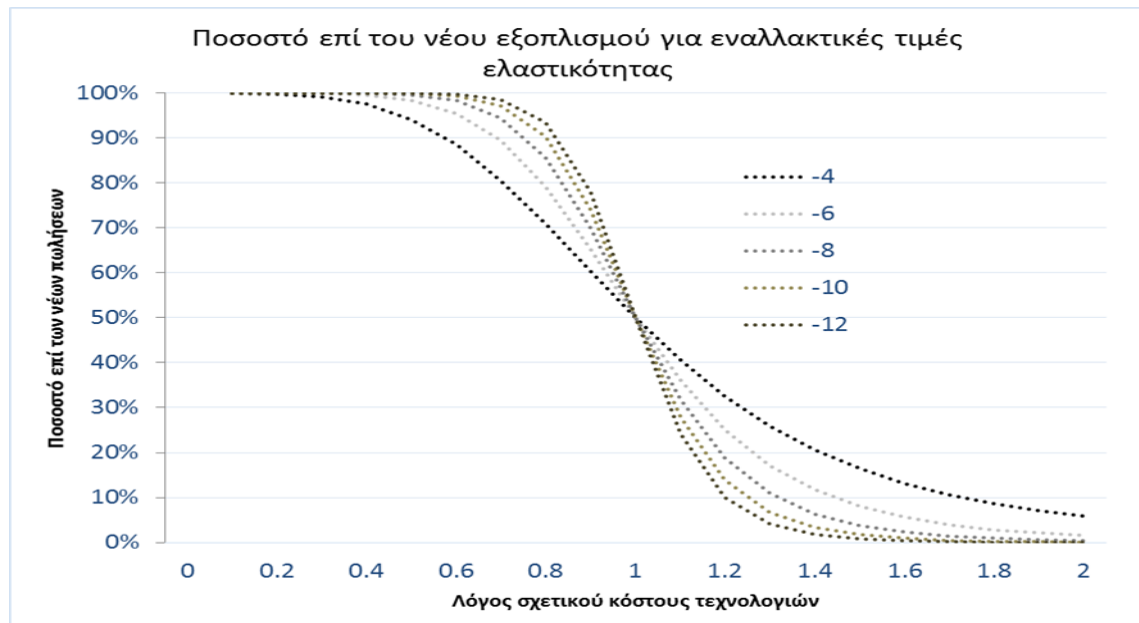
Η συχνότητα της επιλογής εκφράζεται ως το μερίδιο $sh_{k,t}$ της συγκεκριμένης τεχνολογίας k στο σύνολο των καινούργιων επενδύσεων για την κάλυψη της ζήτησης. Οι μεταβλητές που επηρεάζουν την απόφαση για επένδυση είναι το συνολικό κόστος των ανταγωνιστικών τεχνολογιών $c_{k,t}$ (που περιλαμβάνει το ετησιοποιημένο κόστος κεφαλαίου, τα σταθερά και μεταβλητά κόστη λειτουργίας, το κόστος καυσίμου και το κόστος εκπομπών άνθρακα), οι παράγοντες $w_{k,t}$ (οι οποίοι αντανakλούν τον σχετικό παράγοντα τεχνολογικής και εμπορικής «ωριμότητας» κάθε τεχνολογίας σε σχέση με τις ανταγωνιστικές επιλογές και ετοιμότητας των ενεργειακών καταναλωτών να την υιοθετήσουν) και από τις ελαστικότητες η , οι οποίες αποτελούν μέτρο της ευαισθησίας των επενδυτικών αποφάσεων σε σχέση με την αλλαγή του κόστους, δηλαδή απεικονίζουν το ρυθμό υποκατάστασης μεταξύ των εναλλακτικών επιλογών με βάση το σχετικό λόγο των δεικτών κόστους των τεχνολογιών.

Υποθέτουμε 2 εναλλακτικές επιλογές παραγωγής ηλεκτρισμού το 2010 στην Ευρώπη (π.χ. φυσικό αέριο και άνθρακας). Το παρακάτω διάγραμμα παρουσιάζει το ποσοστό των τεχνολογιών στην νέα εγκατεστημένη ισχύ όταν μεταβάλλονται οι ελαστικότητες η_t γύρω από την τιμή -8 (που έχει υπολογιστεί οικονομετρικά ως η μέση τιμή), ενώ οι παράγοντες $w_{k,t}$ υποθέτουμε ότι ισούνται με 0.5. Είναι εμφανές ότι ο ρυθμός υποκατάστασης μεταξύ των τεχνολογιών εξαρτάται άμεσα από τον σχετικό λόγο του συνολικού κόστους των δυο τεχνολογιών. Ωστόσο, η επίδραση του λόγου του κόστους στα μερίδια των εναλλακτικών επιλογών αυξάνεται όσο μεγαλύτερη είναι η ελαστικότητα γ , οδηγώντας έτσι σε μεγάλες μεταβολές των ποσοστών όταν το σχετικό τους κόστους μεταβάλλεται έστω και οριακά γύρω από την μονάδα. Σύμφωνα με το Γράφημα 3-11 όταν το κόστος μια τεχνολογίας αυξάνεται κατά 20%, τότε το ποσοστό της στις καινούργιες επενδύσεις μειώνεται από το 50% στο 41% αν η ελαστικότητα παίρνει την τιμή -2, στο 32% αν παίρνει την τιμή -4, στο μόλις 5% αν η ελαστικότητα είναι -16 και γίνεται μηδέν αν η ελαστικότητα λαμβάνει τιμές μικρότερες από -30.

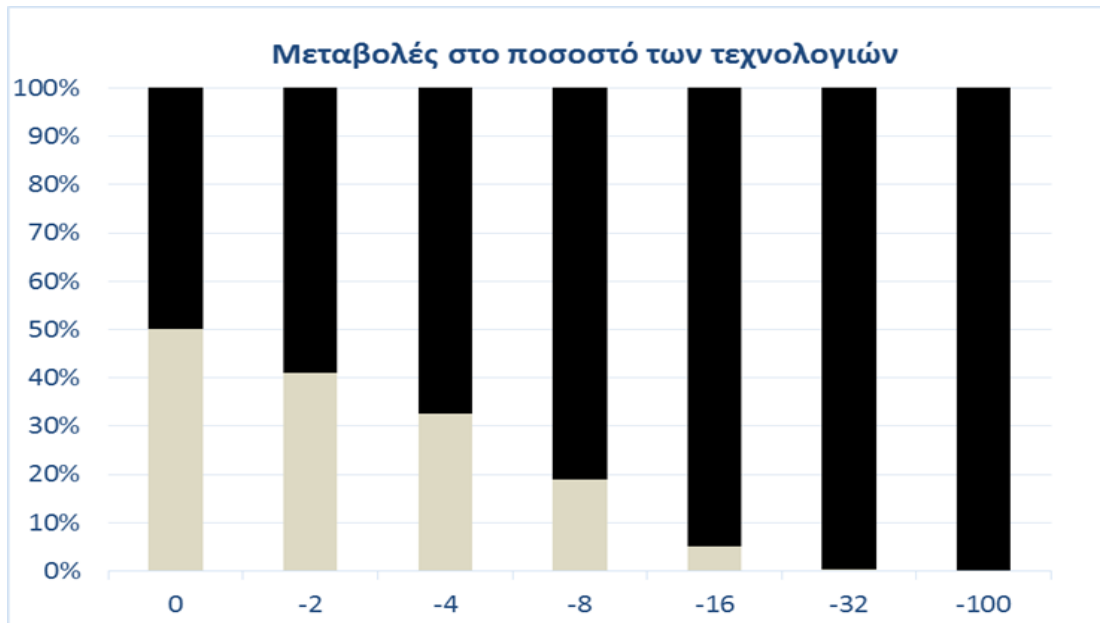
Η συναρτησιακή μορφή που επιλέχθηκε για να αναπαραστήσει τον ανταγωνισμό των ενεργειακών τεχνολογιών ονομάζεται (στην διεθνή βιβλιογραφία) συνάρτηση Weibull και αποτελεί μια γενικευμένη μορφή της συνάρτησης logit η οποία αποτελεί σύνηθες παράδειγμα της εφαρμογής της θεωρίας διακριτής επιλογής. Η

θεωρία διακριτής επιλογής χρησιμοποιείται ευρέως στη μοντελοποίηση προβλημάτων επιλογής ενός αντιπροσωπευτικού καταναλωτή (Ortuzar, 1994 [201]) μεταξύ διαφόρων εναλλακτικών επιλογών νέου ενεργειακού εξοπλισμού (Clarke and Edmonds, 1993 [195]). Με βάση τη θεωρία, τα μοντέλα τύπου Random Utility χρησιμοποιούνται ευρέως στη βιβλιογραφία για να προσομοιώσουν τις πωλήσεις αγαθών και προϊόντων. Σύμφωνα με τα μοντέλα αυτά, κάθε επιλογή αποτελεί ένα μοναδικό διακριτό συμβάν (π.χ. ένας επενδυτής στον τομέα της ηλεκτροπαραγωγής αποφασίζει ποια τεχνολογία θα επιλέξει -1- ενώ δεν επιλέγει τις υπόλοιπες -0-), ενώ η επιλογή γίνεται με βάση την χρησιμότητα που προσφέρει. Η χρησιμότητα αναπαρίσταται ως τυχαία μεταβλητή z και εξαρτάται από το σύνολο των παρατηρημένων χαρακτηριστικών της συγκεκριμένης επιλογής (όπως π.χ. το συνολικό κόστος) και από τα χαρακτηριστικά του αποφασίζοντα. Υποθέτω, σύμφωνα με οικονομική θεωρία ότι ο αποφασίζων επιλέγει την τεχνολογία με τη μεγαλύτερη χρησιμότητα ή την επιλογή με το μικρότερο κόστος που του αποδίδει ωστόσο την ίδια χρησιμότητα (δυτικό πρόβλημα).

Σε θεωρητικό επίπεδο, το ποσοστό μιας τεχνολογίας σε μια ανταγωνιστική ενεργειακή αγορά καθορίζεται από την υπόθεση ελαχίστου κόστους, ενώ κάθε τεχνολογία χαρακτηρίζεται από μια κατανομή πιθανότητας του κόστους, έστω $f_i(p)$, η οποία δίνει την πιθανότητα ότι η τεχνολογία μπορεί να παράγει μια μονάδα ενέργειας με κόστος μεταξύ p και $p + dp$. Το κόστος καθορίζεται από τεχνικά-οικονομικά χαρακτηριστικά (κόστος κεφαλαίου, τεχνική απόδοση κ.α.) και από μη τεχνικά (όπως η απόσταση από ενεργειακούς πόρους, κόστος της γης, επίπεδο ελέγχων για αποφυγή μόλυνσης, φόροι). Οι παραπάνω παράγοντες είναι εγγενείς για την συγκεκριμένη τεχνολογία που αναπτύσσεται στο συγκεκριμένο μέρος και χρόνο και δεν εξαρτώνται από τα γενικά χαρακτηριστικά της τεχνολογίας ούτε των ανταγωνιστικών.



Γράφημα 3-10: Επίδραση της ελαστικότητας στην επιλογή νέων ενεργειακών τεχνολογιών



Γράφημα 3-11: Μεταβολές στο ποσοστό των τεχνολογιών όταν το κόστος της 1ης αυξάνεται κατά 20% (για διαφορετικές τιμές ελαστικότητας)

Η βασική υπόθεση είναι ότι σε μια ανταγωνιστική αγορά η κάθε τεχνολογία θα αναπτυχθεί μόνο στις περιπτώσεις όπου το κόστος της είναι χαμηλότερο από τις ανταγωνιστικές επιλογές j . Αυτή η υπόθεση οδηγεί στον ορισμό του μεριδίου κάθε τεχνολογίας i :

$$s_i = \int_0^\infty f_i(p) \prod_{j \neq i}^n \int_p^\infty f_j(p') dp' dp \quad (24)$$

Όπου ο πρώτος παράγοντας του ολοκληρώματος είναι η πιθανότητα ότι η τεχνολογία i θα έχει κόστος μεταξύ p και $p + dp$, ενώ ο δεύτερος αντιπροσωπεύει την πιθανότητα οι ανταγωνιστικές τεχνολογίες να έχουν κόστος μεγαλύτερο από p .

Η πιθανότητα ο αποφασίζων να επιλέξει την εναλλακτική επιλογή k έναντι μιας άλλης εναλλακτικής kk από το ίδιο σύνολο επιλογών είναι:

$$P(k|z_k) = Pr(z_k) > Pr(z_{kk}) \quad (25)$$

Στην σύγχρονη βιβλιογραφία διακριτών επιλογών θεμελιώνονται εναλλακτικά μοντέλα ανάλογα με την κατανομή που ακολουθεί η τυχαία μεταβλητή z . Αν η τελευταία ακολουθεί κατανομή Weibull, τότε σύμφωνα με McFadden [201] (1978), η πιθανότητα της Εξίσωσης (25) υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση που είναι γνωστή ως το μοντέλο logit (η είναι η ελαστικότητα της επιλογής):

$$P(k|z_k) = \frac{\exp(\eta \cdot z_k)}{\sum_{kk} \exp(\eta \cdot z_{kk})} \quad (26)$$

Αν αντικαταστήσουμε στην παραπάνω έκφραση, την μεταβλητή z με τον λογάριθμο του δείκτη κόστους C_k , τότε:

$$P(k|z_k) = \frac{\exp[-\eta \cdot \ln(C_k)]}{\sum_{kk} \exp[-\eta \cdot \ln(C_{kk})]} = \frac{C_k^{-\eta}}{\sum_{kk} C_{kk}^{-\eta}} \quad (27)$$

καταλήγουμε στην εξίσωση (9) που χρησιμοποιείται στον ΠΡΟΜΗΘΕΑ για να περιγράψει τον οικονομικό ανταγωνισμό των εναλλακτικών τεχνολογιών k σε διάφορους τομείς και επίπεδα με βάση την υπόθεση της κατανομής του κόστους εξαιτίας ετερογενών συνθηκών. Όσο μειώνεται το κόστος της κάθε εναλλακτικής επιλογής, τόσο αυξάνει η πιθανότητα να επιλεγεί από τον αποφασίζοντα. Η υλοποίηση αυτού του μηχανισμού έχει το πλεονέκτημα ότι αποφεύγει μια κατάσταση στην οποία η φθηνότερη τεχνολογία κερδίζει όλη την αγορά (κάτι το οποίο δεν παρατηρείται στις πραγματικές συνθήκες αγοράς). Σύμφωνα με [197], η επιλογή συναρτησιακής μορφής μεταξύ logit και Weibull γίνεται συνήθως εμπειρικά, ενώ το πλεονέκτημα της χρήσης της συνάρτησης Weibull έγκειται στο γεγονός ότι η πρώτη συγκλίνει γρηγορότερα προς τις ακραίες τιμές. Εξαιτίας της ευκολίας υλοποίησης της και των σημαντικών ιδιοτήτων της, η παραπάνω συνάρτηση έχει χρησιμοποιηθεί εκτενώς από μοντέλα ενεργειακής-οικονομικής ανάλυσης (π.χ. Reister [196], Clarke [195], Clarke [198]). Για τις ανάγκες της μοντελοποίησης της παρούσας διατριβής χρησιμοποιείται η κατανομή κατά Weibull και η συχνότητα της επιλογής (πιθανότητα) μεταξύ εναλλακτικών επιλογών εκφράζεται ως το μερίδιο sh της συγκεκριμένης επιλογής στο σύνολο των νέων επενδύσεων σε κάθε τομέα του ενεργειακού συστήματος.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α'

Ιδιότητες της εξίσωσης για τον υπολογισμό της διεθνούς τιμής του πετρελαίου

Econometric estimation of oil price (sample 1980-2010)		
	t-Statistic	Probability
C	16.880	0.000
LOG(PCAP(-1))	4.871	0.000
PDL01 (RP (-1))	-10.877	0.000
R-squared	0.954	
Adjusted R-squared	0.933	
S.E. of regression	0.132	
Lag Distribution of LOG(RPRATIO(-1))		t-Statistic
	Sum of Lags	-10.877

Ιδιότητες της εξίσωσης για τον υπολογισμό της διεθνούς τιμής του φυσικού αερίου

Econometric estimation of natural gas price (sample 1980-2010)		
	t-Statistic	Probability
C	4.432	0.001
PDL01 (Poil (-1))	10.944	0.000
PDL02 (RP (-3))	-3.150	0.007
R-squared	0.974	
Adjust. R-squared	0.969	
S.E. of regression	0.075	
Lag Distribution of LOG(oilprice(-1))		t-Statistic
	Sum of Lags	10.944
Lag Distribution of LOG(RPRATIO(-3))		t-Statistic
	Sum of Lags	-3.150

Κεφάλαιο 4

4. Οικονομετρικές εκτιμήσεις και Ενσωμάτωση της αβεβαιότητας

4.1 Σκοπός της στοχαστικής ανάλυσης

Η κλασική μέθοδος για την ανάλυση του συστήματος «ενέργεια-περιβάλλον» και για την ποσοτικοποίηση των επιπτώσεων από την εφαρμογή ενεργειακών και κλιματικών πολιτικών συνίσταται στον σχεδιασμό, την κατασκευή και την εφαρμογή ντετερμινιστικών/αιτιοκρατικών μοντέλων, τα οποία παρέχουν ένα συνεκτικό πλαίσιο για την εξερεύνηση της μελλοντικής εξέλιξης του παγκόσμιου ενεργειακού συστήματος. Τα ντετερμινιστικά μοντέλα έχουν τα πλεονεκτήματα της σαφήνειας και της διαφάνειας και έχουν δώσει απαντήσεις τόσο ποιοτικής όσο και ποσοτικής φύσης στην ανάλυση πολιτικών σε ένα ευρύ πεδίο τομέων. Ωστόσο, η αβεβαιότητα, η οποία είναι ιδιαίτερα σημαντικός παράγοντας για τις μελλοντικές οικονομικές αποφάσεις (πχ επενδύσεις σε τεχνολογίες, αποφάσεις για την βέλτιστη κατανομή του R&D, κίνδυνοι ασφάλειας ενεργειακού εφοδιασμού), σε αυτά τα μοντέλα δεν μπορεί να αντιμετωπιστεί συστηματικά [84].

Οι συνηθισμένοι τρόποι εξέτασης της αβεβαιότητας στα ντετερμινιστικά μοντέλα ενεργειακής ανάλυσης είναι μέσω της ανάλυσης των επιπτώσεων εναλλακτικών σεναρίων, μέσω εκτέλεσης ανάλυσης ευαισθησίας σε ένα υποσύνολο παραμέτρων/μεταβλητών του μοντέλου, είτε μέσω της χρησιμοποίησης πολλαπλών μοντέλων ενέργειας-οικονομίας [25] (κεφάλαιο 2). Οι παραπάνω τρόποι ωστόσο είναι ανεπαρκείς όσον αφορά την ποσοτικοποίηση της αβεβαιότητας για την μελλοντική εξέλιξη του ενεργειακού συστήματος καθώς ο αριθμός των σεναρίων και των αναλύσεων ευαισθησίας που μπορούν να πραγματοποιηθούν είναι περιορισμένος και οι μέθοδοι αυτοί είναι συγκεκριμένου σκοπού (ad-hoc) . Η ανάλυση με πολλά μοντέλα επιτρέπει την εξερεύνηση μιας σειρά πιθανών αποτελεσμάτων και το σχετικό εύρος των αβεβαιοτήτων. Ωστόσο, σύμφωνα με [84] το μεγάλο εύρος των μοντέλων και των υποθέσεων που χρησιμοποιούνται σε αυτές τις μελέτες δεν καλύπτει κατ' ανάγκη το σύνολο των πιθανοτήτων των μελλοντικών εξελίξεων, ενώ τα ντετερμινιστικά μοντέλα

αποτυγχάνουν επίσης στο να παρέχουν μια ποσοτική ένδειξη για το πόσο πιθανό είναι ένα συγκεκριμένο αποτέλεσμα ([9] και [11]).

Τα εναλλακτικά σενάρια αποτελούν απλές ντετερμινιστικές πραγματοποιήσεις του συνόλου των αβεβαιοτήτων στον ορίζοντα προγραμματισμού. Σύμφωνα με [158], τα σενάρια αποτελούν περιγραφές εναλλακτικών υποθετικών μελλοντικών εξελίξεων, δηλαδή δεν προβλέπουν ποιο θα είναι το μέλλον (δεν είναι «προγνώσεις»), αλλά περιγράφουν τις εναλλακτικές εξελίξεις που μπορούμε εύλογα να φανταστούμε. Τα σενάρια αναπαριστούν διαφορετικές καταστάσεις ενός συστήματος, ενώ τα βασικά τους χαρακτηριστικά είναι η συνοχή, η ποικιλομορφία, ο μικρός αριθμός, η αξιοπιστία και η αποδοτικότητα [159]. Οι αβεβαιότητες για τα αποτελέσματα και τους τρόπους αντιμετώπισης της κλιματικής αλλαγής είναι ιδιαίτερα σημαντικές και συνεπώς η ανάγκη ανάπτυξης ισχυρών εργαλείων για την υποστήριξη των φορέων λήψης αποφάσεων παραμένει πιο πιεστική από ποτέ [160]. Παρ' ότι έχουν ασκηθεί κριτικές [33], η ανάλυση των αβεβαιοτήτων από τον Nordhaus [161] έδειξε την τεράστια σημασία της αβεβαιότητας των παραμέτρων εισόδου για την εκτίμηση του κόστους των πολιτικών μείωσης των εκπομπών άνθρακα. Παρ' όλα αυτά, η ανάλυση δεν προχώρησε σε πιθανοτικές εκτιμήσεις για τα εναλλακτικά ενδεχόμενα, ενώ το μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε δεν περιέχει λεπτομερή αναπαράσταση του παγκόσμιου ενεργειακού συστήματος, η οποία είναι απαραίτητη στο πλαίσιο της εξέτασης εναλλακτικών κλιματικών και ενεργειακών πολιτικών.

Η εκτίμηση πιθανότητας είναι σημαντική για τον καθορισμό της εμπιστοσύνης που πρέπει να τοποθετείται σε συγκεκριμένα αποτελέσματα των μοντέλων, αλλά επίσης μπορεί να αποτελέσει μια κρίσιμη συμβολή στην εξερεύνηση και αξιολόγηση εναλλακτικών πολιτικών, καθώς ο βαθμός στον οποίο ένα αποτέλεσμα είναι άγνωστο επηρεάζει το πόσο επιθυμητές είναι οι εναλλακτικές επιλογές πολιτικής [84]. Σε πολλές περιπτώσεις, η μείωση του κινδύνου είναι αυτοσκοπός (πχ μείωση του κινδύνου μια επένδυση σε τεχνολογία ηλεκτροπαραγωγής ή σε R&D να έχει αρνητική Καθαρή Παρούσα Αξία). Το μοντέλο που αναπτύχθηκε στα πλαίσια της διατριβής είναι ένα εξ' ολοκλήρου στοχαστικό μοντέλο, το οποίο παράγει κατανομές πιθανοτήτων για τις κυριότερες μεταβλητές του παγκόσμιου ενεργειακού συστήματος [84]. Το μοντέλο συνδυάζει την διαρθρωτική ανάλυση, προκειμένου να αναπαραστήσει τις σχέσεις αιτίας-αποτελέσματος για όλες τις σημαντικές μεταβλητές και παραμέτρους, με ανάλυση χρονολογικών σειρών για την εξέταση των προτύπων της διακύμανσης (και της συνδιακύμανσης) των μεταβλητών σε μακροπρόθεσμο επίπεδο.

Εισάγοντας την λεπτομερή κάλυψη της αβεβαιότητας σε ένα ολοκληρωμένο μεγάλης κλίμακας μοντέλο του παγκόσμιου ενεργειακού συστήματος, ο ΠΡΟΜΗΘΕΑΣ μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ποσοτικοποίηση πιθανολογικών εκτιμήσεων για την εξέλιξη σημαντικών ενδογενών μεταβλητών του μοντέλου (π.χ. η πιθανότητα ότι η παγκόσμιες εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα δεν θα υπερβούν ένα συγκεκριμένο όριο το 2050) με έναν αξιόπιστο τρόπο. Η εκτίμηση πιθανοτήτων αποτελεί μια κρίσιμη παράμετρο στη διαμόρφωση των πολιτικών και συνεπώς η ολοκληρωμένη ποσοτικοποίηση του κινδύνου (risk) είναι στρατηγικής σημασίας και αποτελεί τον

κύριο στόχο κατά τον σχεδιασμό και κατασκευή του ΠΡΟΜΗΘΕΑ. Η ανάλυση των στοχαστικών αποτελεσμάτων του μοντέλου προσθέτει μια καινούργια διάσταση στην συνηθισμένη ποσοτική ανάλυση με βάση αποτελέσματα μοντέλων, ενώ παράλληλα ενισχύει την αξιοπιστία και την αποδοχή της.

Η κύρια προσπάθεια της έρευνας είναι η συστηματική ενσωμάτωση της αβεβαιότητας σε όλους τους παράγοντες από τους οποίους εξαρτάται η προβολή στο μέλλον του ενεργειακού συστήματος. Η λεπτομερής κάλυψη της αβεβαιότητας σε ένα ολοκληρωμένο μεγάλης κλίμακας μοντέλο του παγκόσμιου ενεργειακού συστήματος επιτρέπει την ποσοτικοποίηση όλων των αποτελεσμάτων και προβολών με τη μορφή κατανομών πιθανοτήτων που παράγονται ενδογενώς από το μοντέλο και οι οποίες δεν λαμβάνουν προ-καθορισμένη μορφή. Το ενδιαφέρον αποτέλεσμα του μοντέλου είναι ακριβώς η μορφή της κατανομής πιθανοτήτων που το μοντέλο παράγει για κάθε μέγεθος που προβάλλεται στο μέλλον. Η μορφή αυτή μπορεί να αξιολογηθεί από τον χρήστη του μοντέλου ώστε να προκύψουν συμπεράσματα σχετικά με το εύρος της αβεβαιότητας για κάθε προβολή στο μέλλον. Η πληροφορία σχετικά με την αβεβαιότητα των προβολών στο μέλλον αποτελεί κρίσιμη παράμετρο στον σχεδιασμό αποτελεσματικών πολιτικών και επομένως η ολοκληρωμένη ποσοτικοποίηση του κινδύνου που παρέχει το μοντέλο είναι στρατηγικής σημασίας.

Κατά την κατασκευή του στοχαστικού μοντέλου, η κύρια προσπάθεια είναι η ενδεδειγμένη κάλυψη της αβεβαιότητας με την εισαγωγή της στην δημιουργία των κατανομών πιθανοτήτων για όλες τις παραμέτρους εισόδου και τις εξωγενείς μεταβλητές (generation process). Οι οικονομετρικές εκτιμήσεις έχουν χρησιμοποιηθεί ευρέως για τον καθορισμό των κατανομών για τις αβέβαιες παραμέτρους εισόδου του μοντέλου (όπως ελαστικότητες) καθώς βασίζονται σε ανάλυση ιστορικών δεδομένων (με εξέταση χρονοσειρών μεγάλης περιόδου) και παρέχουν αντικειμενικότητα. Το μοντέλο αναγνωρίζει επίσης την υπολειμματική στοχαστικότητα που προκύπτει από τις μεταβλητές που δεν περιλαμβάνονται ρητά στον προσδιορισμό των εξισώσεων του μοντέλου (στατιστικά σφάλματα). Επιπλέον, ιδιαίτερη προσοχή δίνεται στη στατιστική εξάρτηση των παραμέτρων, δεδομένου ότι η συνδιακύμανσή τους είναι πιθανό να διαδραματίσει σημαντικό ρόλο στον προσδιορισμό της κατανομής των ενδογενών μεταβλητών και ιδιαίτερα των αθροιστικών (π.χ. παγκόσμια ζήτηση ενέργειας ή εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα). Ενώ αναγνωρίζονται οι δυσκολίες στον καθορισμό της μεταβλητότητας των παραμέτρων εισόδου και του εγγενούς υποκειμενικού χαρακτήρα ορισμένων υποθέσεων, η προσπάθεια στην δημιουργία τόσο του μοντέλου όσο και των κατανομών για τα δεδομένα εισόδου υπήρξε πάντοτε προς την απόκτηση αμερόληπτων μέτρων αβεβαιότητας στον βαθμό που τα ιστορικά στοιχεία και η εξειδικευμένη κρίση των εμπειρογνομόνων το επιτρέπουν.

4.2 Πηγές αβεβαιότητας

Τα τελευταία χρόνια, έχουν προταθεί πολυάριθμες κατηγοριοποιήσεις της αβεβαιότητας στα πλαίσια της μελέτης του συστήματος ενέργεια-οικονομία-περιβάλλον. Οι Spiegehalter και Riesch [63] προτείνουν μια δομή πέντε επιπέδων για

την αξιολόγηση των αβεβαιοτήτων διαχωρίζοντας τρία επίπεδα μέσα στην ανάλυση με μοντέλα (αβεβαιότητα για το μοντέλο, τις παραμέτρους και τα γεγονότα) και αναγνωρισμένες ή άγνωστες ανεπάρκειες στη διαδικασία μοντελοποίησης, οι οποίες περιλαμβάνουν πιθανές διαφωνίες σχετικά με την διαμόρφωση του προβλήματος. Οι Walker et al [64] συνθέτουν μια ευρεία ποικιλία μελετών για την αβεβαιότητα στην λήψη των αποφάσεων που βασίζεται σε μοντέλα προκειμένου να παρέχουν ένα διεπιστημονικό θεωρητικό πλαίσιο για τη συστηματική ανάλυση της αβεβαιότητας. Μια σημαντική διάκριση των αβεβαιοτήτων στα μοντέλα είναι μεταξύ γνωσιολογικής (epistemic), η οποία βασίζεται σε έλλειψη γνώσης και συνεπώς μπορεί να περιοριστεί με την συλλογή αξιόπιστων δεδομένων και την βελτίωση του μοντέλου, και μεταβλητότητα/στοχαστική αβεβαιότητα (aleatory) η οποία καθορίζεται από την εγγενή τυχαιότητα ενός φαινομένου [62].

Στην κατασκευή του μοντέλου έγινε προσπάθεια ενσωμάτωσης των περισσότερων κατηγοριών αβεβαιοτήτων και συνεπώς ο PROMHΘΕΑΣ αναγνωρίζει πέντε κυρίως πηγές αβεβαιότητας:

- Αβεβαιότητα σχετικά με τις υποθέσεις και την εξέλιξη των εξωγενών μεταβλητών (π.χ. πληθυσμός, οικονομική δραστηριότητα, κλιματικές πολιτικές)
- Διακύμανση στις μεταβλητές που δεν έχουν μοντελοποιηθεί ρητά δεδομένου ότι δεν θεωρούνται αρκετά σημαντικές, αλλά θα μπορούσαν αθροιστικά να προκαλέσουν αποκλίσεις (ο μέσος όρος των αποκλίσεων συνήθως θεωρείται ότι είναι μηδέν)
- Οι αβεβαιότητες που προκύπτουν από την ατελή γνώση του συστήματος και κυρίως από την τιμή των παραμέτρων που περιλαμβάνονται στο μοντέλο (π.χ. ελαστικότητες τιμής και εισοδήματος στις εξισώσεις ζήτησης ενέργειας)
- Η αβεβαιότητα σχετικά με τον προσδιορισμό των εξισώσεων και την δομή του μοντέλου (που υλοποιείται με στοχαστικές μεταβάσεις).
- Στατιστικά σφάλματα κατά την ποσοτικοποίηση των δεδομένων και των παρατηρήσεων (π.χ. υπολογιστικά σφάλματα, αριθμητικές προσεγγίσεις κ.α.)

Τα παραπάνω εισάγονται στο μοντέλο με τη μορφή κατανομών πιθανοτήτων. Το αντίστροφο της ισοδύναμης αθροιστικής αυτών των κατανομών χρησιμοποιείται στη συνέχεια για να παράγει πειραματικές τιμές με την μέθοδο "Monte Carlo". Συνεπώς, η βασική είσοδος του PROMHΘΕΑ είναι ένα σύνολο κατανομών για όλες τις εξωγενείς μεταβλητές και παραμέτρους. Η παραγωγή των κατανομών αυτών των παραμέτρων αποτελεί τον κεντρικό σκοπό της έρευνας που σχετίζεται με την κατασκευή και τη χρήση του στοχαστικού μοντέλου. Οι επόμενες ενότητες συνοψίζουν τη μεθοδολογία που χρησιμοποιήθηκε για την παραγωγή των κατανομών εισόδου στο μοντέλο.

4.3 Η εφαρμογή της μεθόδου Monte Carlo

Κατά την διάρκεια παραγωγής των κατανομών πιθανοτήτων των παραμέτρων εισόδου του μοντέλου χρησιμοποιείται εκτενώς η μέθοδος "Monte Carlo", σύμφωνα με την οποία πραγματοποιείται ένας μεγάλος αριθμός επαναλήψεων της επίλυσης του μοντέλου (στην περίπτωση του προτεινόμενου μοντέλου εκτελούνται 2048 πειράματα

/προσομοιώσεις Monte Carlo) με διαφοροποιημένες υποθέσεις και τα αποτελέσματα χρησιμοποιούνται για την εξαγωγή συμπερασμάτων. Το μεγάλο πλεονέκτημα της μεθόδου είναι ότι δεν εξαρτάται από το μέγεθος του συστήματος που προσομοιώνει και έτσι χρησιμοποιείται ευρέως στην μοντελοποίηση ιδιαίτερα πολύπλοκων συστημάτων [12]. Οι μέθοδοι Monte Carlo είναι μία κατηγορία από στοχαστικούς υπολογιστικούς αλγόριθμους που βασίζονται στην επαναλαμβανόμενη δειγματοληψία τυχαίων (ή «ψευδο-τυχαίων») αριθμών και χρησιμοποιούνται στην προσομοίωση μαθηματικών συστημάτων στην περίπτωση που το μοντέλο είναι τόσο πολύπλοκο που είναι αδύνατη η παραγωγή αναλυτικών λύσεων. Αν δημιουργηθεί ένα υπολογιστικό μοντέλο το οποίο αναπαριστά με μεγάλη ακρίβεια το αντίστοιχο φυσικό σύστημα, τότε με βάση τον Ισχυρό νόμο των μεγάλων αριθμών και το κεντρικό οριακό θεώρημα δεν χρειάζεται η πραγματοποίηση του φαινομένου αφού πραγματοποιώντας αρκετές στοχαστικές προσομοιώσεις μπορούμε να εξάγουμε συμπεράσματα για το σύστημα.

4.3.1 Στατιστικές ιδιότητες της Monte Carlo

Σύμφωνα με τον Ισχυρό νόμο των μεγάλων αριθμών, αν θεωρήσω X_1, \dots, X_n ανεξάρτητες ισόνομες τυχαίες μεταβλητές (δηλαδή με ίδιες συναρτήσεις κατανομής), με μέσο $\mu < \infty$. Η δειγματική μέση τιμή των n πρώτων μεταβλητών ορίζεται ως:

$$\bar{X}_N = 1/n \sum_{i=1}^n X_i, n = 1, 2, \dots \quad (1)$$

και είναι επίσης τυχαίες μεταβλητές, οι οποίες για $n \rightarrow \infty$ συγκλίνουν στον (πραγματικό) μέσο μ με πιθανότητα 1. Δηλαδή, σύμφωνα με το θεώρημα κάτω από κατάλληλες υποθέσεις, ο δειγματικός μέσος μιας ακολουθίας ανεξάρτητων τυχαίων μεταβλητών που ακολουθούν μία κοινή κατανομή συγκλίνει με βεβαιότητα προς τον θεωρητικό μέσο (τη μέση τιμή) της κατανομής. Έστω Y_1, \dots, Y_n ανεξάρτητες ισόνομες τυχαίες μεταβλητές με πεπερασμένο μέσο μ και πεπερασμένη τυπική απόκλιση σ . Σύμφωνα με το Κεντρικό Οριακό Θεώρημα, οι τυχαίες μεταβλητές:

$$Z_n = \frac{E(X) - \mu}{\sqrt{\sigma^2/n}} \quad (2)$$

που έχουν μέσο 0 και διασπορά 1, ακολουθούν ασυμπτωτικά (δηλαδή για μεγάλο n) την κανονική κατανομή. Αυτό το θεώρημα εξηγεί γιατί οι κανονικές τυχαίες μεταβλητές συναντώνται τόσο συχνά, καθώς η προκύπτουσα (αθροιστική) τυχαία μεταβλητή ενός μεγάλου αριθμού τυχαίων παραγόντων τείνει να είναι κανονική. Το γενικό σχήμα της μεθόδου Monte Carlo βασίζεται στο κεντρικό οριακό θεώρημα και στον υπολογισμό απόκλισης της κατανομής Gauss (κανονική), δηλαδή ότι υπάρχει πιθανότητα 0.997 μια τυχαία δοκιμή από την κανονική κατανομή να δώσει τιμή που δεν απέχει από την αντίστοιχη μέση τιμή περισσότερο από 3 τυπικές αποκλίσεις («κανόνας των 3σ»). Έστω ότι χρειάζεται να υπολογιστεί μια άγνωστη ποσότητα m με βάση μια τυχαία μεταβλητή X με μέση τιμή $E(X) = m$ και διασπορά $Var(X) = b^2$ και θεωρώ N ανεξάρτητες τυχαίες μεταβλητές με κατανομές όμοιες της X . Αν ο αριθμός N είναι αρκετά μεγάλος τότε έπεται (από το κεντρικό οριακό θεώρημα) ότι η κατανομή του αθροίσματος $S_N = X_1 + X_2 + \dots + X_N$ είναι προσεγγιστικά κανονική με παραμέτρους

$\mu = N * m$ και $\sigma = b * \sqrt{N}$. Σύμφωνα με τις ιδιότητες της κανονικής κατανομής για τις 3 τυπικές αποκλίσεις ισχύει:

$$P(Nm - 3b\sqrt{N} < S_N < Nm + 3b\sqrt{N}) \approx 0.997 \text{ από την οποία προκύπτει}$$

$$P\left(m - \frac{3b}{\sqrt{N}} < \frac{S_N}{N} < m + \frac{3b}{\sqrt{N}}\right) \approx 0.997 \text{ και συνεπώς}$$

$$P\left(\left|\frac{\sum X_j - \mu}{N}\right| < \frac{3b}{\sqrt{N}}\right) \approx 0.997 \quad (3)$$

η οποία δίνει την μέθοδο υπολογισμού του μέσου m (αριθμητικός μέσος των τιμών) και μια προσέγγιση του σφάλματος, το οποίο δεν ξεπερνά $\frac{3b}{\sqrt{N}}$ και προσεγγίζει το μηδέν καθώς το N αυξάνεται και τείνει στο άπειρο. Δηλαδή το σφάλμα είναι της τάξεως $O^{12} = N^{-1/2}$ και η ταχύτητα σύγκλισης της μεθόδου είναι $O = N^{-1/2}$ καθώς $N \rightarrow \infty$ και είναι ανεξάρτητη των διαστάσεων του προβλήματος (γι' αυτό προτιμάται κυρίως σε πολυδιάστατα και πολύπλοκα προβλήματα).

Η βασική δικαιολόγηση για την χρήση της μεθόδου Monte Carlo προέρχεται από τους νόμους των μεγάλων αριθμών. Έστω Y μια τυχαία μεταβλητή για την οποία υπάρχει το $\mu = E(Y)$ και υποθέτω ότι οι μεταβλητές Y_1, Y_2, \dots, Y_n είναι ανεξάρτητες με την ίδια κατανομή όπως η Y . Σύμφωνα με τον ισχυρό νόμο των μεγάλων αριθμών, όσο ο αριθμός των πειραμάτων αυξάνεται (και θεωρητικά προσεγγίζει το άπειρο), τόσο το σφάλμα του εκτιμητή της μέσης τιμής τείνει στο μηδέν. Δηλαδή,

$$P\left(\lim_{n \rightarrow \infty} |\hat{\mu}_n - \mu| = 0\right) = 1 \quad (4)$$

Συνεπώς, παρότι σύμφωνα με τον νόμο των μεγάλων αριθμών, η τεχνική Monte Carlo θα δώσει τελικά ένα σφάλμα τόσο μικρό όσο θέλουμε, δεν μας πληροφορεί για το πόσο μεγάλο πρέπει να είναι το δείγμα n . Από την άλλη πλευρά, αν η τυχαία μεταβλητή Y έχει πεπερασμένη διακύμανση $\text{Var}(Y) = \sigma^2 < \infty$, τότε στην δειγματοληψία ο εκτιμητής $\hat{\mu}_n$ είναι τυχαία μεταβλητή και έχει τον δικό του μέσο και διακύμανση.

$$E(\hat{\mu}_n) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n E(Y_i) = \mu \quad (5)$$

Από την στιγμή που η μέση τιμή του εκτιμητή $\hat{\mu}_n$ ισούται με την τιμή μ , η τυχαία τεχνική Monte Carlo είναι αμερόληπτη (unbiased). Η διακύμανση του $\hat{\mu}_n$

$$\text{Var}(\hat{\mu}_n) = E(\hat{\mu}_n - \mu)^2 = \frac{\sigma^2}{n} \quad (6)$$

Είναι προφανές ότι όσο μεγαλύτερο το πλήθος n τόσο μικρότερη η διακύμανση του εκτιμητή. Συνεπώς, η τυπική απόκλιση της δειγματοληψίας Monte Carlo είναι της

¹² Το συγκεκριμένο σύμβολο χρησιμοποιείται για τον ρυθμό σύγκλισης για n τείνει στο άπειρο

τάξεως του $n^{-\frac{1}{2}}$ δηλαδή $RMSE^{13} = n^{-1/2}$ καθώς το $n \rightarrow \infty$. Αν επιθυμούμε ακρίβεια μεγαλύτερη κατά ένα δεκαδικό (δηλαδή *10), θέλουμε η τυπική απόκλιση να μειωθεί κατά έναν παράγοντα 10 που απαιτεί αύξηση του δείγματος κατά 100 φορές. Συνεπώς, η τυχαία δειγματοληψία Monte Carlo δεν προτιμάται σε προβλήματα που απαιτούν ιδιαίτερα μεγάλη ακρίβεια. Από την άλλη πλευρά, τα σφάλματα των οικονομετρικά εκτιμημένων εξισώσεων του μοντέλου είναι συχνά μεγαλύτερα από το σφάλμα της μεθόδου Monte Carlo, ενώ συχνά τα μοντέλα περιέχουν μερικές «ιδεατές» υποθέσεις και εσφαλμένες τιμές για εξωγενείς μεταβλητές και παραμέτρους. Το πλεονέκτημα της μεθόδου Monte Carlo είναι ότι μας επιτρέπει να προσθέσουμε ρεαλιστική μεταβλητότητα στο μοντέλο έτσι ώστε να βελτιωθούν οι εκτιμήσεις, ενώ είναι ανεξάρτητη από την πολυπλοκότητα του συστήματος.

4.3.2 Εκτίμηση του σφάλματος της μεθόδου

Η μέση διακύμανση της δειγματοληψίας Monte Carlo είναι σ^2/n , ενώ η σ^2 μπορεί να εκτιμηθεί με τον εκτιμητή s^2 που ορίζεται ως:

$$s^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{\mu}_n)^2 \quad (7)$$

Επιπλέον, ο εκτιμητής είναι αμερόληπτος αφού $E(s^2) = \sigma^2$ για $n \geq 2$ και το σφάλμα είναι της τάξης $\frac{s}{\sqrt{n}}$. Ξέρουμε ότι ο εκτιμητής $\hat{\mu}_n$ έχει μέσο μ και διακύμανση $\frac{s^2}{n}$. Από το Κεντρικό Οριακό Θεώρημα ξέρουμε ότι η $\hat{\mu}_n - \mu$ έχει κανονική κατανομή με μέσο 0 και διακύμανση $\frac{s^2}{n}$.

Σε αυτό το σημείο, χρειάζεται η εισαγωγή της τυπικής κανονικής κατανομής με μέσο 0, διακύμανση ίση με 1 και την παρακάτω συνάρτηση πυκνότητας-πιθανότητας:

$$\varphi(z) = \frac{e^{-\frac{1}{2}z^2}}{\sqrt{2\pi}} \quad \mu\epsilon -\infty < z < \infty \quad (8)$$

Και αθροιστική συνάρτηση πιθανότητας

$$\Phi(z) = \int_{-\infty}^z \varphi(z) dz \quad (9)$$

Όταν η μεταβλητή Z ακολουθεί την τυπική κανονική κατανομή, τότε $z \sim N(0,1)$. Έστω οι μεταβλητές Y_1, Y_2, \dots, Y_n είναι ανεξάρτητες και έχουν την ίδια κατανομή με την Y με μέσο μ και πεπερασμένη διακύμανση $\sigma^2 > 0$, ενώ ο εκτιμητής του μέσου είναι $\hat{\mu}_n = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Y_i$. Τότε σύμφωνα με το Κεντρικό Οριακό Θεώρημα για κάθε $z \in \mathbb{R}$, ισχύει:

$$P\left(\sqrt{n} \frac{\hat{\mu}_n - \mu}{\sigma} \leq z\right) \rightarrow \Phi(z) \text{ για } n \rightarrow \infty \quad (10)$$

¹³ Root Mean Square Deviation: Τυπική απόκλιση από τον μέσο

Η παραπάνω ανάλυση μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να προσεγγίσουμε τα διαστήματα εμπιστοσύνης του μ . Καθώς το n τείνει στο άπειρο, η τυπική απόκλιση σ μπορεί να αντικατασταθεί με τον εκτιμητή s (εξίσωση 7). Οπότε η εξίσωση (10):

$$P\left(\sqrt{n} \frac{\hat{\mu}_n - \mu}{s} \leq z\right) \rightarrow \Phi(z) \text{ για } n \rightarrow \infty \quad (11)$$

Για κάθε $z > 0$, ισχύει

$$\begin{aligned} P\left(|\hat{\mu}_n - \mu| \geq \frac{z * s}{\sqrt{n}}\right) &= P\left(\sqrt{n} \frac{\hat{\mu}_n - \mu}{\sigma} \leq -z\right) + P\left(\sqrt{n} \frac{\hat{\mu}_n - \mu}{\sigma} \geq z\right) \\ &\rightarrow \Phi(-z) + (1 - \Phi(z)) = 2\Phi(-z) \end{aligned} \quad (12)$$

Αν επιθυμούμε διάστημα εμπιστοσύνης ίσο με 5%, έχουμε $2\Phi(-z) = 0.05$ και $z = \Phi^{-1}(0.975) = 1.96$ και συνεπώς το αντίστοιχο διάστημα 95% είναι:

$$\hat{\mu}_n - 1.96 \frac{s}{\sqrt{n}} \leq \mu \leq \hat{\mu}_n + 1.96 \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (13)$$

Σε πιο γενική μορφή, αν θεωρήσω α το επιθυμητό διάστημα προσέγγισης, τότε το αντίστοιχο διάστημα εμπιστοσύνης της μεθόδου Monte Carlo ορίζεται ως:

$$\hat{\mu}_n \mp \Phi^{-1}\left(1 - \frac{\alpha}{2}\right) \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (14)$$

Στην κατασκευή του ΠΡΟΜΗΘΕΑ, αντί για την κανονική κατανομή πολύ συχνά χρησιμοποιείται η κατανομή Student-t με $n-1$ βαθμούς ελευθερίας και άρα διαστήματα εμπιστοσύνης της μορφής $\hat{\mu}_n \mp t_{n-1}^{1-\frac{\alpha}{2}} \frac{s}{\sqrt{n}}$ (15) έχουν πιθανότητα ακριβώς ίση με $(1-\alpha)$ να εμπεριέχουν την μ . Το $1-\alpha/2$ είναι το αντίστοιχο εκατοστημόριο της κατανομής t με $n-1$ βαθμούς ελευθερίας. Οι προσομοιώσεις Monte Carlo εκτελούν συνήθως μεγάλο αριθμό πειραμάτων και δεν υπάρχει διαφορά μεταξύ των διαστημάτων εμπιστοσύνης που προκύπτουν από τις εξισώσεις (13) και (14). Το επίπεδο ακρίβειας των διαστημάτων εμπιστοσύνης προσεγγίζεται ως:

$$P\left(|\hat{\mu}_n - \mu| \leq \Phi^{-1}\left(1 - \frac{\alpha}{2}\right) \frac{s}{\sqrt{n}}\right) = 1 - \alpha + O(n^{-1}) \text{ για } n \rightarrow \infty \quad (15)$$

Συνεπώς, αν ο στόχος είναι το 99%, καταλήγω με $99\% + O(n^{-1})$ υπό την προϋπόθεση ότι $E(Y^4)$ είναι πεπερασμένη και χρησιμοποιείται για τυχαίες μεταβλητές χωρίς περιορισμούς προσήμου. Η εξίσωση (16) υπονοεί ότι η ακρίβεια του διαστήματος εμπιστοσύνης είναι στην πραγματικότητα καλύτερη από την ακρίβεια της μεθόδου Monte Carlo για την μέση τιμή, η οποία συγκλίνει με $O = N^{-1/2}$.

Παρά τις ιδιαίτερα σημαντικές ιδιότητές της, υπάρχουν περιπτώσεις που η μέθοδος Monte Carlo μπορεί να αποτύχει, π.χ. όταν ο μέσος μ δεν ορίζεται ή λαμβάνει μη πεπερασμένη (άπειρη) τιμή. Μια χαρακτηριστική περίπτωση αποτελεί το παράδοξο του St. Petersburg από τον Daniel Bernulli [203]. Επίσης, η δειγματοληψία Monte Carlo δεν αποδίδει ικανοποιητικά όταν ενδιαφέρουν οι εκτιμήσεις σε ακραία εκατοστημόρια

της κατανομής (π.χ. το 1% ή το 99%). Τέλος, η μέθοδος Monte Carlo αποτυγχάνει σε προβλήματα με μη πεπερασμένη διακύμανση.

4.3.3 Η μέθοδος του Αντίστροφου Μετασχηματισμού

Για την χρήση της Monte Carlo, χρειάζεται να δημιουργηθεί μια αλληλουχία τυχαίων αριθμών (με μηδενική συσχέτιση μεταξύ τους), οι οποίοι είναι ομοιόμορφα κατανομημένοι στο $[0, 1]$. Η δημιουργία των τυχαίων αριθμών γίνεται με υπολογιστικές διαδικασίες, π.χ. το πρόγραμμα E-VIEWS έχει ενσωματωμένες γεννήτριες τυχαίων αριθμών, οι οποίες στηρίζονται σε αναδρομικές σχέσεις υπολογισμού υπολοίπων που προκύπτουν από γραμμικό μετασχηματισμό (π.χ. πολλαπλασιαστική μέθοδος). Στην πραγματικότητα βέβαια, ένα υπολογιστικό πρόγραμμα μπορεί μόνο να προσομοιάσει την διαδικασία παραγωγής τυχαίων αριθμών και γι' αυτό οι αριθμοί αυτοί καλούνται «ψευδο-τυχαίοι», που έχουν όμως κοινά χαρακτηριστικά με τους πραγματικά τυχαίους [163]. Αφού γίνει η παραγωγή των ομοιόμορφα κατανομημένων στο διάστημα $[0,1]$ τυχαίων αριθμών, με κατάλληλο μετασχηματισμό παράγονται τυχαίοι αριθμοί που ακολουθούν την επιθυμητή μη ομοιόμορφη κατανομή.

Έστω ότι θέλουμε να κάνουμε δειγματοληψία από μια συνεχή τυχαία μεταβλητή X με αθροιστική συνάρτηση κατανομής πιθανότητας $F(x)$. Ξέρουμε ότι η τυχαία μεταβλητή $F_X(X)$ είναι ομοιόμορφα κατανομημένη στο διάστημα $[0, 1]$, αφού $P(F_X(X) < u) = P(X < F^{-1}(u)) = F(F^{-1}(u)) = u$. Αυτό συνεπάγεται ότι αν η U είναι ομοιόμορφα κατανομημένη στο $[0, 1]$, τότε η $F^{-1}(u)$ είναι κατανομημένη σαν την X . Έτσι αρκεί να βρούμε την αντίστροφη της αθροιστικής συνάρτησης κατανομής F και να εφαρμόσουμε αυτήν σε μια ομοιόμορφα κατανομημένη τυχαία δειγματοληψία u για να πάρουμε έναν τυχαίο αριθμό από την ζητούμενη κατανομή. Η γενικευμένη διαδικασία παραγωγής τυχαίων μεταβλητών έχει αναλυτικά ως εξής:

- Παράγεται ο τυχαίος αριθμός που κατανέμεται ομοιόμορφα στο διάστημα $[0,1]$ με συνάρτηση κατανομής

$$F_u(u) = \begin{cases} 0, & \text{για } u < 0 \\ u, & \text{για } 0 \leq u \leq 1 \\ 1, & \text{για } u > 1 \end{cases} \quad (16)$$

- Βρίσκεται η τιμή της τυχαίας μεταβλητής x ώστε $F_X(x) = u$. Η εύρεση του x γίνεται με αντιστροφή της συνάρτησης, δηλαδή $x = F_X^{-1}(u)$
- Η τυχαία μεταβλητή x ακολουθεί την συνάρτηση κατανομής $F_X(x)$, η οποία περιγράφει το προς επίλυση μοντέλο

Για παράδειγμα, έστω ότι θέλουμε να παράγουμε τυχαίους αριθμούς από εκθετική κατανομή με συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας $f(x) = \lambda e^{-\lambda x}$ και άρα με κατανομή πιθανότητας $F(x) = 1 - e^{-\lambda x}$. Βρίσκουμε την αντίστροφη συνάρτηση $x = F^{-1}(u) = -\ln(\frac{u}{\lambda})/\lambda$ και κάνοντας μια τυχαία δοκιμή από την $U[0,1]$ και θέτοντας $x_i = F_X^{-1}(u_i)$ λαμβάνουμε μία εκθετικά κατανομημένη τυχαία δοκιμή.

4.3.4 Εφαρμογή της μεθόδου Monte Carlo στο μοντέλο

Στον σχεδιασμό και την κατασκευή του μοντέλου, η επιλογή του συγκεκριμένου αριθμού πειραμάτων Monte Carlo (2048) ουσιαστικά αντιπροσωπεύει συμβιβασμό μεταξύ του οφέλους από καλύτερες στατιστικές ιδιότητες των μεγάλων δειγμάτων, διατηρώντας παράλληλα την υπολογιστική επιβάρυνση και τον χρόνο επίλυσης του στοχαστικού μοντέλου στα πλαίσια του εφικτού. Καταρχήν ο αριθμός των πειραμάτων που καλύπτουν επαρκώς το διάστημα αβεβαιότητας εκτιμώνται με βάση την μέθοδο που εισήχθη από τον Morgan et al [215] για διάστημα εμπιστοσύνης 95%. Η ακρίβεια της μεθόδου βασίζεται στην εκτίμηση του πραγματικού μέσου του δείγματος με σφάλμα μικρότερο από 1%.

Όπως δείξαμε παραπάνω, η τυπική απόκλιση του μέσου (μιας μεταβλητής του μοντέλου) τείνει να μειωθεί σε αναλογία με την τετραγωνική ρίζα του δείγματος. Η μετάβαση από ένα δείγμα 100 σε 1000 πειράματα μειώνει την τυπική απόκλιση της μέσης τιμής κατά 68.4%, ενώ η μεταβολή από 1000 σε 2048 την μειώνει κατά 30.1%. Η μετάβαση από τα σημερινά 2048 πειράματα του PROMHΘEA στα 3000 οδηγεί σε μείωση μόλις κατά 16% της τυπικής απόκλισης του μέσου. Είναι εμφανές ότι εμφανίζονται σαφείς φθίνουσες αποδόσεις καθώς αυξάνεται ο αριθμός των πειραμάτων Monte Carlo και επιλέχθηκε ο αριθμός 2048 δεδομένου ότι είναι υψηλότερος από τις περισσότερες αναλύσεις αβεβαιότητας με χρήση μεγάλης κλίμακας μοντέλων ενέργειας-οικονομίας.

Η επιλογή του αριθμού των 2048 πειραμάτων δικαιολογείται επίσης καθώς αν θεωρήσουμε ένα διάστημα της κατανομής πιθανοτήτων και μια θεωρητική πιθανότητα 1% η τυχαία μεταβλητή να βρίσκεται μέσα σε αυτό το διάστημα, ένα δείγμα από 2048 πειράματα έχει πιθανότητα 97.4% να το υπολογίσει σωστά στο πλησιέστερο ένα τοις εκατό. Εάν το δείγμα είναι 1.000 πειράματα, τότε αυτή η πιθανότητα μειώνεται από 97.4% σε 88.6%, και αν το δείγμα περιέχει 100 πειράματα, η πιθανότητα μειώνεται περισσότερο σε μόλις 37%. Από την άλλη πλευρά, αν εκτελεστούν 4000 τρεξίματα, τότε η πιθανότητα αυξάνεται σε 99.9%. Ωστόσο, PROMHΘEAΣ είναι ένα μοντέλο μεγάλης κλίμακας και υψηλής υπολογιστικής έντασης και συνεπώς η αύξηση των πειραμάτων Monte Carlo σε 4000 συνεπάγεται υψηλό «πρόστιμο» όσον αφορά το χρόνο επίλυσης του μοντέλου (διπλασιασμός). Κατά την διαδικασία της εμπειρικής κατασκευής του μοντέλου, πολλαπλά δείγματα (samples) χρησιμοποιήθηκαν έτσι ώστε να διερευνηθεί αν η επιλογή του αριθμού των 2048 πειραμάτων είναι η βέλτιστη και αν η μέτρηση της αβεβαιότητας για τις κύριες μεταβλητές του παγκόσμιου ενεργειακού συστήματος είναι συνεπής στην επανα-δειγματοληψία (resampling) με τον αριθμό των δειγμάτων να λαμβάνει τις τιμές 100, 1024, 2048, 4096 και 8192. Οι τιμές που προέκυψαν δείχνουν ότι τόσο ο μέσος όρος και η τυπική απόκλιση των εξεταζόμενων μεταβλητών συγκλίνει όταν τα δείγματα ξεπερνούν τα 1000. Ωστόσο, επιλέγονται τα 2048 πειράματα καθώς σε αυτό το δείγμα παρατηρούμε ότι η περαιτέρω αύξηση του αριθμού των πειραμάτων οδηγεί σε ελάχιστες μεταβολές (λιγότερο από 2%) στα στατιστικά στοιχεία των μεταβλητών και τα 2048 πειράματα αντιπροσωπεύουν ένα διαχειρίσιμο πρόβλημα πολυπλοκότητας για το υπόδειγμα που κατασκευάστηκε.

Ενώ συνήθως η τυχαία δειγματοληψία Monte Carlo έχει στόχο την εκτίμηση του μέσου ή/και της τυπικής απόκλισης, υπάρχουν προβλήματα που απαιτούν εκτίμηση συγκεκριμένων και ακραίων εκατοστημορίων κατανομής. Έστω η τυχαία μεταβλητή $Y \sim F$, τότε το 1% εκατοστημόριο της κατανομής $Q^{0.01}$ ορίζεται ως: $P(Y \leq Q^{0.01}) = 0.01$. Από την τιμή του $Q^{0.01}$ είναι δυνατό να κριθεί πόση είναι η απώλεια στο χειρότερο δυνατό σενάριο π.χ. σε χρηματιστηριακά, αξιοπιστία σταθμών ηλεκτροπαραγωγής κ.α. Σε αυτήν την περίπτωση, η εφαρμογή της μεθόδου Monte Carlo αναφέρονται ως πιθανολογική αξιολόγηση κινδύνου, όπως και στην ανάλυση με τον ΠΡΟΜΗΘΕΑ.

Όσον αφορά την στατιστική, χρειάζεται ανάλυση για να βρούμε την τιμή κατώφλι στην οποία ένα στατιστικό τεστ έχει σημαντικότητα 5%. Έστω $T \geq 0$ τυχαία μεταβλητή για την οποία μεγαλύτερες τιμές αναπαριστούν μεγαλύτερες αποκλίσεις από ένα απλοποιημένο μοντέλο (null hypothesis). Συνήθως, το 95% εκατοστημόριο, που ορίζεται ως $P(T \leq Q^{0.95}) = 0.95$, είναι μια κρίσιμη παράμετρος. Αν $T > Q^{0.95}$ τότε συμπεραίνω ότι είτε η υπόθεση δεν περιγράφει σωστά το στατιστικό δείγμα, είτε παρατηρείται ένα γεγονός μικρής πιθανότητας (λιγότερο από 5%). Ο συνηθισμένος τρόπος για την αναπαράσταση του επιθυμητού εκατοστημορίου Q^θ (με $0 < \theta < 1$) είναι η χρήση του αντίστοιχου εκατοστημορίου του δείγματος. Έστω οι μεταβλητές Y_1, Y_2, \dots, Y_n είναι ανεξάρτητες και έχουν την ίδια κατανομή, τις οποίες ταξινομώ με αύξουσα σειρά και συνεπώς ένας εκτιμητής του εκατοστημορίου Q^θ ορίζεται ως εξής:

$$\widehat{Q}^\theta = (1 - \gamma)Y + \gamma Y(t + 1) \quad (17) \quad \text{όπου } t = 1 + \lceil^{14}(n - 1)\theta \rceil$$

$$\text{και } \gamma = (n - 1)\theta - \lfloor (n - 1)\theta \rfloor \quad (18)$$

Οι παραπάνω εξισώσεις ισχύουν προφανώς για $0 < \theta < 1$. Για $\theta = 0$, η εξίσωση είναι καλώς ορισμένη ($Q^0 = 0$), ενώ για $\theta = 1$ δεν είναι, όμως $\lim_{\theta \rightarrow 1} \widehat{Q}^\theta = Y_n$.

4.4 Η εφαρμογή της μεθόδου Latin Hypercube

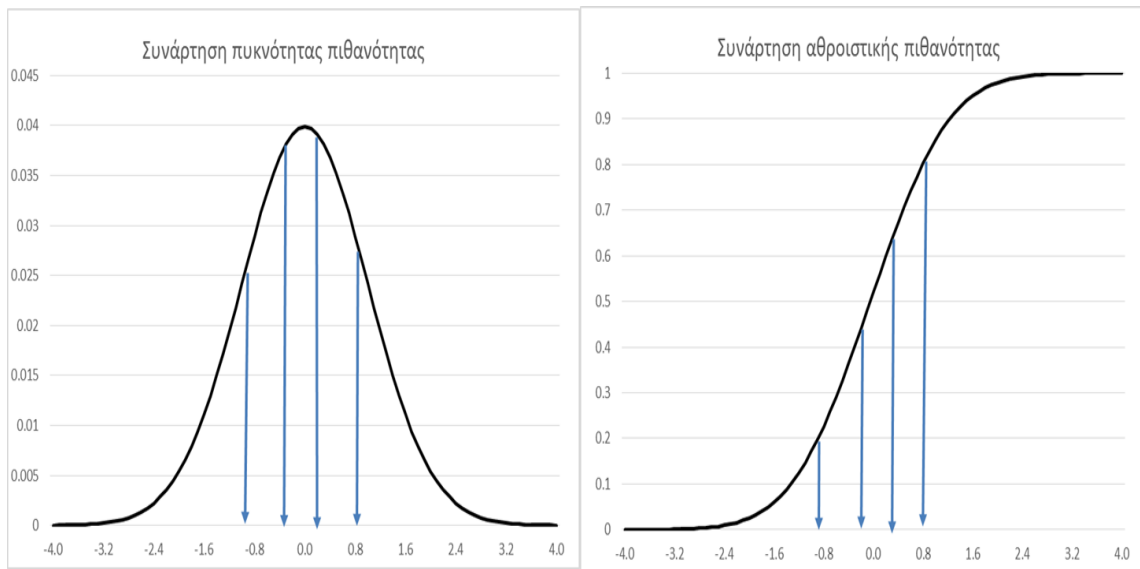
Οι αριθμητικές μέθοδοι χρησιμοποιούνται ευρέως για να δώσουν εκτιμήσεις προσεγγιστικές σε προβλήματα των οποίων η αναλυτική επίλυση είναι πολύπλοκη. Η τεχνική δειγματοληψίας «Latin Hypercube» είναι μια στατιστική μέθοδος για την δημιουργία δείγματος από εύλογες τιμές των παραμέτρων από μια κατανομή πολυδιάστατη. Η μέθοδος αρχικά περιεγράφηκε από τους McKay et al. το 1979 [162] και επεξεργάστηκε περαιτέρω από τους R. L. Iman et al. το 1981 [199]. Αυτό το είδος δειγματοληψίας βελτιώνει τη στατιστική σημασία των πιθανοτήτων σχετικά με τις κοινές εμφανίσεις των παραμέτρων. Συνεπώς ο ΠΡΟΜΗΘΕΑΣ (εκτός από την κλασσική τυχαία μέθοδο δειγματοληψίας για τα πειράματα Monte Carlo), χρησιμοποιεί επίσης την μέθοδο «Latin Hypercube» (McKay et al. 1979 [162]) για ένα σύνολο παραμέτρων, οι οποίες είναι ιδιαίτερα σημαντικές για τις στοχαστικές προεκτάσεις του μοντέλου.

¹⁴ Το συγκεκριμένο σύμβολο χρησιμοποιείται για την στρογγυλοποίηση του αντίστοιχου αριθμού στον πλησιέστερο μικρότερο ακέραιο αριθμό.

Η τεχνική δειγματοληψίας Monte Carlo βασίζεται σε γεννήτριες ψευδο-τυχαίων αριθμών που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή τυχαίων αριθμών και την προσέγγιση της ομοιόμορφης κατανομής (με ίση πιθανότητα στο διάστημα μεταξύ 0 και 1). Τα διαδοχικά σημεία του δείγματος είναι ανεξάρτητα μεταξύ τους. Συνεπώς, το σφάλμα προσέγγισης της κατανομής από ένα πεπερασμένο δείγμα εξαρτάται από τις ιδιότητες ομοιόμορφης κατανομής του δείγματος στο $[0,1]$ παρά από την τυχειότητα του. Από την στιγμή που οι ιδιότητες ομοιομορφίας είναι κεντρικές για τον σχεδιασμό της δειγματοληψίας, οι τεχνικές διαστρωματωμένης δειγματοληψίας έγιναν ελκυστικές (stratified sampling). Η Latin Hypercube αποτελεί μια μορφή διαστρωματωμένης δειγματοληψίας που μπορεί να δώσει πιο ακριβείς εκτιμήσεις της συνάρτησης κατανομής καθώς το εύρος τιμών κάθε τυχαίας μεταβλητής X_i διαχωρίζεται σε μη επικαλυπτόμενα διαστήματα ίσης πιθανότητας. Ο παρακάτω πίνακας παρουσιάζει την τεχνική διαστρωματοποίησης για 2 τυχαίες μεταβλητές το εύρος τιμών των οποίων χωρίζεται σε 5 ισοπίθανα με επικαλυπτόμενα διαστήματα. Μια τιμή από κάθε διάστημα επιλέγεται τυχαία σε σχέση με την συνάρτηση πυκνότητας της κατανομής. Ύστερα, οι n τιμές της μεταβλητή X_1 ζευγαρώνονται με τυχαίο τρόπο (συνδυασμοί ισοδύναμης πιθανότητας) με n τιμές της μεταβλητής X_2 . Αυτές οι n τιμές συνδυάζονται με n τιμές της X_3 κτλ. Συμπερασματικά, όταν δειγματίζεται συνάρτηση N μεταβλητών, το εύρος τιμών κάθε μεταβλητής (σε σύνολο N) χωρίζεται σε M διαστήματα πιθανότητας ίσης με $1/M$, τα οποία συνδυάζονται μεταξύ τους και σχηματίζουν M^N συνδυασμούς «κελιών» που καλύπτουν όλο το εύρος του δείγματος (Πίνακας 4-1). Το παρακάτω γράφημα παρουσιάζει την διαστρωματωμένη δειγματοληψία Latin Hypercube για μια κανονική κατανομή χωρισμένη σε πέντε διαστήματα ίσης πιθανότητας.

Πίνακας 4-1: Απλοποιημένο παράδειγμα δειγματοληψίας Latin Hypercube για δυο μεταβλητές

	1	2	3	4	5
a				x	
b	x				
c		x			
d					x
e			x		

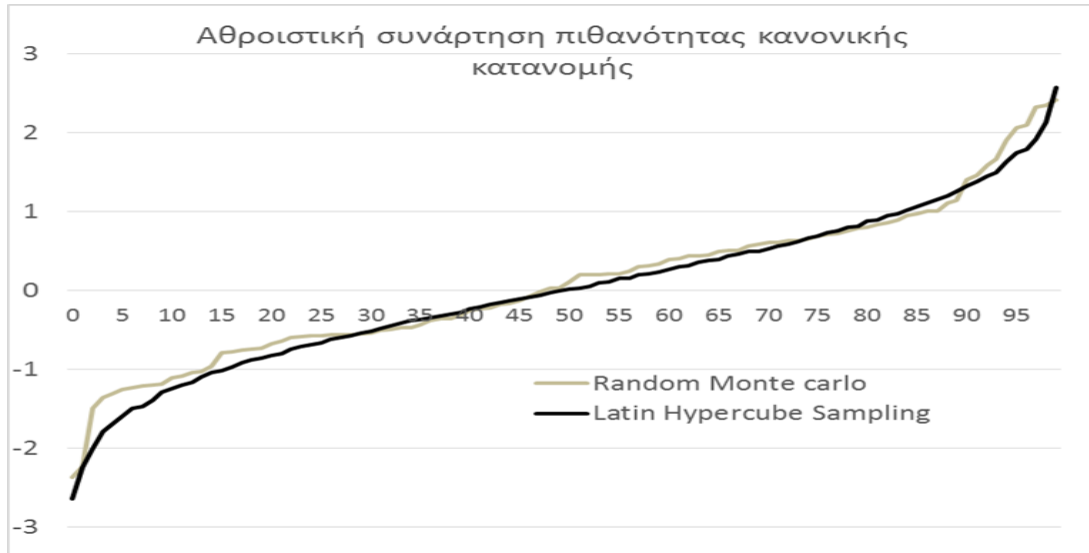


Γράφημα 4-1: Διαστρωματοποίηση κανονικής κατανομής σε 5 ισοπίθανα διαστήματα

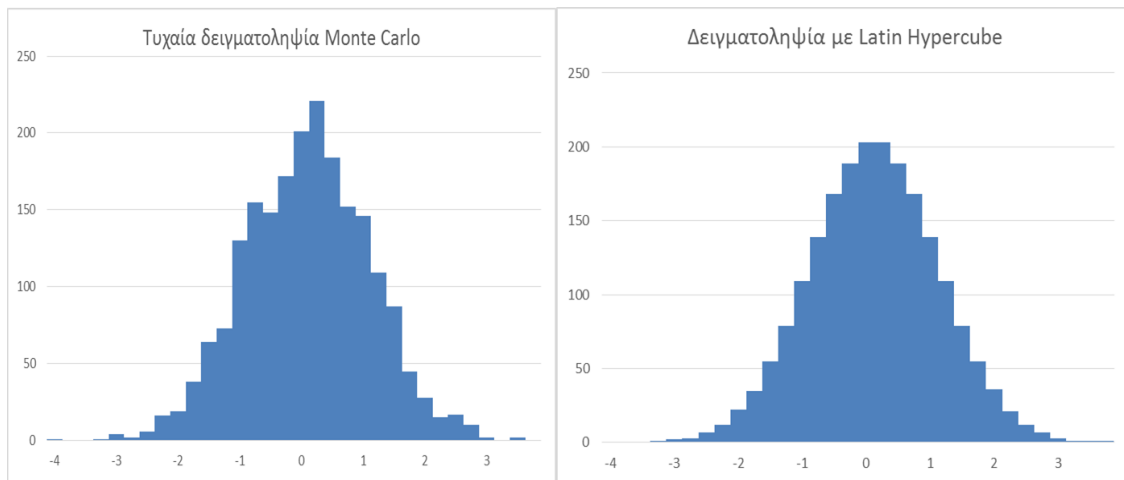
Το κυριότερο πλεονέκτημα της μεθόδου είναι ότι εξασφαλίζει ότι ο συνδυασμός τυχαίων αριθμών είναι αντιπροσωπευτικός της πραγματικής μεταβλητότητας, σε αντίθεση με την τυχαία δειγματοληψία. Ένα επιπλέον πλεονέκτημα της τεχνικής εμφανίζεται όταν το σύνολο κυριαρχείται από μερικές μόνο μεταβλητές, καθώς εξασφαλίζει ότι όλες οι μεταβλητές αντιπροσωπεύονται με έναν διαστρωματοποιημένο τρόπο ανεξάρτητα από την σημασία τους. Τέλος, η τεχνική δεν απαιτεί περισσότερα δείγματα για περισσότερες διαστάσεις (μεταβλητές). Το Γράφημα 4-2 παρουσιάζει την αθροιστική συνάρτηση πιθανότητας που παράγεται από δειγματοληψία κανονικής κατανομής (με δείγμα=100) με δειγματοληψίας τυχαίας Monte Carlo ή *Latin Hypercube*. Παρατηρώ ότι το διάγραμμα της τεχνικής *Latin Hypercube* αποτελεί μια πολύ ομαλότερη καμπύλη και αναπαριστά με καλύτερο τρόπο την κλασική καμπύλη αθροιστικής πιθανότητας της κανονικής κατανομής που έχει σχήμα σιγμοειδές.

Στο πλαίσιο των προσομοιώσεων Monte Carlo για την παραγωγή στοχαστικών δεδομένων εισόδου στον ΠΡΟΜΗΘΕΑ, χρειάζεται προσοχή ώστε να διασφαλιστεί ότι όλοι οι πιθανοί συνδυασμοί των βασικών παραμέτρων περιλαμβάνονται στο δείγμα και συνεπώς χρησιμοποιώ την μέθοδο δειγματοληψίας *Latin Hypercube*. Συγκεκριμένα, πέντε παράμετροι επιλέχθηκαν για την εφαρμογή, οι οποίες καθορίζουν στοχαστικά τον ρυθμό ανάπτυξης της οικονομικής δραστηριότητας στις αναπτυσσόμενες χώρες, τα ανεξερεύνητα παγκόσμια κοιτάσματα πετρελαίου και φυσικού αερίου, τις δαπάνες για R&D στις ενεργειακές τεχνολογίες και την εξέλιξη των διεθνών τιμών των ορυκτών καυσίμων. Το εύρος τιμών κάθε μιας παραμέτρου χωρίζεται σε 4 μη επικαλυπτόμενα διαστήματα ίσης πιθανότητας και συνεπώς δημιουργούνται $4^5 = 1024$ διαφορετικοί συνδυασμοί (η διαδικασία επαναλαμβάνεται 2 φορές για τις 2048 προσομοιώσεις του μοντέλου). Το Γράφημα 4-3 παρουσιάζει την κατανομή πιθανοτήτων που προκύπτει από την δειγματοληψία μιας τυπικής κανονικής κατανομής του ΠΡΟΜΗΘΕΑ για 2048 πειράματα με βάση τυχαία δειγματοληψία Monte Carlo (αριστερό σχήμα) και τεχνική

Latin Hypercube Sampling- LHS (δεξί). Όπως διακρίνεται και στον συνοδευτικό πίνακα, η τεχνική LHS δίνει μια ιδιαίτερα ακριβή δειγματοληψία της συνολικής κατανομής αλλά και των σημαντικών χαρακτηριστικών της (μέσος, διάμεσος και τυπική απόκλιση); Από την άλλη πλευρά, παρά το μεγάλο πλήθος πειραμάτων (2048) η τυχαία μέθοδος Monte Carlo δεν συγκλίνει ικανοποιητικά στην πραγματική κατανομή.



Γράφημα 4-2: Αθροιστική συνάρτηση πιθανότητας για δειγματοληψία για 100 πειράματα με 2 εναλλακτικές μεθόδους (τυχαία Monte Carlo και δειγματοληψία με Latin Hypercube)



	Random	LHS	Standard Normal
Mean	-0.0287	0.0001	0.000
Median	-0.0110	0.0003	0.000
Std. Dev.	1.0118	1.0005	1.000

Γράφημα 4-3: Δειγματοληψία για 2048 πειράματα της τυπικής κανονικής κατανομής με τυχαία μέθοδο Monte Carlo και διστρωματοποιημένη δειγματοληψία με Latin Hypercube

Σε θεωρητικό επίπεδο, οι μέθοδοι διαστρωματοποίησης (όπως η LHS) δίνει πάντα μικρότερη διακύμανση από την τυχαία Monte Carlo. Στην μέθοδο LHS, το εύρος τιμών $\Omega = [0, 1]$ διαχωρίζεται σε M διαστήματα ίσης πιθανότητας (Ω_k) έτσι ώστε:

$$\Omega_k = \left[\frac{k-1}{M}, \frac{k}{M} \right) \quad \text{και} \quad |\Omega_k| = 1/M \quad (19)$$

Σε κάθε διάστημα Ω_k ορίζεται η μέση τιμή $\bar{f}(x) = \bar{f}_k = \left| \frac{1}{\Omega_k} \right| \int f(x) dx$ για $x \in \Omega_k$.

Για κάθε k , το $N_k = N/M$ δείχνει τα σημεία $x_i^{(k)}$ τα οποία είναι ομοιόμορφα κατανεμημένα στο διάστημα Ω_k και συνεπώς ο διαστρωματωμένος τετραγωνικός τύπος είναι το άθροισμα των αντίστοιχων k σε ολόκληρο το εύρος τιμών, δηλαδή:

$$I_N = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^M \sum_{i=1}^{N/M} f(x_i^{(k)}) \quad (20)$$

Το σφάλμα της μεθόδου Monte Carlo για το παραπάνω διαστρωματοποιημένο άθροισμα (τεχνική LHS) είναι:

$$\varepsilon = \sigma_s N^{-1/2} \quad \text{με} \quad \sigma_s^2 = \sum_{k=1}^M \int (f(x) - \bar{f}_k)^2 dx \quad (21)$$

Η απόδειξη ότι η τεχνική Latin Hypercube προτιμάται σε όλες τις περιπτώσεις από την τυχαία Monte Carlo είναι ότι έχει πάντα μικρότερο σφάλμα δειγματοληψίας, δηλαδή $\sigma_s \leq \sigma$. Γενικευμένη απόδειξη ότι οι τεχνικές διαστρωματοποιημένης δειγματοληψίας και Latin Hypercube οδηγεί σε μικρότερη τυπική απόκλιση από την τυχαία τεχνική Monte Carlo περιέχονται από τους McKay et al στο [162] και από τον Caflisch [211], η οποία βασίζεται στην παρακάτω μεθοδολογία. Σε κάθε διάστημα k , ορίζω $\bar{f}_k = c$ την τιμή που ελαχιστοποιεί το $\int (f(x) - c)^2 dx$. Συγκεκριμένα,

$$\int (f(x) - c)^2 dx = \int (f(x) - \bar{f}_k)^2 dx \leq \int (f(x) - \bar{f})^2 dx \quad (22)$$

Αν προσθέσω την παραπάνω εξίσωση για όλα τα k , έχω:

$$\sigma_s^2 = \sum_{k=1}^M \int (f(x) - \bar{f}_k)^2 dx \leq \sum_{k=1}^M \int (f(x) - \bar{f})^2 dx = \sigma^2 \quad (23)$$

4.5 Οικονομετρική εκτίμηση και κατασκευή των κατανομών πιθανοτήτων για τις παραμέτρους εισόδου

4.5.1 Χρήση οικονομικών εκτιμήσεων στο μοντέλο

Οι οικονομικές εκτιμήσεις χρησιμοποιούνται εκτενώς στον ΠΡΟΜΗΘΕΑ, καθώς παρέχουν ένα στοιχείο αντικειμενικότητας, αναγκάζουν τον αναλυτή να διερευνήσει τη φύση και την έκταση των στοχαστικών στοιχείων (γιατί υπήρχε μεταβλητότητα στο παρελθόν) και επιδέχονται την ανάλυση της συνδιακύμανσης και της στατιστικής εξάρτησης των εκτιμώμενων παραμέτρων. Το κύριο μειονέκτημα των οικονομικών μεθόδων είναι η υπερβολική εξάρτησή τους από την ιστορία. Ωστόσο, δεν είναι σαφές αν αυτή η εξάρτηση οδηγεί σε υπερεκτίμηση ή υποεκτίμηση της μεταβλητότητας. Ως εκ τούτου, η μέθοδος καθαυτή δεν παράγει συστηματική

μεροληψία. Επιπλέον, οι οικονομετρικές εκτιμήσεις στον ΠΡΟΜΗΘΕΑ συνήθως πραγματοποιούνται σε μακριές χρονολογικές σειρές, οι οποίες περιλαμβάνουν περιόδους εκτεταμένων αλλαγών στο παγκόσμιο ενεργειακό σύστημα και στις διεθνείς τιμές ενέργειας και ως εκ τούτου η αβεβαιότητα που προέρχεται από τις στατιστικές εκτιμήσεις δεν είναι ιδιαίτερα μικρή και αναπαριστά με ακριβή τρόπο την αβεβαιότητα για την εξέλιξη του ενεργειακού συστήματος συμπεριλαμβανομένων και πιθανοτήτων για γρήγορες και ριζικές αλλαγές (π.χ. πετρελαϊκές κρίσεις των δεκαετιών '70 και '80, υποκατάσταση πετρελαίου από το φυσικό αέριο στην ηλεκτροπαραγωγή).

Η βασική οικονομετρική μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε περιγράφεται παρακάτω. Δεδομένου ενός δείγματος από T παρατηρήσεις

- Ενός $T \times n$ πίνακα \mathbf{X} που περιέχει παρατηρήσεις για n ανεξάρτητες μεταβλητές
- Ενός $T \times 1$ διανύσματος \mathbf{y} που περιέχει παρατηρήσεις για την εξαρτημένη μεταβλητή

το κλασσικό μοντέλο οικονομετρικής εκτίμησης παριστάνεται ως: $\mathbf{y} = f(\mathbf{X}, \boldsymbol{\theta}, \boldsymbol{\varepsilon})$, όπου το $\boldsymbol{\theta}$ είναι το άγνωστο διάνυσμα των παραμέτρων και το $\boldsymbol{\varepsilon}$ συμβολίζει ένα μη παρατηρήσιμο διάνυσμα τυχαίας διαταραχής (για το οποίο συνήθως γίνεται η υπόθεση ότι ακολουθεί την κανονική ή την λογαριθμο-κανονική κατανομή). Η διαδικασία εκτίμησης αντλεί εκτιμήσεις (εκτιμήτες) για το διάνυσμα των παραμέτρων $\hat{\boldsymbol{\theta}} = g(\mathbf{X}, \mathbf{y})$, του όρου σφάλματος $\mathbf{u} = f^{-1}(\hat{\boldsymbol{\theta}}, \mathbf{X}, \mathbf{y})$, της διακύμανσης του $\boldsymbol{\varepsilon}$ και του πίνακα διακύμανσης-συνδιακύμανσης των εκτιμητών $\hat{\boldsymbol{\theta}}$. Η μέθοδος των Ελαχίστων Τετραγώνων (OLS) χρησιμοποιείται κυρίως στον ΠΡΟΜΗΘΕΑ για τις οικονομετρικές εκτιμήσεις. Με βάση αυτήν την μέθοδο, οι εκτιμήτριες των παραμέτρων $\hat{\boldsymbol{\theta}}$ προκύπτουν από την ελαχιστοποίηση των τετραγώνων των σφαλμάτων της εκτίμησης από τις τιμές της εξαρτημένης μεταβλητής οι οποίες έχουν ήδη παρατηρηθεί. Οι υποθέσεις του κλασσικού μοντέλου γραμμικής εκτίμησης (CLRM) είναι οι εξής:

1. Οι παράμετροι της εξίσωσης είναι γραμμικοί
2. Οι τιμές των ανεξάρτητων μεταβλητών \mathbf{X} λαμβάνονται από τυχαίο δείγμα και έχουν διακύμανση $\text{Var}(\mathbf{X}) \neq 0$
3. Οι ανεξάρτητες μεταβλητές δεν έχουν συγγραμμικότητα, δηλαδή καμία ανεξάρτητη μεταβλητή δεν μπορεί να εκφραστεί σαν γραμμικός συνδυασμός των υπόλοιπων ανεξάρτητων μεταβλητών
4. Η μέση τιμή του όρου σφάλματος είναι μηδέν, δηλαδή $E(\mathbf{u}) = 0$
5. Οι όροι σφάλματος έχουν την ίδια διακύμανση (ομοσκεδαστικότητα)
6. Η εξίσωση δεν έχει αυτοσυσχέτιση, δηλαδή οι όροι σφάλματος είναι ανεξάρτητοι μεταξύ τους και ακολουθούν τη κανονική κατανομή με μέσο 0 και την ίδια διακύμανση

Αν όλες οι παραπάνω υποθέσεις τηρούνται, τότε οι εκτιμητές που προκύπτουν από την μέθοδο OLS χαρακτηρίζονται ως BLUE, δηλαδή είναι οι Καλύτεροι (Best), Γραμμικοί (Linear), Αμερόληπτοι (Unbiased) και Αποδοτικοί (Efficient) Εκτιμητές (Estimators). Σύμφωνα με τις υποθέσεις CLRM, οι εκτιμητές των παραμέτρων $\hat{\boldsymbol{\theta}}$ που προκύπτουν από την μέθοδο OLS ακολουθούν την κανονική κατανομή με μέσο $\bar{\boldsymbol{\theta}}$ και

διακύμανση σ_{θ}^2 . Συνεπώς, οι μεταβλητές $\frac{\hat{\theta} - \bar{\theta}}{\sigma_{\theta}}$ ακολουθούν την τυπική κανονική κατανομή (μέσος 0 και διακύμανση ίση με 1). Αν αντικαταστήσω την άγνωστη σ_{θ} με την εκτιμητή της \widehat{s}_{θ} , τότε οι τυχαίες μεταβλητές $\frac{\hat{\theta} - \bar{\theta}}{s_{\theta}}$ ακολουθούν την κατανομή Student-t με $n-1$ βαθμούς ελευθερίας; η κατανομή αυτή είναι παρόμοια με την τυπική κανονική, αλλά έχει μεγαλύτερες σε μέγεθος «ουρές» (στις ακραίες τιμές της κατανομής) ειδικά όταν ο αριθμός των βαθμών ελευθερίας είναι σχετικά μικρός. Η κατανομή Student-t είναι μια συνεχής κατανομή πιθανοτήτων που προκύπτει κατά την εκτίμηση της μέσης τιμής της κανονικής κατανομής του πληθυσμού σε περιπτώσεις όπου το μέγεθος του δείγματος είναι μικρό και τυπική απόκλιση είναι άγνωστη. Όσο το μέγεθος του δείγματος και οι βαθμοί ελευθερίας αυξάνονται, τόσο η κατανομή Student-t προσεγγίζει την κανονική, ενώ είναι συμμετρική κατανομή αλλά με πιο παχιές ουρές σε σύγκριση με την κανονική, δηλαδή έχει μεγαλύτερες πιθανότητες να παράγει τιμές μακριά από τον μέσο της.

Η συνήθης μέθοδος για την μέτρηση της σημαντικότητας των εκτιμητών OLS βασίζεται στον υπολογισμό της στατιστικής $t = \frac{\hat{\theta} - \bar{\theta}}{s_{\theta}}$ αν ισχύει ότι $|t| > t_{crit}$. Μια εναλλακτική μέθοδος για την εκτίμηση της σημαντικότητας των παραμέτρων είναι ο υπολογισμός της τιμής p που είναι το μικρότερο επίπεδο στο οποίο μπορούμε να δεχτούμε την null hypothesis (έλεγχος υπόθεσης). Για παράδειγμα, μια τιμή $p=0.38$ σημαίνει ότι αν $\theta = 0$ υπάρχει πιθανότητα 38% να παρατηρηθεί μια τιμή $\hat{\theta}$ που είναι μεγαλύτερη ή ίση από τον εκτιμητή κατά τύχη. Συνεπώς, αν διενεργώ τεστ για επίπεδο σημαντικότητας 5% τότε απαιτώ η τιμή p να είναι μικρότερη από 0.05.

Όλοι οι εκτιμητές είναι τυχαίες μεταβλητές που μπορούν να παραχθούν κατάλληλα ώστε να προσομοιώσουν τα στοχαστικά χαρακτηριστικά της οικονομετρικά εκτιμημένης εξίσωσης. Η παραγωγή των στοχαστικών στοιχείων στον PROMHΘEA λαμβάνει υπόψη ότι:

- Η διακύμανση της παλινδρόμησης είναι άγνωστη και ως εκ τούτου είναι η ίδια μια τυχαία μεταβλητή. Κατά την εφαρμογή του PROMHΘEA αυτό έχει αποδειχθεί συνήθως μια σημαντική πηγή μεταβλητότητας, δεδομένου ότι τα δείγματα που χρησιμοποιούνται για τις εκτιμήσεις είναι κάποιες φορές σχετικά μικρά.
- Οι εκτιμητές των παραμέτρων είναι στοχαστικοί και χρησιμοποιούνται συνήθως σαν ανεξάρτητες από τον χρόνο στοχαστικές μεταβλητές στις δυναμικές εξισώσεις του μοντέλου (ενότητα 5.5.2)
- Οι εκτιμητές των παραμέτρων δεν είναι στατιστικά ανεξάρτητοι (δηλαδή συν-διακυμαίνονται). Αυτό έχει συχνά αποδειχθεί ότι είναι ένα στοιχείο σταθερότητας (π.χ. αρνητική συσχέτιση μεταξύ της αυτόνομης βελτίωσης της ενεργειακής αποδοτικότητας και της ελαστικότητας ως προς την δραστηριότητα σε μια εξίσωση ζήτησης ενέργειας ενός κλάδου). Ωστόσο, αυτό δεν είναι ένας γενικός κανόνας: μια θετική συνδιακύμανση μεταξύ των ελαστικοτήτων δραστηριότητας και τιμής σε συνδυασμό με μείωση τιμών κατά τη διάρκεια ενός πειράματος Monte-Carlo τείνει να αυξήσει τη μεταβλητότητα της εξίσωσης της ενεργειακής ζήτησης

- Γίνεται η υπόθεση ότι τα υπολείμματα των οικονομετρικά εκτιμημένων εξισώσεων είναι κανονικά κατανομημένα, μεταβάλλονται με το χρόνο, αλλά είναι ανεξάρτητα (δεν έχουν συνδιακύμανση).

4.5.2 Προσδιορισμός εξισώσεων σε δυναμική μορφή

Οι περισσότερες από τις οικονομετρικά εκτιμημένες εξισώσεις του μοντέλου λαμβάνουν τη μορφή διαφοράς λογαριθμικών γραμμικών εξισώσεων (*log linear*), οι οποίες χαρακτηρίζονται από σταθερές ελαστικότητες. Χρησιμοποιώντας τους φυσικούς λογαριθμούς των μεταβλητών στην εκτίμηση εξισώσεων, γραμμικοποιούμε τις πολλαπλασιαστικές εξισώσεις που χρησιμοποιούνται συχνά και συνεπώς οι εκτιμημένες παράμετροι μπορούν να ερμηνευθούν ως ελαστικότητες (π.χ. εισοδήματος ή τιμής). Επιπλέον, η διακύμανση του σφάλματος της εκτίμησης σε αρκετές οικονομετρικές εξισώσεις του μοντέλου δεν είναι σταθερή (δηλαδή το σφάλμα είναι ετεροσκεδαστικό) και συνεπώς ο λογαριθμικός μετασχηματισμός χρησιμοποιείται έτσι ώστε να κάνει τα δεδομένα των χρονολογικών σειρών ομοσκεδαστικά (δηλαδή με σταθερά σφάλματα). Διαπιστώθηκε επίσης ότι είναι προτιμότερο να προσδιοριστούν οι οικονομετρικές εξισώσεις σε δυναμική μορφή, προκειμένου να αποφευχθεί η υπερβολική μεταβλητότητα βραχυπρόθεσμα και να αντιπροσωπεύουν επαρκώς τη συσσώρευση της αβεβαιότητας μακροπρόθεσμα. Για αρκετές από τις εξισώσεις του μοντέλου, αποφασίστηκε να εκτιμηθούν σε όρους διαφοράς έτσι ώστε να αφαιρεθεί το στοιχείο τάσης από την χρονολογική σειρά. Η σωστή επιλογή της αρχής του δείγματος είναι ιδιαίτερα σημαντική για την δυναμική εκτίμηση, καθώς οι δυναμικές προβλέψεις πραγματοποιούνται σε πολλά στάδια χρησιμοποιώντας τις αναδρομικά υπολογισμένες προβλέψεις για την τιμή (της προηγούμενης περιόδου) της εξαρτημένης μεταβλητής. Η θεωρία των εξισώσεων διαφορών που χρησιμοποιούνται ευρέως στον ΠΡΟΜΗΘΕΑ συσχετίζονται και έχουν δυναμικές ιδιότητες ίδιες με τις αντίστοιχες διαφορικές εξισώσεις πρώτου βαθμού.

Γενικά, μια στοχαστική διαδικασία ονομάζεται στάσιμη αν ο μέσος και η διακύμανσή της δεν μεταβάλλονται διαχρονικά και η συνδιακύμανση των τιμών της σε δύο χρονικές περιόδους εξαρτάται μόνο από τις χρονικές υστερήσεις και όχι από καθαυτό το χρονικό σημείο στο οποίο υπολογίζεται (δεύτερης τάξης στασιμότητα). Έτσι, μια στάσιμη χρονολογική σειρά έχει σταθερές ιδιότητες, δηλαδή σταθερό μέσο, διακύμανση και συνδιακύμανση στον χρόνο. Οι περισσότερες στατιστικές μέθοδοι εκτίμησης βασίζονται στην παραδοχή ότι οι χρονολογικές σειρές μπορούν να καταστούν στάσιμες με την χρήση κατάλληλων μαθηματικών μετασχηματισμών και άρα χρήσιμες για μελλοντικές προβλέψεις, αφού η κλασική ανάλυση παλινδρόμησης δεν είναι έγκυρη για μη στάσιμες χρονολογικές σειρές. Η διαδικασία για να κάνω στάσιμη μια χρονοσειρά μέσω των εξισώσεων διαφορών είναι σημαντικό μέρος της διαδικασίας προσαρμογής σε ένα μοντέλο ARIMA, το οποίο εισήχθη αρχικά από τους Box και Jenkins [206]. Το κλασικό μοντέλο αυτοπαλινδρόμησης 1^{ης} τάξης AR(1) είναι:

$$Y_t = \phi Y_{t-1} + u_t \quad (24)$$

Όπου u_t είναι Gaussian λευκός θόρυβος (μηδενικός μέσος όρος, σταθερή διακύμανση). Η εξίσωση (24) δείχνει ότι η συμπεριφορά της Y_t καθορίζεται από την τιμή της στη προηγούμενη περίοδο. Για να είναι η χρονοσειρά στατική πρέπει $|\varphi| < 1$, καθώς σε αντίθετη περίπτωση η τιμή της Y_t γίνεται όλο και μεγαλύτερη συνεχώς. Μια γενίκευση του μοντέλου $AR(1)$ είναι το μοντέλο $AR(p)$

$$Y_t = \varphi_1 Y_{t-1} + \varphi_2 Y_{t-2} + \dots + \varphi_p Y_{t-p} + u_t = \sum_{i=1}^p \varphi_i Y_{t-i} + u_t \quad (25)$$

Τέλος, χρησιμοποιώντας το σύμβολο υστέρησης L (όπου $L^p Y_t = Y_{t-p}$) μπορώ να γράψω την εξίσωση ως: $Y_t(1 - \varphi_1 L - \varphi_2 L^2 - \dots - \varphi_p L^p) = \Phi(L)Y_t = u_t$ (26)

Εγγύηση για την στασιμότητα της διαδικασίας $AR(p)$ είναι όταν οι p ρίζες της πολυωνυμικής εξίσωσης $\Phi(z)=0$ είναι (σε απόλυτη τιμή) μεγαλύτερες ή ίσες με τη μονάδα. Επίσης, μια αναγκαία αλλά όχι ικανή συνθήκη για την στασιμότητα του $AR(p)$ μοντέλου είναι ότι το άθροισμα των p παραγόντων αυτοπαλιδρόμησης φ_p να είναι μικρότερο της μονάδας. Αν στην παραπάνω εξίσωση προσθέσω και την επίπτωση στην Y_t από τις τιμές των προηγούμενων σφαλμάτων, καταλήγω στο μοντέλο $ARMA(p,q)$ (Autoregressive Moving Average) με γενική μορφή:

$$Y_t = \sum_{i=1}^p \varphi_i Y_{t-i} + u_t + \sum_{j=1}^q \theta_j u_{t-j} \quad (27)$$

Ή χρησιμοποιώντας το σύμβολο χρονικής υστέρησης

$$\Phi(L)Y_t = \Theta(L)u_t \quad (28)$$

Η εγγύηση για την στασιμότητα της διαδικασίας $ARMA(p,q)$ είναι μόνο όταν οι p ρίζες της πολυωνυμικής εξίσωσης $\Phi(z)=0$ είναι (σε απόλυτη τιμή) μεγαλύτερες ή ίσες με τη μονάδα. Οι τιμές των παραγόντων φ_i καθορίζουν την ταχύτητα με την οποία η σειρά τείνει να επιστρέφει στο μέσο της; Όσο μικρότερη είναι η τιμή και τείνει στο μηδέν τόσο γρηγορότερα γίνεται η σύγκλιση της σειράς. Επιπλέον, η αντιστρεψιμότητα εξασφαλίζεται όταν οι ρίζες της $\Theta(z)=0$ είναι επίσης μεγαλύτερες ή ίσες από 1 (σε απόλυτη τιμή). Ο συνηθέστερος τρόπος για να κάνω στάσιμη μια χρονολογική σειρά (ώστε να εφαρμόσω και το μοντέλο $ARMA$) είναι οι εξισώσεις διαφοράς, δηλαδή $\Delta Y_t = Y_t - Y_{t-1}$. Στον ΠΡΟΜΗΘΕΑ, οι περισσότερες χρονολογικές σειρές (π.χ. ΑΕΠ, ζήτηση ενέργειας) έχουν σε κάποιο βαθμό ένα στοιχείο τάσης, το οποίο απαλείφεται όταν χρησιμοποιώ εξισώσεις διαφορών. Αν με την χρήση διαφορών 1^{ης} τάξης η χρονοσειρά γίνεται στάσιμη, τότε λέμε ότι είναι ολοκληρωμένο μοντέλο αυτοπαλιδρόμησης 1^{ου} βαθμού; Σε αντίθετη περίπτωση χρησιμοποιώ δεύτερες διαφορές $\Delta \Delta Y_t = \Delta Y_t^2 = \Delta Y_t - \Delta Y_{t-1}$. Στον ΠΡΟΜΗΘΕΑ, σε όλες τις περιπτώσεις η μη στασιμότητα των χρονοσειρών απαλείφθηκε με τις διαφορές 1^{ου} βαθμού.

Η αυτοσυνδιακύμανση μεταξύ δύο παρατηρήσεων της χρονολογικής σειράς που απέχουν μεταξύ τους s χρονικές περιόδους ορίζεται ως:

$$\rho_s = \frac{\text{Cov}(Y_t, Y_{t-s})}{\sqrt{\text{Var}(Y_t) * \text{Var}(Y_{t-s})}}$$

Ενώ η συνάρτηση αυτοσυσχέτισης του δείγματος (ACF)

$$r_s = \frac{\sum(Y_t - \bar{Y})(Y_{t-s} - \bar{Y})}{\sum(Y_t - \bar{Y})^2} \quad (29)$$

Η συνάρτηση ACF χρησιμοποιείται για την αναγνώριση των μοντέλων ARIMA. Το γράφημα της ACF (κορελόγραμμα) δείχνει την συσχέτιση της σειράς με τον εαυτό της με υστερήσεις, ενώ η μερική ACF εξηγεί το μέγεθος της αυτοσυσχέτισης στην υστέρηση k που δεν επεξηγείται με χαμηλότερου βαθμού αυτοσυσχετίσεις. Θεωρητικά, αν η σειρά δεν είναι στάσιμη, τότε η ACF της σειράς δεν θα μειώνεται με τον χρόνο και αυτό μας δίνει σήμα για να χρησιμοποιήσουμε λογαρίθμους και εξισώσεις διαφορών για να κάνουμε την σειρά στάσιμη.

Στην εξίσωση (24), σε περίπτωση που $\varphi=1$ τότε η Y_t περιέχει μια μοναδιαία ρίζα (unit root). Τότε, ισχύει ότι $\Delta Y_t = Y_t - Y_{t-1} = \varphi Y_{t-1} + u_t - Y_{t-1} = u_t$ (30), και αφού το σφάλμα είναι μια διαδικασία λευκού θορύβου τότε το ΔY_t είναι στάσιμη χρονολογική σειρά. Γενικεύοντας, ορίζω ότι μια σειρά Y_t είναι ολοκληρωμένη τάξεως d -δηλαδή $Y_t \sim I(d)$ - αν η Y_t είναι μη στάσιμη αλλά η $\Delta^d Y_t$ είναι στάσιμη. Συνεπώς, η τάξη ολοκλήρωσης της σειράς ισούται με τον αριθμό των μοναδιαίων ριζών και επίσης με την τάξη των εξισώσεων διαφορών ώστε η σειρά να γίνει στάσιμη.

Ο προσδιορισμός των εξισώσεων σε δυναμική μορφή χρησιμοποιώντας χρονικές υστερήσεις στις μεταβλητές γίνεται για να ενσωματωθεί η έννοια του χρόνου (σε αντίθεση με τα στατικά συστήματα και εξισώσεις). Χρονική υστέρηση μπορεί να εισαχθεί είτε στις τιμές των εξωγενών μεταβλητών \mathbf{X} (distributed lag) είτε στις ενδογενείς μεταβλητές \mathbf{y} (αυτοπλινδρόμηση, autoregression). Στην πρώτη περίπτωση:

$$Y_t = a + \beta_0 X_t + \beta_1 X_{t-1} + \dots + \beta_p X_{t-p} + u_t \quad (30)$$

Σύμφωνα με την οποία, η τιμή της Y_t εξαρτάται τόσο από τρέχουσες όσο και από προηγούμενες τιμές της ανεξάρτητης μεταβλητής X_t . Σε αρκετές περιπτώσεις, η τιμή της εξαρτημένης μεταβλητής θα μεταβληθεί εξαιτίας μιας αλλαγής στις ανεξάρτητες μεταβλητές μόνο μετά από κάποιο χρονικό διάστημα εξαιτίας φαινομένων υστέρησης στις οικονομικές αποφάσεις ή στην συλλογή στατιστικών δεδομένων. Στον ΠΡΟΜΗΘΕΑ η χρήση εκτιμήσεων με το υπόδειγμα Καταναμημένων Χρονικών Επιδράσεων (PDL) γίνεται συνήθως για την ποσοτικοποίηση της επίδρασης των τιμών ενέργειας στην εξέλιξη της ζήτησης ενέργειας από τους καταναλωτές.

$$Y_t = a + \sum_{i=0}^p \beta_i X_{t-i} + u_t \quad (31)$$

Με αυτό το μοντέλο, η αντίδραση της μεταβλητής Y_t κατανέμεται σε περιόδους p . Οι παράμετροι β_0 μετρούν την επίδραση της τρέχουσας τιμής X_t στην Y_t , ενώ οι β_i την επίδραση των προηγούμενων χρονικά τιμών της X_{t-i} στην Y_t . Η συνολική επίδραση

δίνεται από το άθροισμα των επιδράσεων σε όλες τις περιόδους $\sum_{i=0}^p \beta_i$, το οποίο επίσης αποκαλείται μακροπρόθεσμο αποτέλεσμα ισορροπίας *stade state*. Το υπόδειγμα Κατανεμημένων Χρονικών Επιδράσεων μπορεί να εκτιμηθεί με την χρήση της μεθόδου OLS και οι εκτιμητές β_i είναι BLUE. Συχνά στην κατασκευή του μοντέλου λαμβάνεται η απόφαση για το πόσες χρονικές υστερήσεις θα πρέπει να εισαχθούν στην οικονομετρική εκτίμηση. Η συνήθης μέθοδος που ακολουθήθηκε σε αυτές τις περιπτώσεις είναι η επιβολή περιορισμών στην δομή και το πρόσημο των β_i και μετά μειώνω από τον αριθμό των παραμέτρων από $p+1$ σε όλο και λιγότερες. Για τον σκοπό αυτό χρησιμοποιούμε τον μετασχηματισμό του Almon [204], ο οποίος υποθέτει ότι οι παράμετροι β_i μπορούν να προσεγγιστούν με πολυώνυμα του i μορφής

$$\beta_i = g(i) = a_0 i^0 + a_1 i^1 + \dots + a_r i^r \quad (32)$$

Η μέθοδος του Almon απαιτεί προηγουμένως επιλογή του βαθμού του πολυωνύμου r καθώς και της μεγαλύτερης υστέρησης που χρησιμοποιείται p . Για παράδειγμα, στην εξίσωση της ζήτησης ηλεκτρισμού από την βιομηχανία στην ΕΕ, η επίδραση της τιμής της ηλεκτρικής ενέργειας στην ζήτηση ακολουθεί υπόδειγμα των Κατανεμημένων Χρονικών Επιδράσεων και απαιτούμε ότι ο αριθμός των υστερήσεων είναι $p=4$ ενώ βαθμός του πολυωνύμου ισούται με $r=3$ (είναι προφανές ότι σε κάθε περίπτωση ισχύει $r \leq p$). Οπότε έχουμε,

$$\beta_0 = g(0) = a_0$$

$$\beta_1 = g(1) = a_0 + a_1 + a_2 + a_3$$

$$\beta_2 = g(2) = a_0 + 2a_1 + 4a_2 + 8a_3$$

$$\beta_3 = g(3) = a_0 + 3a_1 + 9a_2 + 27a_3$$

$$\beta_4 = g(4) = a_0 + 4a_1 + 16a_2 + 64a_3$$

$$\begin{aligned} Y_t &= a + \beta_0 X_t + \beta_1 X_{t-1} + \dots + \beta_p X_{t-p} + u_t \\ &= a + a_0 X_t + (a_0 + a_1 + a_2 + a_3) X_{t-1} \\ &\quad + (a_0 + 2a_1 + 4a_2 + 8a_3) X_{t-2} + (a_0 + 3a_1 + 9a_2 + 27a_3) X_{t-3} \\ &\quad + (a_0 + 4a_1 + 16a_2 + 64a_3) X_{t-4} + u_t \end{aligned} \quad (33)$$

$$\begin{aligned} Y_t &= a + a_0 (X_t + X_{t-1} + X_{t-2} + X_{t-3} + X_{t-4}) + a_1 (X_{t-1} + 2X_{t-2} + 3X_{t-3} + 4X_{t-4}) \\ &\quad + a_2 (X_{t-1} + 4X_{t-2} + 9X_{t-3} + 16X_{t-4}) \\ &\quad + a_3 (X_{t-1} + 8X_{t-2} + 27X_{t-3} + 64X_{t-4}) + u_t \end{aligned} \quad (34)$$

Συνεπώς, αυτό που απαιτείται είναι η εφαρμογή κατάλληλου μετασχηματισμού των X_i όπως παραπάνω. Στην περίπτωση που ο παράγοντας a_3 δεν είναι στατιστικά σημαντικός τότε προτιμάται ένα πολυώνυμο 2^{ου} βαθμού.

Τα μοντέλα αυτοπαλινδρόμησης περιέχουν όρους υστέρησης των εξαρτημένων μεταβλητών. Σύμφωνα με το μοντέλο μερικής προσαρμογής το οποίο υποθέτει ότι η μεταβολή στην πραγματική Y_t δηλαδή $Y_t - Y_{t-1}$ θα ισούται με ένα ποσοστό λ (το οποίο παίρνει τιμές μεταξύ 0 και 1) της αλλαγής από την ισορροπία, δηλαδή $Y_t - Y_{t-1} = \lambda * (Y_t^* - Y_{t-1})$ (34). Η $1/\lambda$ αναπαριστά την ταχύτητα προσαρμογής. Σε περίπτωση που $\lambda=1$

τότε $Y_t^* = Y_t$ και συνεπώς η προσαρμογή στο βέλτιστο επίπεδο είναι ακαριαία, ενώ όταν $\lambda=0$ τότε $Y_t = Y_{t-1}$ που σημαίνει ότι δεν υπάρχει προσαρμογή του Y_t . Συνεπώς, όσο το λ πλησιάζει το 1, τόσο αυξάνεται η ταχύτητα σύγκλισης.

Η εκτιμητική μέθοδος των ελαχίστων τετραγώνων έχει αποδειχθεί ότι παρέχει την κατάλληλη μεθοδολογία εκτίμησης στις περισσότερες περιπτώσεις εξισώσεων στον ΠΡΟΜΗΘΕΑ. Επιπλέον, εκτιμήσεις με την μέθοδο ελαχίστων τετραγώνων σε τρία στάδια πραγματοποιήθηκαν για την ταυτόχρονη εκτίμηση σε ορισμένα μπλοκ εξισώσεων, κυρίως στο μοντέλο της ενδογενούς τεχνολογικής προόδου και στις εξισώσεις για την εξέλιξη της ιδιοκτησίας επιβατικών αυτοκινήτων στις αναπτυσσόμενες και αναπτυσσόμενες περιοχές. Στις περιπτώσεις όπου η σειριακή συσχέτιση των όρων σφάλματος βρέθηκε να είναι στατιστικά σημαντική, πραγματοποιήθηκε κατάλληλη διόρθωση στην εκτιμώμενη εξίσωση και ενσωματώθηκε η δομή αυτοσυσχέτισης ως μέρος του προσδιορισμού των εξισώσεων του μοντέλου.

Οι όροι σφάλματος αντιπροσωπεύουν το συνδυασμένο αποτέλεσμα των μεταβλητών που δεν έχουν μοντελοποιηθεί ρητά στην οικονομετρική εκτίμηση (π.χ. στην εξίσωση της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας των νοικοκυριών, ο όρος σφάλματος αντιπροσωπεύει το συνδυασμένο αποτέλεσμα των ημερών θέρμανσης, το βαθμό ιδιοκτησίας των ηλεκτρικών συσκευών ανά νοικοκυριό κ.λπ.). Το θεώρημα του *Gauss-Markov* αναφέρει ότι αν οι όροι σφάλματος είναι σταθεροί και δεν έχουν σειριακή συσχέτιση, τότε η εκτίμηση με βάση την μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων δίνει τους καλύτερους, γραμμικούς και αμερόληπτες εκτιμήτριες για τις παραμέτρους (BLUE estimators). Ωστόσο, η παρουσία αυτοσυσχετιζόμενων όρων σφάλματος που παραβαίνουν τις παραπάνω παραδοχές είναι συνηθισμένη σε δεδομένα χρονολογικών σειρών που χρησιμοποιούνται στον ΠΡΟΜΗΘΕΑ [164]. Οι κυριότερες αιτίες εμφάνισης αυτοσυσχέτισης (autocorrelation) είναι ο μη σωστός προσδιορισμός του μοντέλου, η ύπαρξη μεταβλητών που δεν έχουν συμπεριληφθεί στην εκτίμηση και η ύπαρξη συστηματικού λάθους στην μέτρηση των μεταβλητών. Η στρατηγική που υιοθετήθηκε για την αντιμετώπιση του προβλήματος είναι η συμπερίληψη των όρων αυτοπαλίνδρομησης [16,17] πρώτης τάξης (*AR1 terms*), στον προσδιορισμό της εξίσωσης, που αφαιρεί τη σειριακή συσχέτιση από τους όρους σφάλματος, δηλαδή

$$u_t = p * u_{t-1} + \varepsilon_t \quad (35)$$

Όπου u_t είναι ο όρος σφάλματος της οικονομετρικής εξίσωσης, ε_t είναι μια σειρά από σειριακά ανεξάρτητους αριθμούς με μηδενικό μέσο και σταθερή διακύμανση και το p αντιπροσωπεύει τον όρο αυτοσυσχέτισης [165]. Στις περισσότερες περιπτώσεις ισχύει ότι $|p| < 1$, δηλαδή η διαδικασία είναι στατική υπό την ευρεία έννοια (wide-sense stationary) και συνεπώς η μέση τιμή και η συνάρτηση αυτοσυσχέτισης παραμένουν σταθερές στην πάροδο του χρόνου. Στην περίπτωση που $|p| \geq 1$ η διαδικασία έχει άπειρη διακύμανση και δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί στο μοντέλο. Στο μοντέλο, η ύπαρξη αρνητικής συσχέτισης είναι πολύ λιγότερο πιθανή σε σχέση με την θετική συσχέτιση. Θεωρητικά, η αυτοσυσχέτιση μπορεί να είναι μεγαλύτερης τάξης,

$$u_t = p_1 * u_{t-1} + p_2 * u_{t-2} + \dots + p_\rho * u_{t-\rho} + \varepsilon \quad (36)$$

Σε αυτήν την περίπτωση, υπάρχει αυτοσυσχέτιση τάξεως ρ , η οποία είναι ιδιαίτερα πιθανό να συμβαίνει σε τριμηνιαία ($\rho=4$) ή μηνιαία ($\rho=12$) δεδομένα. Από την άλλη πλευρά, ο ΠΡΟΜΗΘΕΑΣ χρησιμοποιεί ετήσια δεδομένα και συνεπώς δεν υπάρχει αυτοσυσχέτιση τάξεως μεγαλύτερης από 1 σε καμία εκτιμημένη εξίσωση. Για τον έλεγχο αυτοσυσχέτισης στο μοντέλο χρησιμοποιώ το κριτήριο Durbin-Watson και τον εμπειρικό κανόνα σύμφωνα με τον οποίο αν ο δείκτης Durbin-Watson παίρνει τιμή κοντά στο 2, τότε δεν υπάρχει αυτοσυσχέτιση.

Στη γενική περίπτωση μια χρονοσειρά μπορεί να περιέχει μακροχρόνιες τάσεις και/ή περιοδικότητα ή εποχικότητα σταθερής περιόδου d , όπως επιχειρησιακοί κύκλοι (*regular business cycles*). Η απαλοιφή της τάσης και της περιοδικότητας μετατρέπει τις μη στάσιμες χρονολογικές σειρές σε στάσιμες, οι οποίες μπορούν να μελετηθούν οικονομικά. Στο μοντέλο, η απαλοιφή της τάσης γίνεται συνήθως με χρήση γραμμικών συναρτήσεων ή με χρησιμοποίηση δεικτών σε σταθερές τιμές που είναι δηλαδή αποπληθωρισμένες. Η χρήση ετήσιων δεδομένων στον ΠΡΟΜΗΘΕΑ εξαλείφει την εποχικότητα και τους ετήσιους περιοδικούς κύκλους.

4.5.3 Διανυσματικές αυτοπαλινδρομήσεις και έλεγχος αιτιότητας

Σε μακρο-οικονομικές σειρές, είναι αρκετά συνηθισμένο τα μοντέλα να περιέχουν μερικές μεταβλητές που δεν είναι μόνο επεξηγηματικές για εξαρτημένες μεταβλητές, αλλά επίσης εξαρτώνται από τις τελευταίες. Σύμφωνα με τον Sims (1980) [205] αν υπάρχει ταυτοχρονισμός μεταξύ ενός αριθμού μεταβλητών τότε πρέπει όλες οι μεταβλητές να αντιμετωπιστούν ως ενδογενείς και καθεμιά προσδιορίζεται ως συνάρτηση των προηγούμενων τιμών των υπόλοιπων μεταβλητών του συστήματος. Το απλό υπόδειγμα διανυσματικών αυτοπαλινδρομήσεων (VAR) δυο μεταβλητών πρώτης τάξης είναι γενίκευση των ARMA και ορίζεται ως εξής:

$$Y_t = \beta_{10} - \beta_{12}X_t + \gamma_{11}Y_{t-1} + \gamma_{12}X_{t-1} + u_{yt} \quad (37)$$

$$X_t = \beta_{20} - \beta_{21}Y_t + \gamma_{21}Y_{t-1} + \gamma_{22}X_{t-1} + u_{xt} \quad (38)$$

Όπου υποθέτουμε ότι οι χρονοσειρές X_t και Y_t είναι στατικές και τα σφάλματα u_{yt} και u_{xt} είναι μη συσχετισμένα με μηδενικό μέσο και σταθερή διακύμανση. Μπορώ να ξαναγράψω το παραπάνω σύστημα εξισώσεων με χρήση άλγεβρας πινάκων:

$$\begin{bmatrix} 1 & \beta_{12} \\ \beta_{21} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Y_t \\ X_t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \beta_{10} \\ \beta_{20} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \gamma_{11} & \gamma_{12} \\ \gamma_{21} & \gamma_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Y_{t-1} \\ X_{t-1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} u_{yt} \\ u_{xt} \end{bmatrix} \quad (39)$$

ή αντικαθιστώντας

$$\mathbf{Bz}_t = \mathbf{\Gamma}_0 + \mathbf{\Gamma}_1\mathbf{z}_{t-1} + \mathbf{u}_t^{15} \quad (40) \text{ η οποία μπορεί να ξαναγραφεί ως}$$

$$\mathbf{z}_t = \mathbf{A}_0 + \mathbf{A}_1\mathbf{z}_{t-1} + \mathbf{e}_t^{16} \quad (41)$$

¹⁵Στην παραπάνω περιγραφή, τα έντονα γράμματα υποδεικνύουν διανύσματα, ενώ τα έντονα κεφαλαία γράμματα υποδεικνύουν πίνακες.

¹⁶Στην παραπάνω περιγραφή, τα έντονα γράμματα υποδεικνύουν διανύσματα, ενώ τα έντονα κεφαλαία γράμματα υποδεικνύουν πίνακες.

Η προσέγγιση με την μέθοδο VAR είναι αρκετά απλή, κάνει χρήση της μεθόδου OLS, δεν αναγκάζει τον ερευνητή να διαχωρίσει τις μεταβλητές σε ενδογενείς και εξωγενείς και οι προβλέψεις που αποκτώνται με την VAR είναι πολύ συχνά καλύτερες από τις αντίστοιχες με χρήση πολύπλοκων μοντέλων με ταυτόχρονες εξισώσεις. Από την άλλη πλευρά, η κριτική επικεντρώνεται στην απώλεια βαθμών ελευθερίας, ειδικά σε περιπτώσεις μικρών σχετικά δειγμάτων, και στην δυσκολία ερμηνείας εκτιμήσεων για τις παραμέτρους των εξισώσεων. Πολλές πραγματικές χρονολογικές σειρές που προέρχονται από δυναμικά συστήματα ταλαντώσεων (oscillation) και περιγράφουν διάφορα φαινόμενα, χαρακτηρίζονται από διαδοχικές ανοδικές και καθοδικές τάσεις χωρίς απαραίτητα περιοδικότητα, κάτι που εμποδίζει τη χρήση εποχικών μοντέλων για τη μελέτη τέτοιων δεδομένων και τυπικά η παλινδρόμηση τέτοιων σειρών γίνεται με γραμμικά ή μη-γραμμικά αυτοπαλινδρομούμενα μοντέλα (AR), συνήθως μεγάλης τάξης. Τα μειονεκτήματα αυτής της προσέγγισης είναι η διόγκωση του σφάλματος πρόβλεψης λόγω της μεγάλης τάξης του AR μοντέλου και η αδυναμία ικανοποιητικής πρόβλεψης της επόμενης τιμής κάποιου χαρακτηριστικού της ταλάντωσης (π.χ. μέγιστο). Όταν οι ταλαντευόμενες χρονοσειρές δεν έχουν περιοδικότητα, όπως αυτές που προέρχονται από χαοτικά συστήματα, το πρόβλημα έγκειται κυρίως στον προσδιορισμό του χρόνου και του μεγέθους των κορυφών και των κατώτατων σημείων. Κατά την κατασκευή του μοντέλου, δεν υπήρχε κάποια χρονολογική σειρά με χαρακτηριστικά ταλάντωσης.

Η αιτιότητα στην οικονομετρία αναφέρεται στην ικανότητα μιας μεταβλητής να προβλέπει (και άρα να «προκαλεί») τις άλλες μεταβλητές. Ο Granger [207] ανέπτυξε ένα σχετικά απλό υπόδειγμα που ορίζει την αιτιότητα ως: η μεταβλητή Y_t «προκαλεί» κατά Granger την X_t αν η X_t μπορεί να προβλεφθεί με μεγαλύτερη ακρίβεια με την χρήση προηγούμενων τιμών της Y_t παρά μη χρησιμοποιώντας αυτές. Το τεστ Granger για 2 στάσιμες μεταβλητές Y_t και X_t περιέχει σαν πρώτο βήμα την εκτίμηση για το παρακάτω μοντέλο VAR.

$$Y_t = a_1 + \sum_{i=1}^n \beta_i X_{t-i} + \sum_{j=1}^m \gamma_j Y_{t-j} + e_{1t} \quad (42)$$

$$X_t = a_2 + \sum_{i=1}^n \theta_i X_{t-i} + \sum_{j=1}^m \delta_j Y_{t-j} + e_{2t} \quad (43)$$

Όπου υποθέτω ότι τα σφάλματα είναι λευκός θόρυβος μηδενικού μέσου όρου και ασυσχέτιστα. Σε αυτό το μοντέλο, υπάρχουν 4 περιπτώσεις:

- (1) Οι σειρές χ και ψ δεν είναι στατιστικά διαφορετικές από το μηδέν και άρα οι μεταβλητές X_t και Y_t είναι ανεξάρτητες
- (2) Οι σειρές χ και ψ είναι στατιστικά διαφορετικές από το μηδέν και άρα έχουμε αιτιότητα διπλής κατεύθυνσης (bidirectional causality)
- (3) Οι όροι υστέρησης χ είναι στατιστικά διαφορετικοί από το μηδέν, ενώ το αντίστροφο ισχύει για το ψ . Τότε, η X_t «προκαλεί» την Y_t
- (4) Οι όροι υστέρησης ψ είναι στατιστικά διαφορετικοί από το μηδέν, ενώ το αντίστροφο ισχύει για το χ . Τότε, η Y_t «προκαλεί» την X_t

Έστω ότι θέλουμε να μελετήσουμε αν η X_t προκαλεί την Y_t . Τότε το πρώτο βήμα είναι να εκτελέσω παλινδρόμηση στους y όρους υστέρησης και να υπολογίσω το άθροισμα των τετραγώνων των σφαλμάτων της εκτίμησης (RSS_R), δηλαδή:

$$Y_t = a_1 + \sum_{j=1}^m \gamma_j Y_{t-j} + e_{1t} \quad (44)$$

Στη συνέχεια, εκτελώ την παλινδρόμηση της εξίσωσης (42) και βρίσκω το RSS_U . Ο έλεγχος υπόθεσης γίνεται:

$$H_0: \sum_{i=1}^n \beta_i = 0 \text{ δηλαδή η } X_t \text{ δεν προκαλεί την } Y_t$$

$$H_1: \sum_{i=1}^n \beta_i \neq 0 \text{ δηλαδή η } X_t \text{ προκαλεί την } Y_t$$

Υστερα, υπολογίζω την F-statistic του κανονικού τεστ Wald, που δίνεται από την μεταβλητή F που ακολουθεί την κατανομή $F_{m,n-k}$ όπου $k=m+n+1$

$$F = \frac{(RSS_R - RSS_U)/m}{RSS_U/(n - k)}$$

Τέλος, αν η υπολογισμένη τιμή F είναι μεγαλύτερη από την κριτική τιμή της F, τότε η υπόθεση απορρίπτεται και συνεπώς η μεταβλητή X_t «προκαλεί» την Y_t .

4.5.4 Έλεγχος συν-ολοκλήρωσης (cointegration)

Το πρόβλημα της φαινομενικής παλινδρόμησης των μεταβλητών (spurious regression) προκύπτει αν δυο μεταβλητές Y_t και X_t είναι και οι δυο στάσιμες, τότε κάθε γραμμικός συνδυασμός τους, όπως π.χ. το σφάλμα της παλινδρόμησης, είναι επίσης στάσιμος. Ωστόσο, όταν οι μεταβλητές γίνονται μη στάσιμες τότε δεν εξασφαλίζεται ότι το σφάλμα είναι στάσιμο και άρα παραβιάζονται οι βασικές υποθέσεις της εκτίμησης με χρήση OLS και τα t-test ή οι τιμές R^2 είναι μη αξιόπιστα. Οι Dickey and Fuller [208] κατασκεύασαν μια διαδικασία ώστε να ελεγχθεί η μη στασιμότητα με βασικό χαρακτηριστικό ότι ο έλεγχος για μη στασιμότητα ισοδυναμεί με τον έλεγχο για ύπαρξη μοναδιαίων ριζών. Συνεπώς, ο έλεγχος για το απλό AR(1) μοντέλο της μορφής $Y_t = \varphi Y_{t-1} + u_t$ γίνεται για το αν $\varphi=1$ («μοναδιαία ρίζα»). Συγκεκριμένα,

$$\Delta Y_t = Y_t - Y_{t-1} = \varphi Y_{t-1} - Y_{t-1} + u_t = (\varphi - 1)Y_{t-1} + u_t = \gamma Y_{t-1} + u_t \quad (45)$$

Όπου $\gamma=\varphi-1$. Οι Dickey και Fuller επέκτειναν τον προτεινόμενο έλεγχο (Augmented Dickey-Fuller test for unit roots-ADF) τοποθετώντας επίσης σταθερούς όρους ή μη-στοχαστική χρονική τάση στο μοντέλο. Επιπλέον, καθώς το σφάλμα είναι πιθανό να μην είναι λευκός θόρυβος, το μοντέλο περιέχει και επιπρόσθετους όρους υστέρησης της εξαρτημένης μεταβλητής ώστε να περιοριστεί η αυτοσυσχέτιση. Συνεπώς, οι τρεις πιθανές μορφές που μπορεί να πάρει ο έλεγχος ADF είναι:

$$\Delta Y_t = \gamma Y_{t-1} + \sum_{i=1}^p \beta_i \Delta Y_{t-i} + u_t \quad (46)$$

$$\Delta Y_t = a_0 + \gamma Y_{t-1} + \sum_{i=1}^p \beta_i \Delta Y_{t-i} + u_t \quad (47)$$

$$\Delta Y_t = a_0 + a_2 t + \gamma Y_{t-1} + \sum_{i=1}^p \beta_i \Delta Y_{t-i} + u_t \quad (48)$$

Ο έλεγχος ADF είναι η εκτέλεση του t-test για τον συντελεστή της μεταβλητής Y_{t-1} για καθένα από τα παραπάνω μοντέλα. Ο έλεγχος ADF όμως δεν έχει την συμβατική κατανομή t οπότε πρέπει να χρησιμοποιήσουμε ειδικές οριακές τιμές (που έχουν υπολογιστεί από τους Dickey και Fuller και παρουσιάζονται στον Πίνακα 4-2). Σε όλες τις περιπτώσεις ο έλεγχος αφορά αν $\gamma=0$. Αν η τιμή του κριτηρίου ADF είναι μικρότερη σε απόλυτη τιμή από την οριακή τιμή (για δεδομένα επίπεδα ακριβείας 1%, 5% και 10%) τότε απορρίπτω την υπόθεση ύπαρξης μοναδιαίας ρίζας και συνεπάγεται ότι η Y_t είναι στάσιμη διαδικασία.

Στις εξισώσεις του ΠΡΟΜΗΘΕΑ, είναι συχνό το φαινόμενο η ύπαρξη μοναδιαίας ρίζας να μην μπορεί να απορριφθεί στα επίπεδα των μεταβλητών, σε επίπεδο σημαντικότητας 5% και συνεπώς οι αντίστοιχες χρονικές σειρές δεν είναι στάσιμες. Όταν όμως οι χρονικές σειρές μετασχηματιστούν σε πρώτες διαφορές γίνονται στάσιμες και άρα οι αντίστοιχες μεταβλητές μπορούν να χαρακτηριστούν ως ολοκληρωμένες πρώτης τάξης $I(1)$.

Μοντέλο	1%	5%	10%
$\Delta Y_t = \gamma Y_{t-1} + u_t$	-2.56	-1.94	-1.62
$\Delta Y_t = a_0 + \gamma Y_{t-1} + u_t$	-3.43	-2.86	-2.57
$\Delta Y_t = a_0 + a_2 t + \gamma Y_{t-1} + u_t$	-3.96	-3.41	-3.13
Συνηθισμένες οριακές τιμές	-2.33	-1.65	-1.28

Πίνακας 4-2: Οριακές τιμές για τον έλεγχο Dickey-Fuller

Η επιθυμία για μοντέλα που διατηρούν την ιδιότητα της στασιμότητας, ενώ συνδυάζουν μακροπρόθεσμες και βραχυπρόθεσμες ιδιότητες οδήγησε στην ανάπτυξη της μεθόδου συνολοκλήρωσης (cointegration). Δυο μη στάσιμες μεταβλητές X_t και Y_t είναι συν-ολοκληρωμένες όταν τα κατάλοιπα (σφάλματα) από την παλινδρόμηση της μιας στην άλλη είναι στάσιμα. Αν οι μεταβλητές δεν είναι συνολοκληρωμένες τότε υπάρχει το πρόβλημα του spurious regression και η οικονομετρική εκτίμηση δεν έχει νόημα. Περισσότερο φορμαλιστικά: Αν οι μεταβλητές X_t και Y_t είναι συνολοκληρωμένες της τάξης d, b (όπου $d \geq b \geq 0$) γράφω $Y_t, X_t \sim CI(d, b)$ αν (α) και οι δυο σειρές είναι ολοκληρωμένες τάξεως d και (β) υπάρχει γραμμικός συνδυασμός τους (έστω $\beta_1 Y_t + \beta_2 X_t$) που είναι ολοκληρωμένος της τάξεως $d-b$. Το διάνυσμα $\{\beta_1, \beta_2\}$ ονομάζεται διάνυσμα συνολοκλήρωσης. Αν $d = b$, η μετασχηματισμένη χρονοσειρά γίνεται στάσιμη και οι συντελεστές συνολοκλήρωσης αναγνωρίζονται ως παράμετροι της μακροχρόνιας σχέσης μεταξύ των μεταβλητών. Αν οι μεταβλητές X_t και Y_t είναι μη

στάσιμες τότε τα αποτελέσματα της παλινδρόμησης μπορεί να είναι «φαινομενικά-εσπυριούς». Αν οι X_t και Y_t είναι ολοκληρωμένες 1^{ns} τάξης $I(1)$, τότε αν εκτελέσω την παλινδρόμηση:

$$Y_t = \beta_1 + \beta_2 X_t + u_t \quad (49)$$

Δεν θα πάρω ικανοποιητικές εκτιμήτριες $\hat{\beta}_1$ και $\hat{\beta}_2$. Αν όταν χρησιμοποιώ εξισώσεις διαφορών, οι χρονοσειρές γίνονται στάσιμες, τότε χρησιμοποιώ την εξίσωση

$$\Delta Y_t = \alpha_1 + \alpha_2 \Delta X_t + \Delta u_t \quad (50)$$

Σε αυτήν την περίπτωση, το μοντέλο παλινδρόμησης δίνει σωστές εκτιμήσεις για $\widehat{\alpha}_1$ και $\widehat{\alpha}_2$ και το πρόβλημα της φαινομενικής παλινδρόμησης έχει λυθεί. Ωστόσο, η εκτίμηση δεν μας πληροφορεί για την μακροχρόνια συμπεριφορά του μοντέλου. Αν οι X_t και Y_t είναι συνολοκληρωμένες τότε η εξίσωση (49) δίνει την παρακάτω σχέση η οποία συνδέει τις μεταβλητές X_t και Y_t μακροχρόνια:

$$\hat{u}_t = Y_t - \hat{\beta}_1 - \hat{\beta}_2 X_t \quad (51)$$

με $\hat{u}_t \sim I(0)$ και χρησιμοποιώντας τον προσδιορισμό διόρθωσης σφάλματος-Error Correction Model- προκύπτει η εξίσωση:

$$\Delta Y_t = \alpha_0 + b_1 \Delta X_t - \pi \hat{u}_{t-1} + Y_t \quad (52)$$

που έχει το πλεονέκτημα ότι περιέχει βραχυπρόθεσμες και μακροπρόθεσμες πληροφορίες. Το μοντέλο διόρθωσης σφάλματος ECM είναι ένα δυναμικό σύστημα στο οποίο η απόκλιση από την μακροπρόθεσμη ισορροπία ενσωματώνεται στις δυναμικές βραχυπρόθεσμα και υπολογίζει την ταχύτητα με την οποία η εξαρτημένη μεταβλητή επιστρέφει στην ισορροπία μετά από μια μεταβολή της ανεξάρτητης. Στην εξίσωση (52), b_1 αναπαριστά την βραχυπρόθεσμη επίδραση της μεταβολής της X_t στην Y_t . Από την άλλη, η π είναι το αποτέλεσμα ανάδρασης ή προσαρμογής και δείχνει την ταχύτητα διόρθωσης της μη-ισορροπίας. Η (52) μπορεί να αναπαρασταθεί ως:

$$\hat{u}_{t-1} = Y_{t-1} - \hat{\beta}_1 - \hat{\beta}_2 X_{t-1} \quad (53)$$

Και συνεπώς ο εκτιμητής $\hat{\beta}_2$ είναι η μακροπρόθεσμη απόκριση. Όλοι οι όροι της εξίσωσης (52) είναι στάσιμοι καθώς οι διαφορές ΔY_t και ΔX_t είναι στάσιμοι όροι καθώς οι αντίστοιχες μεταβλητές είναι $I(1)$, ενώ το σφάλμα είναι επίσης στάσιμο εξαιτίας της υπόθεσης συνολοκλήρωσης των μεταβλητών. Συνεπώς, η εξίσωση (52) είναι πλήρως συμμορφωμένη με τις υποθέσεις του κλασσικού μοντέλου CLRM και άρα η εκτίμηση με την μέθοδο OLS δίνει σωστές εκτιμήτριες.

Ο Granger [209] εισήγαγε την αξιοσημείωτη σύνδεση μεταξύ των μη στάσιμων διαδικασιών και της έννοιας της μακροπρόθεσμης ισορροπίας, ενώ οι Engle και Granger [210] πρότειναν ένα απλό έλεγχο για την ύπαρξη συνολοκλήρωσης, που βασίζεται αρχικά στον έλεγχο ολοκλήρωσης της κάθε μεταβλητής με τον επαυξημένο έλεγχο ADF για την ύπαρξη μοναδιαίων ριζών. Στην περίπτωση που οι μεταβλητές X_t και Y_t είναι ολοκληρωμένες της ίδιας τάξεως, στο μοντέλο όλες οι μεταβλητές είναι $I(1)$, το επόμενο βήμα είναι η εκτίμηση της μακροπρόθεσμης σχέσης της μορφής (49) και η μέτρηση του

σφάλματος της εξίσωσης. Αν δεν υπάρχει συνολοκλήρωση, τότε το αποτέλεσμα της παλινδρόμησης είναι φαινομενικό, ενώ αν οι μεταβλητές είναι συνολοκληρωμένες, τότε η OLS εκτίμηση δίνει πολύ συνεπείς εκτιμητές για την παράμετρο β_2 . Ύστερα, εκτελώ έλεγχο DF στην σειρά των σφαλμάτων ώστε να μετρήσω την τάξη ολοκλήρωσής τους.

$$\Delta\hat{u}_t = \alpha_1\hat{u}_{t-1} + \sum_{i=1}^n \delta_i\Delta\hat{u}_{t-1} + v_t \quad (54)$$

Η εξίσωση δεν περιλαμβάνει σταθερό όρο καθώς ο μέσος του σφάλματος είναι μηδέν. Αν προκύψει ότι ο εκτιμητής του σφάλματος είναι ολοκληρωμένος τάξεως 0 - δηλαδή $\hat{u}_t \sim I(0)$ - τότε απορρίπτω την υπόθεση ότι οι μεταβλητές δεν είναι συνολοκληρωμένες. Αν οι μεταβλητές είναι συνολοκληρωμένες τότε τα σφάλματα από την παλινδρόμηση χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση του ECM (εξίσωση 52) και την ανάλυση τόσο των βραχυπρόθεσμων όσο και των μακροπρόθεσμων επιδράσεων. Η παραπάνω μέθοδος μπορεί εύκολα να επεκταθεί και σε περισσότερες μεταβλητές. Ιδιαίτερα σημαντικό είναι ότι οι οριακές τιμές για τον έλεγχο συνολοκλήρωσης (δηλαδή για το ADF τεστ στα κατάλοιπα της εξίσωσης) είναι πιο αρνητικές σε σύγκριση με τον κανονικό έλεγχο ADF, ώστε να έχουμε πιο ασφαλή συμπεράσματα. Οι Engle και Granger [210] εκτέλεσαν Monte Carlo προσομοιώσεις ώστε να κατασκευάσουν τις οριακές τιμές για τον έλεγχο συνολοκλήρωσης (Πίνακας 4-3).

Μοντέλο	1%	5%	10%
Χωρίς χρονικές υστερήσεις (απλός έλεγχος DF)	-4.07	-3.37	-3.3
Με χρονικές υστερήσεις (έλεγχος ADF)	-3.73	-3.17	-2.91

Πίνακας 4-3: Οριακές τιμές για τον έλεγχο υπόθεσης μη συνολοκλήρωσης

Αρχικά, η οικονομετρία χρησιμοποιείται για να καθορίσει αν τα δεδομένα των χρονοσειρών περιέχουν μοναδιαίες ρίζες. Συγκεκριμένα η μεθοδολογία διόρθωσης σφάλματος ECM, η οποία βασίζεται στην υπόθεση ότι δυο ή περισσότερες χρονολογικές σειρές έχουν μια σχέση ισορροπίας που καθορίζει τόσο την βραχυπρόθεσμη όσο και την μακροπρόθεσμη συμπεριφορά, εφαρμόστηκε στις εξισώσεις εξέλιξης των επιβατικών αυτοκινήτων για την εκτίμηση των σχετικών ελαστικοτήτων και για την προέκταση της ζήτησης μέχρι το 2050. Ο ρυθμός με τον οποίο οι επιδράσεις από μια απότομη μεταβολή εξαφανίζεται χαρακτηρίζεται ως «μήμη διαδικασία», που παίρνει διάφορες μορφές όπως η μόνιμη μήμη (η συμπεριφορά αλλάζει για πάντα) ή προσωρινή (στάσιμες διαδικασίες) στις οποίες η συμπεριφορά γρήγορα γυρνάει στα επίπεδα προ της μεταβολής. Στο μοντέλο εφαρμόζεται η διόρθωση σφάλματος δυο σταδίων που συσχετίζει την εξέλιξη των επιβατικών αυτοκινήτων ανά περιοχή ($CAR_{i,t}$) με την εξέλιξη του ΑΕΠ ($GDP_{i,t}$) και την μέση τιμή ενέργειας για μεταφορές ($ptr_{i,t}$). Οι παρακάτω εξισώσεις δείχνουν την βασική δομή του μοντέλου ECM δυο σταδίων:

$$\ln(CAR_{i,t}) = \alpha_0 + \alpha_1 \ln(GDP_{i,t}) + \alpha_2 \ln(ptr_{i,t}) + u_{i,t} \quad (55)$$

$$\Delta \ln(CAR_{i,t}) = \beta_0 + \beta_1 \Delta \log(GDP_{it}) + \beta_2 \Delta \log(pgas_{it}) + \gamma u_{i,t-1} + v_{i,t} \quad (56)$$

Αν τα σφάλματα της εξίσωσης (55) έχουν μικρή μνήμη, τότε οι χρονολογικές σειρές είναι συνολοκληρωμένες και εφαρμόζω την εξίσωση (56), όπου εκτελείται παλινδρόμηση στις μεταβολές της εξαρτημένης μεταβλητής ($CAR_{i,t}$) με τις αλλαγές στις ανεξάρτητες μεταβλητές και το σφάλμα ισορροπίας της προηγούμενης περιόδου και υπολογίζονται οι βραχυπρόθεσμες δυναμικές β_i και η τάξη ισορροπίας γ . Η εξίσωση (55) είναι η συνολοκλήρωση (εξίσωση μακροχρόνιας ισορροπίας) ενώ η εξίσωση (56) είναι η βραχυπρόθεσμη σχέση διόρθωσης του σφάλματος η οποία ποσοτικοποιεί την απόκλιση από την μακροχρόνια ισορροπία και την επακόλουθη έλξη προς μακροχρόνια ισορροπία. Συνεπώς, οι παράγοντες α_i είναι οι μακροχρόνιες ελαστικότητες της εξέλιξης του αριθμού των αυτοκινήτων ως προς κάθε επεξηγηματικό παράγοντα (ΑΕΠ, τιμή ενέργειας), ενώ οι παράμετροι β_i αναπαριστούν τις αντίστοιχες βραχυπρόθεσμες ελαστικότητες, ενώ η παράμετρος γ αναπαριστά το *gravitation* προς την σχέση μακροχρόνιας ισορροπίας. Οι εξισώσεις ECM εισάγονται στον ΠΡΟΜΗΘΕΑ βασισμένες στις εκτιμημένες παραμέτρους α_i και β_i . Στις εξισώσεις χρησιμοποιούνται οι φυσικοί λογάριθμοι των μεταβλητών ώστε οι εκτιμημένες παράμετροι να αναπαριστούν τις αντίστοιχες ελαστικότητες. Αρχικά, οι εκτιμήσεις πραγματοποιήθηκαν με ανεξάρτητη μεταβλητή μόνο το ΑΕΠ και στη συνέχεια εισήλθαν και οι υπόλοιπες μεταβλητές. Οι μεταβλητές που τελικά συμπεριελήφθησαν στην εκτίμηση είναι εκείνες που βελτίωναν την απόδοση των προβλέψεων όσον αφορά την στατιστική σημαντικότητα και την βελτίωση της προσαρμογής (*goodness of fit*) με βάση τον δείκτη *adjusted R²*, ενώ οι υπόλοιπες μεταβλητές αγνοήθηκαν στον προσδιορισμό των εξισώσεων.

4.5.5 Παραγωγή στοχαστικών δεδομένων με βάση οικονομετρικές εκτιμήσεις

Από την οικονομετρική εκτίμηση, παράγεται ο πίνακας διακύμανσης-συνδιακύμανσης των παραμέτρων της εξίσωσης (V) και διαιρείται με την διακύμανση της εξίσωσης ($\hat{\sigma}^2$), η οποία επίσης έχει εκτιμηθεί οικονομετρικά, έτσι ώστε να κανονικοποιηθεί, δηλαδή $V_1 = V/\hat{\sigma}^2$. Υποθέτω ότι η διακύμανση ακολουθεί κατανομή χι-τετράγωνο- X^2 με k βαθμούς ελευθερίας δηλαδή την κατανομή του αθροίσματος των τετραγώνων k ανεξάρτητων τυχαίων μεταβλητών που ακολουθούν τυπική κανονική κατανομή. Έστερα, μια τυχαία τιμή της διακύμανσης (με βάση την X^2) παράγεται για το n -ιστό πείραμα (sv_i), με τον εκτιμημένο μέσο και τους απαιτούμενους (από το δείγμα) βαθμούς ελευθερίας. Αυτή η τιμή πολλαπλασιάζεται με τον πίνακα V_1 , δηλαδή $V_{2,i} = V_1 * sv_i$ (ο πίνακας $V_{2,i}$ ενσωματώνει τις ιδιότητες οικονομετρικής εκτίμησης). Από την στιγμή που ο $V_{2,i}$ είναι συμμετρικός και θετικά ορισμένος, εφαρμόζουμε την ανάλυση Cholesky (Cholesky decomposition) και συνεπώς ο $V_{2,i}$ αποσυντίθεται σε: $V_{2,i} = P_i * P_i^T$, όπου ο P_i είναι ο κάτω τριγωνικός πίνακας (ο οποίος έχει όλα τα χαρακτηριστικά του αρχικού πίνακα $V_{2,i}$). Ο αντίστροφος πίνακας του P_i (P_i^T) χρησιμεύει ως το άνω τριγωνικό τμήμα. Ένα διάνυσμα από μη συσχετισμένες στοχαστικές μεταβλητές που ακολουθούν την τυπική κανονική κατανομή, δηλαδή $z_i \sim N(0,1)$, παράγεται στη συνέχεια και πολλαπλασιάζεται με τον πίνακα P_i . Τελικά, προσθέτουμε το διάνυσμα των μέσων τιμών των παραμέτρων της εξίσωσης (b_i),

δηλαδή $\mathbf{f}_i = \mathbf{P}_i * \mathbf{z}_i + \mathbf{b}_i$. Το διάνυσμα των παραμέτρων που παράγεται τελικά (\mathbf{f}_i) είναι συνεπές με τα αποτελέσματα της οικονομετρικής εκτίμησης, καθώς ο μέσος του είναι προφανώς το \mathbf{b}_i ($E[\mathbf{f}_i] = \mathbf{b}_i$) και ο πίνακας συνδιακύμανσης είναι ο \mathbf{V}_2 , καθώς

$$\begin{aligned} E[(\mathbf{f} - E(\mathbf{f}))(\mathbf{f} - E(\mathbf{f}))^T] &= E[(\mathbf{Pz})(\mathbf{Pz})^T] = E[\mathbf{Pzz}^T\mathbf{P}^T] = \mathbf{PE}[\mathbf{zz}^T]\mathbf{P}^T = \mathbf{PIP}^T \\ &= \mathbf{PP}^T = \mathbf{V}_2 \quad (57) \end{aligned}$$

Στην παραπάνω ανάλυση χρησιμοποιούνται ιδιότητες της άλγεβρας πινάκων και το γεγονός ότι $E[\mathbf{zz}^T] = \mathbf{I}$ ώστε να αποδειχτεί ότι το διάνυσμα \mathbf{f} έχει τα χαρακτηριστικά διακύμανσης και συνδιακύμανσης της αρχικής οικονομετρικά εκτιμημένης εξίσωσης. Οι όροι σφάλματος, που αντιπροσωπεύουν το σύνολο των μεταβλητών που δεν έχουν ρητά συμπεριληφθεί στην οικονομετρική εκτίμηση, δημιουργούνται για όλες τις χρονικές περιόδους σαν κανονικά κατανομημένες τυχαίες μεταβλητές με μηδενική μέση τιμή, την πειραματική διακύμανση sv_i και με μηδενική συνδιακύμανση. Η ίδια διαδικασία παραγωγής “*generation process*” επαναλαμβάνεται για όλες τις οικονομετρικά εκτιμημένες εξισώσεις και για όλα τα πειράματα Monte Carlo (που σε αυτήν την εκδοχή του PROMHΘEA είναι 2048).

Σε αυτό το σημείο πρέπει να τονίσουμε πως το πρόγραμμα E-VIEWS έχει ειδικές συναρτησιακές μορφές για την παραγωγή «ψευδο-τυχαίων» αριθμών τόσο από την κανονική κατανομή με μηδενικό μέσο και μοναδιαία διακύμανση όσο και από την ομοιόμορφη κατανομή στο διάστημα $[0, 1]$, οι οποίες είναι ιδιαίτερα σημαντικές στο πλαίσιο της ανάλυσης Monte Carlo. Κατά την παραγωγή των κατανομών πιθανότητας για τις παραμέτρους του PROMHΘEA, ο χρήστης του μοντέλου πρέπει να ορίσει τον σπόρο- *seed*- (δηλαδή έναν θετικό ακέραιο αριθμό) για την διαδικασία παραγωγής τυχαίων αριθμών. Το πρόγραμμα E-VIEWS εμπεριέχει εναλλακτικούς τύπους γεννητριών ψευδο-τυχαίων αριθμών. Αν ο χρήστης δεν προσδιορίσει την γεννήτρια που επιθυμεί, το E-VIEWS χρησιμοποιεί τον βελτιωμένο αλγόριθμο «*lagged Fibonacci generator*» του Knuth [17]. Εναλλακτικά, η γεννήτρια *Mersenne Twister* [166] ή η συνδυαστική πολλαπλή αναδρομική γεννήτρια («*combined multiple recursive generator*») που αναπτύχθηκε από τον L'Ecuyer [18] μπορούν να χρησιμοποιηθούν. Ο παρακάτω πίνακας παρουσιάζει μια συγκριτική ανάλυση των τριών μεθόδων για την παραγωγή ψευδο-τυχαίων αριθμών που εμπεριέχονται στο υπολογιστικό πρόγραμμα E-VIEWS [167]. Στην κατασκευή του στοχαστικού μοντέλου PROMHΘEAS, η μέθοδος *Mersenne Twister* χρησιμοποιήθηκε κυρίως εξαιτίας των επιθυμητών ιδιοτήτων της, όπως η ιδιαίτερα μεγάλη περίοδος ($2^{19937}-1$), αφού περίοδοι μικρότερες από 2^{32} μπορεί να είναι προβληματικές για την συγκεκριμένη εφαρμογή, και ο μικρότερος χρόνος που απαιτείται σε σύγκριση με τις άλλες μεθόδους για παραγωγή ίσου αριθμού τυχαίων πειραμάτων. Τέλος, παρατηρούμε ότι και οι τρεις μέθοδοι για την παραγωγή ψευδο-τυχαίων αριθμών δεν περιέχουν κανένα πείραμα που αποτυγχάνει στους ελέγχους Diehard, οι οποίοι είναι στατιστικοί έλεγχοι που μετρούν την ποιότητα μιας γεννήτριας τυχαίων αριθμών και αναπτύχθηκαν από Marsaglia [22].

	Knuth	L' Ecuyer	Mersenne Twister
Περίοδος	2^{129}	2^{319}	$2^{19937-1}$
Χρόνος σε sec (για 10^7 παραγωγές τυχαίων αριθμών)	27.3	15.7	1.76
Πειράματα που αποτυγχάνουν στους ελέγχους Diehard	0	0	0

Πίνακας 4-4: Χαρακτηριστικά των εναλλακτικών μεθόδων παραγωγής τυχαίων αριθμών

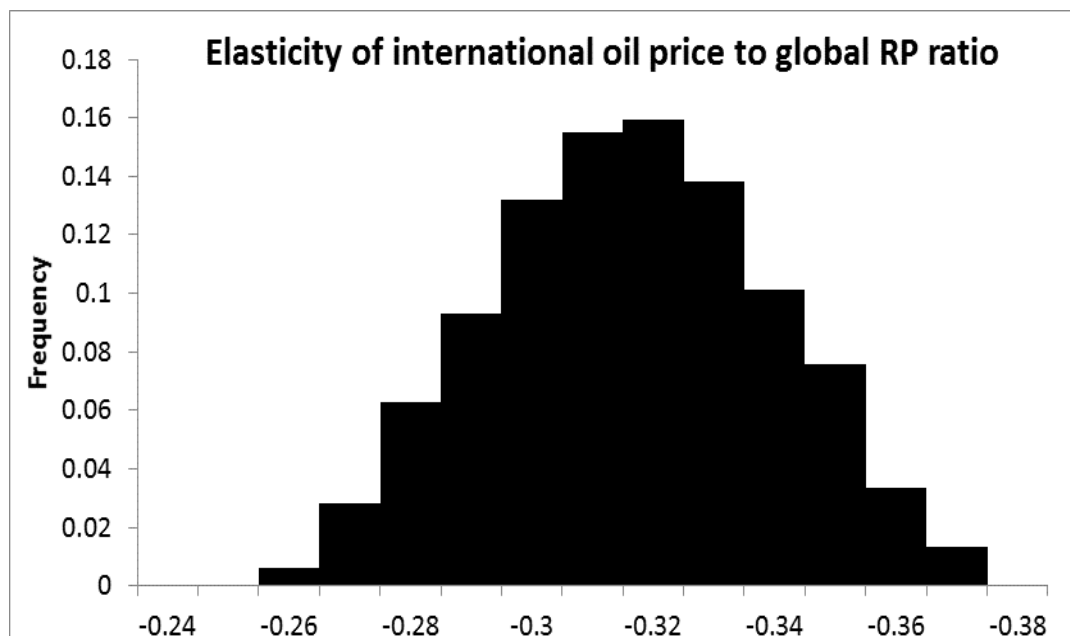
Ένα σοβαρό πρόβλημα που προέκυψε κατά την διαδικασία παραγωγής τυχαίων μεταβλητών που περιγράφεται παραπάνω είναι η δυνατότητα τιμών που παραβιάζουν την οικονομική θεωρία (π.χ. θετική ελαστικότητα τιμής σε μια εξίσωση ζήτησης). Πιο συγκεκριμένα, η μέθοδος εκτίμησης ελαχίστων τετραγώνων και η στατιστική της ερμηνεία, η οποία χρησιμοποιείται ευρέως στην οικονομετρική εκτίμηση των εξισώσεων του ΠΡΟΜΗΘΕΑ, βασίζεται στην υπόθεση της κανονικότητας των όρων σφάλματος. Ως αποτέλεσμα, οι εκτιμήτριες των παραμέτρων ακολουθούν *Student-t* κατανομές, οι οποίες θεωρητικά συνεπάγονται τη δυνατότητα ότι μια παράμετρος μπορεί να αλλάξει πρόσημο. Ενώ αυτό μπορεί να μην είναι προβληματικό, στις περισσότερες περιπτώσεις η οικονομική θεωρία και η κοινή λογική καθορίζουν ένα συγκεκριμένο πρόσημο για τις παραμέτρους (πχ θετική ελαστικότητα εισοδήματος, αρνητική ελαστικότητα τιμής στις εξισώσεις ζήτησης). Το πρόβλημα επιδεινώνεται από το γεγονός ότι ορισμένες από τις εξισώσεις του μοντέλου χαρακτηρίζονται από υψηλές διακυμάνσεις, οι οποίες συχνά προκύπτουν από σχετικά μικρά δείγματα των χρονοσειρών. Οι υψηλές διακυμάνσεις συνεπάγονται μη αμελητέες πιθανότητες για «παράνομες» τιμές για τις παραμέτρους. Είναι σαφές ότι τέτοιες τιμές δεν μπορούν γενικά να γίνουν ανεκτές και στον ΠΡΟΜΗΘΕΑ μπορούν να αποδειχθούν ιδιαίτερα ανεπιθύμητες, κυρίως αν κατά τη διάρκεια των πειραμάτων Monte-Carlo συνδυαστούν με ακραίες τιμές άλλων μεταβλητών και παραμέτρων και στρεβλώσουν εντελώς το πείραμα. Υπάρχουν δύο πιθανές λύσεις για το πρόβλημα:

- Υποθέτουμε μια διαφορετική κατανομή (λογαριθμοκανονική ή κάποια γενικευμένη μορφή) για τους εκτιμητές των παραμέτρων, ενώ προσπαθούμε να διατηρήσουμε τις βασικές ιδιότητες της οικονομετρικής εκτίμησης (μέση τιμή, διακύμανση, συνδιακύμανση με τους εκτιμητές των άλλων παραμέτρων). Το κύριο μειονέκτημα της μεθόδου είναι οι πολύπλοκοι προσδιορισμοί που απαιτούνται προκειμένου να διατηρηθούν οι επιθυμητές ιδιότητες των εκτιμώμενων παραμέτρων, ενώ την ίδια στιγμή δεν μπορούν να αποφευχθούν οι αυθαίρετες υποκειμενικές παρεμβάσεις.
- Αγνοούμε τις παράνομες τιμές των παραμέτρων. Το μειονέκτημα της μεθόδου είναι ότι παράγει διαφορετικές στιγμές από εκείνες που υπονοούνται από την αρχική οικονομετρική εκτίμηση. Από την άλλη πλευρά, αυτή η λύση σέβεται καλύτερα την αρχική «μορφή» των κατανομών των παραμέτρων, ενώ η υλοποίησή της είναι ιδιαίτερα απλή και εύκολη.

Η δεύτερη λύση χρησιμοποιήθηκε στην περίπτωση του ΠΡΟΜΗΘΕΑ (δηλαδή δεν λαμβάνουμε υπόψη τις παράνομες τιμές των παραμέτρων). Η απόρριψη μιας

παράνομης τιμής για την εκτιμώμενη παράμετρο (π.χ. αρνητική ελαστικότητα εισοδήματος σε μια εξίσωση ζήτησης ενέργειας) συνοδεύεται από την απόρριψη των τιμών (πιθανώς νόμιμων) για τις υπόλοιπες παραμέτρους της εξίσωσης, προκειμένου να διατηρηθούν οι επιθυμητές ιδιότητες της οικονομετρικής εκτίμησης σε κάθε πείραμα Monte Carlo (π.χ. η συνδιακύμανση μεταξύ των εκτιμητών των παραμέτρων). Αυτό είναι ισοδύναμο με την υιοθέτηση δεσμευμένης κατανομής πιθανότητας (δηλαδή η κατανομή των εκτιμητών των παραμέτρων δεδομένου ότι έχουν το απαιτούμενο πρόσημο). Αυτή η μέθοδος τείνει να μεταβάλλει την απόλυτη τιμή του μέσου και να μειώσει την διακύμανση της εκτίμησης, αλλά γενικά διατηρεί το σχήμα της αρχικής t κατανομής για τις επιτρεπόμενες τιμές. Ο αριθμός των πειραμάτων Monte Carlo που απορρίπτονται εξαρτάται από την διακύμανση της οικονομετρικά εκτιμημένης εξίσωσης, αλλά σε γενικές γραμμές το ποσοστό πειραμάτων που απορρίπτονται δεν ξεπερνάει το 3-5% των συνολικών πειραμάτων.

Σαν παράδειγμα της στοχαστικής κατανομής των παραμέτρων εισόδου που προκύπτει από την παραπάνω διαδικασία, το παρακάτω σχήμα δείχνει την κατανομή πιθανότητας του εκτιμητή της παραμέτρου γ της εξίσωσης 10 του κεφαλαίου 3, η οποία αντιπροσωπεύει την ελαστικότητα της διεθνούς τιμής του πετρελαίου σε σχέση με τις αλλαγές στον λόγο των παγκόσμιων αποθεμάτων προς την παραγωγή πετρελαίου (RP ratio) και θεωρείται ως ιδιαίτερα σημαντική παράμετρος εισόδου στο μοντέλο. Η μέση τιμή του εκτιμητή της παραμέτρου (και ο διάμεσος) βρέθηκε να είναι -0.312 , με τυπική απόκλιση 0.023 , ενώ η ασυμμετρία είναι -0.0234 και η κύρτωση 2.43 . Τα άνω και κάτω 5% εκατοστημόρια της κατανομής πιθανοτήτων είναι -0.275 και -0.355 αντίστοιχα.



Γράφημα 4-4: Κατανομή της ελαστικότητας της διεθνούς τιμής του πετρελαίου ως προς τον λόγο RP (παγκόσμια αποθέματα προς παραγωγή) που χρησιμοποιείται σαν είσοδος στο μοντέλο

4.6 Παράδειγμα κατασκευής της κατανομής των παραμέτρων

Ο σκοπός της ενότητας είναι να δώσει ένα αναλυτικό παράδειγμα κατασκευής των κατανομών πιθανοτήτων των παραμέτρων εισόδου στο μοντέλο που προκύπτουν από την οικονομετρική εκτίμηση των εξισώσεων.

4.6.1 Παράδειγμα οικονομετρικής εκτίμησης

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζεται η οικονομετρική εκτίμηση για την εξίσωση ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας για βιομηχανικές χρήσεις στην Β. Αμερική. Η εξίσωση είναι της γενικής μορφής εξισώσεων που παρουσιάστηκε στο κεφάλαιο 3:

$$\ln(D_{i,t}/D_{i,t-1}) = \alpha + \beta \ln(A_{i,t}/A_{i,t-1}) + \sum_{l=0}^p \gamma_l \left(\ln \left(\frac{AVCOST_{i,t-l}}{AVCOST_{i,t-l-1}} \right) \right) + u_{i,t} \quad (58)$$

Από την οικονομετρική εκτίμηση προκύπτει ότι η αυτόνομη τάση για μείωση της ενεργειακής ζήτησης ανά μονάδα προστιθέμενης αξίας της βιομηχανίας (ενεργειακή αποδοτικότητα) έχει μέσο 2% ανά χρόνο, ενώ η ελαστικότητα της ζήτησης ως προς δραστηριότητα έχει μέσο 0.763 και η ελαστικότητα ως προς την τιμή είναι -0.046. Οι εκτιμήσεις στον ΠΡΟΜΗΘΕΑ συχνά περιέχουν μια ψευδο-μεταβλητή (dummy variable) έτσι ώστε να εξαλείφονται οι επιπτώσεις στην οικονομετρική εκτίμηση από μια μη-ενδεικτική χρονιά με απότομες μεταβολές στις μεταβλητές της εξίσωσης, οι οποίες αλλοιώνουν τις στατιστικές ιδιότητες της εκτίμησης.

Εξίσωση βιομηχανικής ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας στην Β. Αμερική (δείγμα 1985-2007)			
	Coefficient	t-Statistic	Probability
C	-0.020507	-3.124	0.006
Elasticity to industrial production	0.763494	4.264	0.000
PDL(price of electricity(-1))	-0.045636	-2.032	0.056
R-squared		0.933	
Adjust. R-squared		0.911	
S.E. of regression		0.021	
Lag Distribution of (electricity price(-1))		Coefficient	t-Statistic
	0	-0.03912	0.01925
	1	-0.06519	0.03208
	2	-0.07823	0.0385
	3	-0.07823	0.0385
	4	-0.06519	0.03208
	5	-0.03912	0.01925
	Sum of Lags	-0.36508	0.17967

Πίνακας 4-5: Εκτίμηση εξίσωσης βιομηχανικής ζήτησης ηλεκτρισμού στην Β. Αμερική

Γενικά, η ποιότητα της οικονομετρικής εκτίμησης ελέγχεται από την τιμή του συντελεστή προσδιοριστίας (*Coefficient of determination*) R-Square (R^2), ο οποίος ερμηνεύεται ως το ποσοστό της μεταβλητότητας των τιμών της εξαρτημένης μεταβλητής που προσδιορίζεται από τις τιμές της ανεξάρτητης μεταβλητής με βάση τα αθροίσματα των τετραγωνικών αποκλίσεων. Μια τιμή που είναι κοντά στη μονάδα ή γενικά μεγαλύτερη από 0.8 σημαίνει ότι η εκτίμηση των παραμέτρων και άρα η πρόβλεψη με βάση την εξίσωση είναι αρκετά αξιόπιστη, κάτι το οποίο συμβαίνει στο παράδειγμά μας όπου το R^2 ισούται με 0.933.

Για να ελέγξουμε την σημαντικότητα των εκτιμητών των παραμέτρων που προέκυψαν από την μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων, πρέπει να διεξάγουμε έλεγχο συμπεριφοράς των εκτιμητών με βάση το τεστ *t-Statistic*. Όπως παρατηρούμε από τον πίνακα 2, τα *t-Statistics* όλων των εκτιμητών των παραμέτρων της εξίσωσης είναι αρκετά μεγαλύτερα από το κατώφλι-όριο της τιμής 2 που χρησιμοποιείται συνήθως για σχετικά μεγάλα δείγματα (σε απόλυτη τιμή). Με βάση τα Wald test, για την εξακρίβωση του αν κάποιες από τις επεξηγηματικές μεταβλητές είναι περιττές στον προσδιορισμό της εξίσωσης (redundant variables) υπολογίζεται το *likelihood ratio* στο E-VIEWS, και καμία από τις επεξηγηματικές μεταβλητές δεν βρέθηκε ότι είναι περιττή, καθώς το F-statistic στις αντίστοιχες περιπτώσεις υπολογίστηκε ότι είναι πολύ μεγαλύτερο από το κατώφλι του 3.84.

Όταν το δείγμα των επεξηγηματικών μεταβλητών έχει τέλεια (ή συνήθως και ατελή) πολυσυγγραμικότητα, τότε η μέθοδος των ελαχίστων τετραγώνων δεν μπορεί να παρέχει στατιστικά σωστές εκτιμήσεις για τις παραμέτρους. Ένα χαρακτηριστικό της πολυσυγγραμικότητας είναι η ιδιαίτερα υψηλή τιμή για τον δείκτη συσχέτισης των εκτιμημένων παραμέτρων (π.χ. μεγαλύτερος από 0.95). Ο παρακάτω πίνακας παρουσιάζει τις συσχετίσεις μεταξύ των εκτιμητών των παραμέτρων, οι οποίες προκύπτουν από τον πίνακα διακύμανσης-συνδιακύμανσης της οικονομετρικά εκτιμημένης εξίσωσης. Όπως παρατηρούμε, οι εκτιμήτριες των παραμέτρων δεν είναι ανεξάρτητες (όπως είναι αναμενόμενο), αλλά η συσχέτιση τους δεν έχει τιμή κοντά στην μονάδα. Η πλέον αποτελεσματική μέθοδος για να ελέγξουμε αν το δείγμα εμφανίζει πολυσυγγραμικότητα είναι να διεξάγουμε την εκτίμηση παραλείποντας κάποια από τις επεξηγηματικές μεταβλητές και να εξακριβώσουμε αν αυτό αλλάζει τις ιδιότητες των εκτιμητών των παραμέτρων.

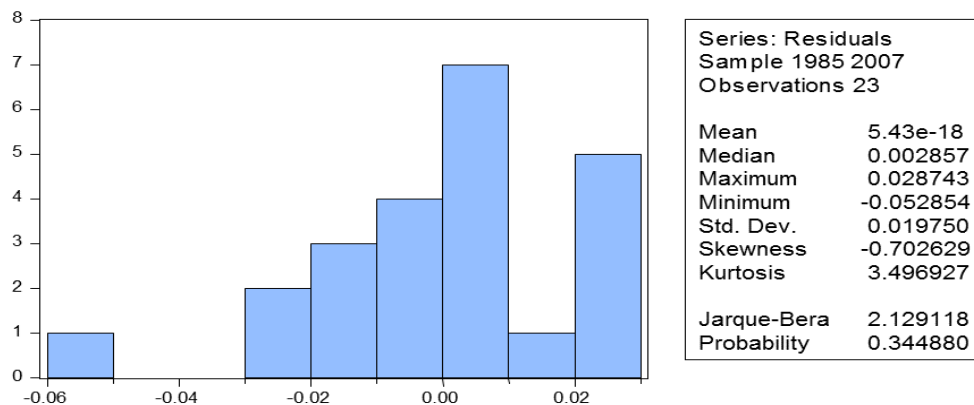
	Σταθερή τάση	Ελαστικότητα προστιθέμενης αξίας	Ελαστικότητα τιμής
Σταθερή τάση	1.000		
Ελαστικότητα προστιθέμενης αξίας	-0.478	1.000	
Ελαστικότητα τιμής	0.395	0.268	1.00

Πίνακας 4-6: Συσχετίσεις μεταξύ των εκτιμητριών των παραμέτρων της εξίσωσης

Το Γράφημα 4-5 παρουσιάζει το ιστόγραμμα των υπολειμμάτων (residuals) της παραπάνω εξίσωσης για την περίοδο 1985 με 2007. Όπως παρατηρούμε, ο μέσος των

residuals είναι πολύ κοντά στο μηδέν (5.4×10^{-18}) και έχει αρκετά μεγάλη πιθανότητα να είναι ακριβώς μηδέν (34.5%), ενώ η κατανομή των σφαλμάτων έχει αρνητική ασυμμετρία (-0.7) και κύρτωση 3.5. Άρα, μια από τις βασικές ιδιότητες της εκτίμησης με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων (ότι δηλαδή η αναμενόμενη τιμή του όρου σφάλματος είναι μηδέν) ικανοποιείται.

Μια άλλη σημαντική ιδιότητα της οικονομετρικής εκτίμησης είναι ότι η διακύμανση των σφαλμάτων πρέπει να είναι σταθερή, δηλαδή η ομοσκεδαστικότητα των υπολειμματικών όρων. Η παρουσία ετεροσκεδαστικότητας (μη σταθερής διακύμανσης του σφάλματος) στο δείγμα επηρεάζει τις εκτιμήτριες των παραμέτρων της εξίσωσης αυξάνοντας τις διακυμάνσεις τους και συνεπώς οι εκτιμήτριες με την μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων είναι αναποτελεσματικοί (*inefficient*). Μια συνηθισμένη μεθοδολογία για να διαπιστώσουμε την ετεροσκεδαστικότητα στα υπολείμματα της εξίσωσης είναι ο έλεγχος White [168], ο οποίος πραγματοποιείται στο προγραμματιστικό περιβάλλον E-VIEWS. Ο παρακάτω πίνακας δίνει τα αποτελέσματα του ελέγχου White για την συγκεκριμένη εξίσωση (χωρίς τους όρους των γινομένων μεταξύ των επεξηγηματικών μεταβλητών). Σύμφωνα με τον έλεγχο White, η στατιστική LM-πολλαπλασιαστής Lagrange της εξίσωσης (δηλαδή το γινόμενο των παρατηρήσεων επί τον συντελεστή προσδιοριστίας) είναι 4.55, δηλαδή κατά πολύ μικρότερη από την τιμή της κατανομής χ^2 με $\alpha=0.05$ και 2 βαθμούς ελευθερίας (5.991). Επίσης, η τιμή p (πιθανότητα της κατανομής χ^2) που συνδέεται με την στατιστική LM εκτιμάται σε 20.81%, η οποία είναι πολύ υψηλότερη από το επίπεδο σημαντικότητας που συνήθως χρησιμοποιείται (5%). Συμπερασματικά, με βάση τον έλεγχο White, τα σφάλματα της εκτιμώμενης εξίσωσης είναι ομοσκεδαστικά.



Γράφημα 4-5: Όροι σφάλματος της οικονομετρικά εκτιμημένης εξίσωσης

Έλεγχος ετεροσκεδαστικότητας: White				
F-statistic	1.560566	Prob. F(6,16)	0.2317	
Obs*R-squared	4.546932	Prob. Chi-Square(6)	0.2081	
Test Equation:				
Dependent Variable: RESID^2				
Method: Least Squares				
Sample: 1985 2007				
Included observations: 23				
Variable	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.
C	0.000722	0.000219	3.292379	0.0038
squared industry value added	-0.15528	0.094279	-1.64704	0.116
squared electricity price	-0.00201	0.002	-0.854	0.4038
Properties				
R-squared	0.797693	Mean dependent var	0.000373	
Adjusted R-squared	0.071013	S.D. dependent var	0.000603	
S.E. of regression	0.000581	Akaike info criterion	-11.9068	
Sum squared resid	6.41E-06	Schwarz criterion	-11.7093	
Log likelihood	140.9279	Hannan-Quinn	-11.8571	
F-statistic	1.560566	Durbin-Watson stat	2.067991	
Prob (F-statistic)	0.23173			

Πίνακας 4-7: Αποτελέσματα του ελέγχου ετεροσκεδαστικότητας των σφαλμάτων White

Όπως εξηγήθηκε στην ενότητα 5.4, η παρουσία αυτοσυσχετιζόμενων όρων σφάλματος είναι σχετικά συνηθισμένη σε δεδομένα χρονολογικών σειρών που χρησιμοποιούνται εκτενώς στον ΠΡΟΜΗΘΕΑ. Η ύπαρξη αυτοσυσχέτισης σημαίνει ότι η συνδιακύμανση των υπολειμμάτων των εξισώσεων δεν είναι μηδενική, όπως επιβάλλεται για να είναι BLUE¹⁷ οι εκτιμήτριες των παραμέτρων που προκύπτουν από την μέθοδο ελαχίστων τετραγώνων. Η βασική μέθοδος που χρησιμοποιείται για να ελέγξουμε την αυτοσυσχέτιση πρώτης τάξης που συνήθως υπάρχει σε δεδομένα χρονολογικών σειρών είναι το κριτήριο Durbin-Watson [169], που μπορεί να πάρει τιμές από 0 έως 4 ανάλογα με την συνδιακύμανση των σφαλμάτων- ισχύει ότι $DW=2(1-\rho)$ όπου ρ ο συντελεστής αυτοσυσχέτισης. Από την στατιστική ανάλυση προκύπτει ότι όταν ο έλεγχος Durbin-Watson πάρει τιμή κοντά στο 2 (δηλαδή ρ κοντά στην τιμή 0) τότε δεν υπάρχει αυτοσυσχέτιση (εμπειρικός κανόνας). Στις εξισώσεις που αυτό συμβαίνει (όπως στην συγκεκριμένη που η τιμή είναι 1.82), τότε η συνδιακύμανση των όρων του σφάλματος είναι μηδέν, δηλαδή τα σφάλματα είναι ασυσχέτιστα.

¹⁷ BLUE σημαίνει ότι οι εκτιμητές των ελαχίστων τετραγώνων είναι οι Καλύτεροι (Best), Γραμμικοί (Linear), Αμερόληπτοι (Unbiased) και Αποδοτικοί (Efficient) Εκτιμητές (Estimators).

Αντίθετα, στην περίπτωση που υπάρχει αυτοσυσχέτιση στα δεδομένα της εκτίμησης, χρησιμοποιούμε όρους αυτοπαλινδρόμησης [17] πρώτης τάξης (AR1 terms), στον προσδιορισμό του σφάλματος. Το πρόγραμμα E-VIEWS χρησιμοποιεί έναν επαναληπτικό μη-γραμμικό αλγόριθμο για να εκτιμήσει τους όρους AR(1) βασισμένο στην διαδικασία Cochrane-Orcutt [165]. Ο συντελεστής AR1 μπορεί να πάρει τιμές στο διάστημα [-1,1]. Όταν η τιμή του συντελεστή εκτιμηθεί ότι είναι κοντά στην μονάδα, αυτό συνεπάγεται υψηλή σειριακή συσχέτιση μεταξύ των όρων σφάλματος. Το σύνολο των στατιστικών ελέγχων που περιεγράφηκαν στην ενότητα 5.5 πραγματοποιήθηκαν για κάθε εξίσωση που περιλαμβάνεται στο μοντέλο.

4.6.2 Αναλυτικό παράδειγμα κατασκευής κατανομών παραμέτρων

Ο συμμετρικός πίνακας διακύμανσης-συνδιακύμανσης V των παραμέτρων της εκτιμημένης εξίσωσης (η οποία περιγράφει την εξέλιξη της βιομηχανικής ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας στην Β. Αμερική) παρουσιάζεται παρακάτω. Παρατηρούμε ότι η συνδιακύμανση της σταθερής τάσης και της ελαστικότητας της ζήτησης ως προς την οικονομική δραστηριότητα είναι αρνητική, ενώ οι συνδιακυμάνσεις της ελαστικότητας της τιμής με τις υπόλοιπες παραμέτρους είναι θετική.

	Σταθερή τάση	Ελαστικότητα προστιθέμενης αξίας	Ελαστικότητα τιμής
Σταθερή τάση	4.31E-05		
Ελαστικότητα προστιθέμενης αξίας	-5.62E-04	3.21E-02	
Ελαστικότητα τιμής	5.82E-05	1.08E-03	5.04E-04

Πίνακας 4-8: Πίνακας διακύμανσης-συνδιακύμανσης V της εκτιμημένης εξίσωσης

Σύμφωνα με την μεθοδολογία που περιγράφεται αναλυτικά στην ενότητα 5.4, ο πίνακας V διαιρείται με το τετράγωνο του τυπικού σφάλματος της παλινδρόμησης, το οποίο στην περίπτωση μας είναι 0.021, και έτσι προκύπτει ο πίνακας $V_1 = V/\hat{\sigma}^2$, ο οποίος παρουσιάζεται παρακάτω.

	Σταθερή τάση	Ελαστικότητα προστιθέμενης αξίας	Ελαστικότητα τιμής
Σταθερή τάση	0.0954		
Ελαστικότητα προστιθέμενης αξίας	-1.2452	70.9832	
Ελαστικότητα τιμής	0.1289	2.3862	1.1168

Πίνακας 4-9: Πίνακας V_1 που προκύπτει από κανονικοποίηση του πίνακα V

Στη συνέχεια, μια τυχαία τιμή της διακύμανσης (η οποία ακολουθεί την κατανομή X^2) παράγεται για το n -ιοστό πείραμα (sv_i), με τον εκτιμημένο μέσο και τους απαιτούμενους βαθμούς ελευθερίας. Αυτή η τιμή πολλαπλασιάζεται με τον πίνακα V_1 και δημιουργείται ο πίνακας $V_{2,i} = V_1 * sv_i$, ο οποίος παρουσιάζεται παρακάτω (όταν η διακύμανση για το συγκεκριμένο πείραμα είναι $sv_i = 0.000706$, δηλαδή το τυπικό σφάλμα είναι 0.026). Από την στιγμή που ο πίνακας $V_{2,i}$ είναι συμμετρικός και θετικά

ορισμένος, εφαρμόζουμε την ανάλυση Cholesky (Cholesky decomposition) και συνεπώς ο πίνακας $V_{2,i}$ αποσυντίθεται σε: $V_{2,i} = P_i * P_i^T$, όπου ο P_i είναι ο κάτω τριγωνικός πίνακας, ο οποίος παρουσιάζεται παρακάτω (Πίνακας 4-11).

	Σταθερή τάση	Ελαστικότητα προστιθέμενης αξίας	Ελαστικότητα τιμής
Σταθερή τάση	6.740E-05		
Ελαστικότητα προστιθέμενης αξίας	-8.795E-04	5.013E-02	
Ελαστικότητα τιμής	9.103E-05	1.685E-03	7.887E-04

Πίνακας 4-10: Πίνακας $V_{2,i}$ για την κατασκευή κατάλληλων κατανομών παραμέτρων

	Σταθερή τάση	Ελαστικότητα προστιθέμενης αξίας	Ελαστικότητα τιμής
Σταθερή τάση	0.008	0.000	0
Ελαστικότητα προστιθέμενης αξίας	-0.107	0.197	0
Ελαστικότητα τιμής	0.011088223	0.014612797	0.021266

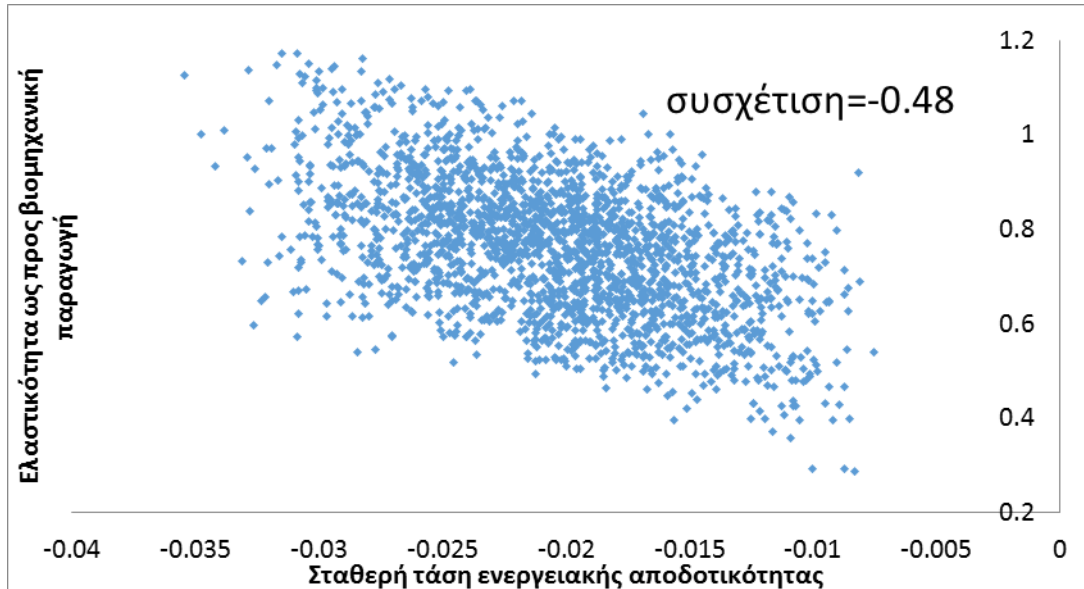
Πίνακας 4-11: Πίνακας P_i (μετά από Cholesky decomposition)

Ένα διάνυσμα ασυσχέτιστων μεταβλητών που ακολουθούν την τυπική κανονική κατανομή, δηλαδή $\mathbf{z}_i \sim N(0,1)$ παράγεται και πολλαπλασιάζεται με τον πίνακα P_i . Τελικά, το διάνυσμα των μέσων τιμών των παραμέτρων της εξίσωσης (\mathbf{b}_i) προστίθεται ώστε να υπολογιστούν οι τιμές των παραμέτρων για το συγκεκριμένο πείραμα Monte Carlo, δηλαδή $\mathbf{f}_i = P_i * \mathbf{z}_i + \mathbf{b}_i$.

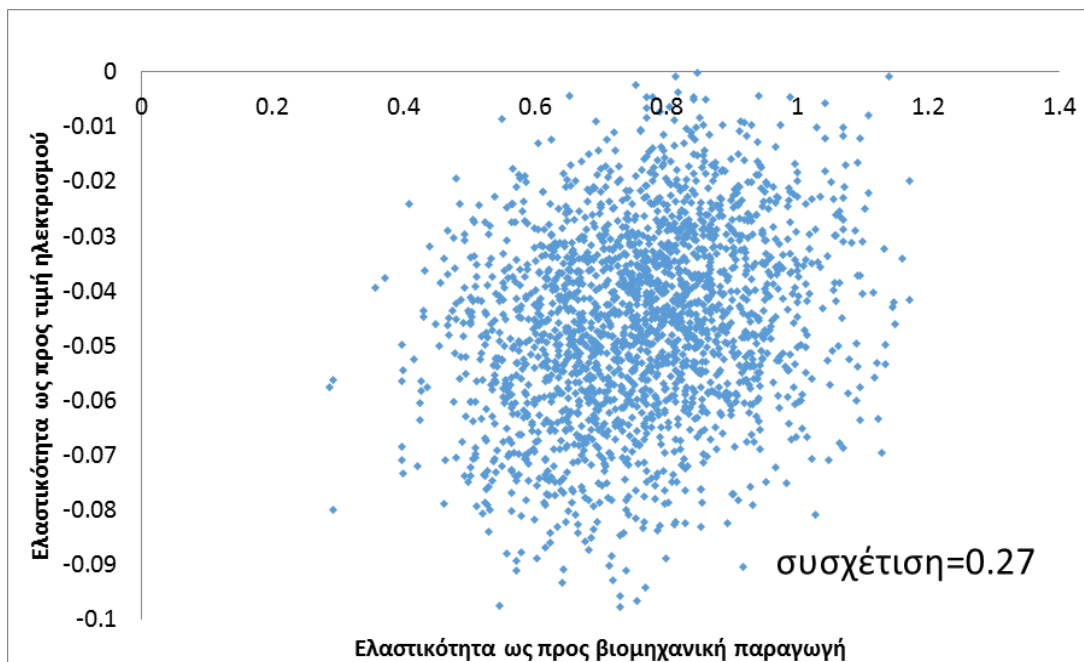
Ο PROMHΘΕΑΣ υποθέτει ότι οι εκτιμήτριες των παραμέτρων δεν είναι ανεξάρτητες και η συνδιακύμανση τους είναι οικονομετρικά εκτιμημένη, π.χ. στην εξίσωση που καθορίζει την ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας από την βιομηχανία στη Βόρεια Αμερική, υπάρχει αρνητική συσχέτιση (-0.48) μεταξύ του εκτιμητή για την ελαστικότητα της ζήτησης ως προς τη προστιθέμενη αξία της βιομηχανίας και του εκτιμητή σταθερής τάσης (που αντικατοπτρίζει την αυτόνομη βελτίωση στην ενεργειακή αποδοτικότητα). Αυτή η αρνητική συσχέτιση προκύπτει από το στατιστικό δείγμα; αν η ελαστικότητα της δραστηριότητας είναι υψηλή, προκειμένου να εξηγηθεί η κίνηση της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας, θα απαιτηθεί ισχυρότερη αυτόνομη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης (σταθερή τάση). Στο πλαίσιο της αύξησης της βιομηχανικής παραγωγής, η αρνητική συσχέτιση τείνει να μειώσει τη συνολική διακύμανση της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας. Το Γράφημα 4-6 παρουσιάζει τις τιμές των παραπάνω εκτιμητών στα 2048 πειράματα Monte Carlo του PROMHΘΕΑ και δείχνει την έντονα αρνητική συσχέτιση μεταξύ τους.

Στο Γράφημα 4-7 παρουσιάζονται οι τιμές των ελαστικότητων δραστηριότητας και τιμής για τα 2048 στοχαστικά πειράματα του μοντέλου. Οι δυο ελαστικότητες έχουν θετικό συντελεστή συσχέτισης, ο οποίος όμως δεν έχει ιδιαίτερα υψηλή τιμή (0.27). Επιπλέον, παρατηρούμε ότι για κανένα από τα 2048 πειράματα οι τιμές των

παραμέτρων δεν παραβιάζουν την οικονομική θεωρία και την κοινή λογική (πχ αρνητική ελαστικότητα ως προς την βιομηχανική δραστηριότητα ή θετική ελαστικότητα της ζήτησης ως προς την τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας).



Γράφημα 4-6: Τιμές των παραμέτρων (είσοδος στο μοντέλο) στα 2048 πειράματα Monte Carlo στην εξίσωση τελικής βιομηχανικής ζήτησης στην Β. Αμερική (κατανομές εισόδου)



Γράφημα 4-7: Τιμές των ελαστικότητων τιμής και εισοδήματος στα 2048 πειράματα Monte Carlo (χρησιμοποιούνται σαν είσοδος στο μοντέλο)

4.7 Εναλλακτικές μέθοδοι ενσωμάτωσης της αβεβαιότητας

Οι οικονομετρικές εκτιμήσεις σε πολλές περιπτώσεις συμπληρώνονται με την αξιολόγηση αβεβαιοτήτων που παρέχεται από την επιστημονική και πολιτική εμπειρογνωμοσύνη και εξειδικευμένες μελέτες. Σε όλες αυτές τις περιπτώσεις, όπου εξωγενείς πληροφορίες για την αβεβαιότητα εισάγονται στο μοντέλο (εκτός δηλαδή των οικονομετρικών εκτιμήσεων), αφιερώνεται ιδιαίτερη φροντίδα στην ενσωμάτωση ενός ευρέος φάσματος εμπειρογνωμοσύνης. Στον ΠΡΟΜΗΘΕΑ είναι σημαντικό ότι η διακύμανση και η συνδιακύμανση των εξωγενών μεταβλητών και των παραμέτρων εισόδου να είναι αμερόληπτες στο μέτρο του δυνατού και στον βαθμό που η εξειδικευμένη κρίση και γνώση των εμπειρογνωμόνων το επιτρέπει. Σε αντίθετη περίπτωση, οι πιθανοτικές εκτιμήσεις με βάση τα αποτελέσματα του μοντέλου είναι πιθανό να είναι μεροληπτικές.

Δύο κύριες μέθοδοι χρησιμοποιούνται για να παρέχουν στο μοντέλο εξωγενείς πληροφορίες για τις αβεβαιότητες: μέθοδοι Delphi (χρήση ερωτηματολογίων) προκειμένου να καθοριστούν οι μελλοντικές πολιτικές για το κλίμα (ενότητα 5.6.3) καθώς και εξειδικευμένες μελέτες για την ενσωμάτωση της στοχαστικότητας που σχετίζεται με τα ανακτήσιμα κοιτάσματα των ορυκτών καυσίμων (ενότητες 5.6.1 και 5.6.2), συμπεριλαμβανομένων των συμβατικών κοιτασμάτων πετρελαίου και φυσικού αερίου [101, 102], των κοιτασμάτων μη συμβατικών καυσίμων [109-110] και τα ποσοστά εκμάθησης των ενεργειακών τεχνολογιών [121, 172].

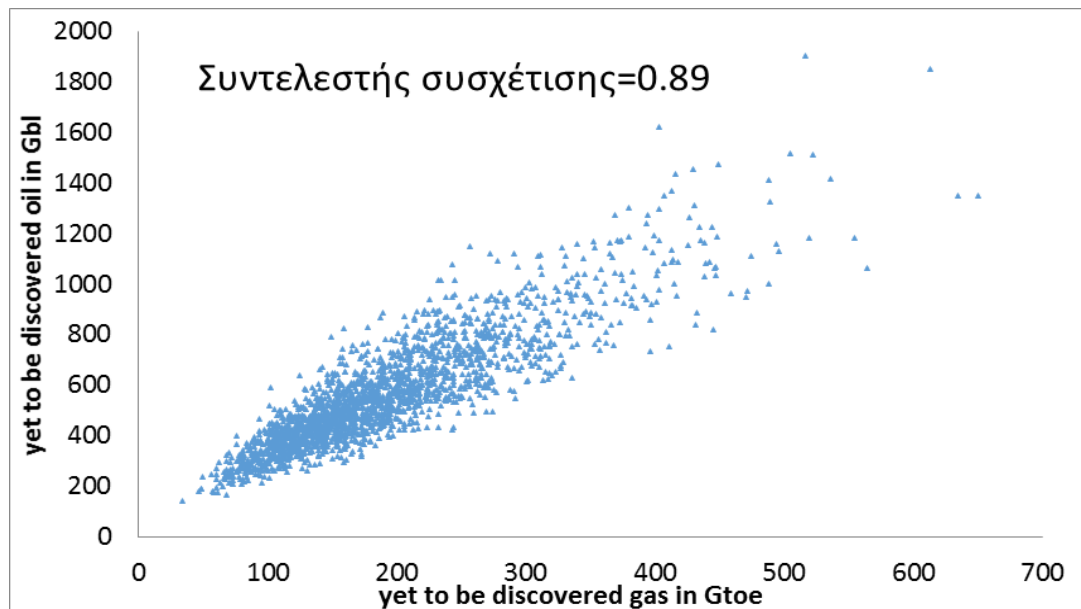
4.7.1 Κατανομές συμβατικών κοιτασμάτων υδρογονανθράκων

Υψηλή αβεβαιότητα περιβάλλει την ποσότητα συμβατικών κοιτασμάτων πετρελαίου και του φυσικού αερίου που ακόμα δεν έχουν ανακαλυφθεί (οικονομικά ανακτήσιμοι πόροι εξαιρουμένων των ήδη γνωστών αποθεμάτων, όπως ορίζονται από το Ινστιτούτο Γεωλογικών Ερευνών των Η.Π.Α., USGS [102]). Αυτή η αβεβαιότητα έχει ενσωματωθεί ρητώς στη στοχαστική εκδοχή του ΠΡΟΜΗΘΕΑ. Χρησιμοποιώντας μελέτες που έχουν διεξαχθεί από το USGS [101, 102], στοχαστική ανάλυση έχει πραγματοποιηθεί προκειμένου να παραχθούν οι κατανομές πιθανοτήτων για τα συμβατικά κοιτάσματα πετρελαίου και φυσικού αερίου¹⁸ (τα οποία δεν έχουν ανακαλυφθεί ακόμα) στο έτος έναρξης της προσομοίωσης 2010. Η ανάλυση βασίζεται σε μεγάλο βαθμό στις εκτιμήσεις του USGS για τον μέσο, τον διάμεσο και τα άνω και κάτω του 5% εκατοστημόρια των συμβατικών κοιτασμάτων των υδρογονανθράκων σε δέκα περιοχές του κόσμου. Ο συντελεστής συσχέτισης μεταξύ των άγνωστων κοιτασμάτων φυσικού αερίου και πετρελαίου είναι ιδιαίτερα υψηλός (0.89) και οφείλεται σε γεωλογικούς παράγοντες (αβεβαιοτήτες σχετικά με το σχηματισμό των υδρογονανθράκων και τη διατήρησή τους σε ιζηματογενείς λεκάνες). Σε κάθε πείραμα Monte Carlo το μοντέλο ξεκινάει από μια διαφορετική κατάσταση του κόσμου όσον αφορά αυτές τις παραμέτρους (Γράφημα 4-8). Η μεγάλη συσχέτιση μεταξύ των

¹⁸ Δεν περιέχουν τις πιθανές προσθήκες στα κοιτάσματα υδρογονανθράκων από την αύξηση των ήδη εκμεταλλεύσιμων αποθεμάτων.

συμβατικών κοιτασμάτων πετρελαίου και φυσικού αερίου είναι ένας σημαντικός λόγος της υψηλής εξάρτησης μεταξύ των διεθνών τιμών των ορυκτών καυσίμων, όπως παρουσιάζονται στις στοχαστικές προβολές του μοντέλου (κεφάλαιο 6).

Το 2010 ο λόγος των παγκόσμιων συμβατικών αποθεμάτων προς παραγωγή (RP ratio) του πετρελαίου ήταν 60 έτη πολύ πάνω από τα 28 που ήταν η τιμή του λόγου το 1977, ενώ κατά την διάρκεια της περιόδου 2010-2013 παρέμεινε σχετικά σταθερός στα 60-62 έτη. Σύμφωνα με τα στοχαστικά αποτελέσματα του PROMHΘEA, η πιθανότητα ο λόγος RP να υπερβεί την τιμή του 1977 το 2050 είναι 48%, ενώ η πιθανότητα να ξεπεράσει την τιμή του 2010 είναι μόλις 1% (οι αντίστοιχες πιθανότητες για το 2030 είναι 81% και 5% αντίστοιχα). Η μέση τιμή του λόγου των συμβατικών παγκόσμιων αποθεμάτων προς την παραγωγή πετρελαίου μειώνεται συνεχώς από τα 62 έτη το 2013 σε 57 έτη το 2020, 42 το 2030 και 29 το 2050, εξαιτίας του συνδυασμού της διαρκούς αυξανόμενης παγκόσμιας ζήτησης (κυρίως από τις αναπτυσσόμενες οικονομίες) και των σχετικά περιορισμένων ποσοτήτων ανεξερεύνητων κοιτασμάτων συμβατικού πετρελαίου, όπως προκύπτουν από τις μελέτες USGS [101, 102].



Γράφημα 4-8: Τιμές των παγκόσμιων κοιτασμάτων συμβατικού πετρελαίου και αερίου το 2010 που χρησιμοποιούνται ως παράμετροι εισόδου για το έτος βάσης στο μοντέλο

4.7.2 Κοιτάσματα μη συμβατικού φυσικού αερίου

Τα κοιτάσματα μη συμβατικού φυσικού αερίου (σχιστολιθικό αέριο, έγκλειστο αέριο και μεθάνιο από κοιτάσματα γαιανθράκων) είναι ιδιαίτερα μεγάλα σε μέγεθος σε παγκόσμιο επίπεδο, αλλά η εκμετάλλευσή τους μέχρι πρόσφατα περιορίζονταν εξαιτίας του μεγάλου κόστους εξόρυξης, των ιδιαίτερα πολύπλοκων τεχνολογιών που απαιτούνται (οριζόντια γεώτρηση, υδραυλική ρωγμάτωση) και των ανησυχιών για περιβαλλοντικές καταστροφές (μόλυνση υδάτων, εκπομπές μεθανίου). Τα τελευταία χρόνια όμως, η ενεργειακή στρατηγική των Η.Π.Α προσανατολίστηκε στην ασφάλεια

ενεργειακού εφοδιασμού, στην μείωση των εισαγωγών ενέργειας και στην εκμετάλλευση των εγχώριων πηγών ορυκτών καυσίμων, το σημαντικότερο από τα οποία είναι το μη συμβατικό φυσικό αέριο (σχιστολιθικό και έγκλειστο). Έτσι, σε λίγα μόλις χρόνια, η παραγωγή μη συμβατικού αερίου αποτελεί το 65% της συνολικής παραγωγής αερίου και οδηγεί τις Η.Π.Α. σε ενεργειακή αυτάρκεια, ακόμα και σε εξαγωγές με την μορφή του LNG την περίοδο μετά το 2020. Η εξέλιξη αυτή ήταν αποτέλεσμα συνδυασμού των μεγάλων κοιτασμάτων σχιστολιθικού αερίου, της τεχνολογικής προόδου για την οριζόντια γεώτρηση και την υδραυλική ρωγμάτωση, του υψηλού κόστους εισαγωγών αερίου για τις Η.Π.Α. και του πολιτικού πλαισίου που ενθάρρυνε την μεγάλης κλίμακας εξόρυξη σχιστολιθικού αερίου.

Η στοχαστική μοντελοποίηση λαμβάνει υπόψη τους παραπάνω παράγοντες και έχει ως στόχο την ενδεδειγμένη αναπαράσταση των κοιτασμάτων και της διαδικασίας αύξησης της παραγωγής μη συμβατικού φυσικού αερίου σε παγκόσμια κλίμακα. Η ποσότητα παραγωγής μη συμβατικού αερίου ανά περιοχή καθορίζεται τόσο από την συνολική ποσότητα πόρων που βρίσκεται στο υπέδαφος της περιοχής όσο και από τον συντελεστή ανάκτησης (*recovery factor*), δηλαδή το ποσοστό των συνολικών κοιτασμάτων που μπορούν να θεωρηθούν αποθέματα και να παραχθούν με την πάροδο του χρόνου. Αυτός ο συντελεστής για τις συμβατικές πηγές είναι συνήθως μεγαλύτερος από 80%, ενώ στα μη συμβατικά κοιτάσματα κυμαίνεται από 10-40%

Αρχικά, η κατασκευή της στοχαστικής κατανομής των συνολικών πόρων του σχιστολιθικού και του έγκλειστου αερίου βασίζεται σε μια σειρά γεωλογικών μελετών [109-111, 116]. Συγκεκριμένα με βάση τις μελέτες [111, 192] υπάρχει συσχέτιση μεταξύ των πόρων σχιστολιθικού και έγκλειστου αερίου με τους συμβατικούς πόρους αερίου. Δηλαδή, οι πιθανότητες να υπάρχουν σχιστολιθικοί σχηματισμοί και κοιτάσματα έγκλειστου αερίου είναι μεγαλύτερες σε περιοχές που υπάρχουν συμβατικοί πόροι φυσικού αερίου. Επομένως, για τα κοιτάσματα αερίου υπάρχουν σχέση της μορφής:

$$resources_shale = f(resources_conv_gas) \text{ και}$$

$$resources_tight = f(resources_conv_gas)$$

Οι παραπάνω εξισώσεις εκτιμώνται οικονομετρικά και έχουν την μορφή

$$\ln(resources_shale) = \alpha_1 + \beta_1 \ln(resources_conv_gas) + u_1 \quad (59)$$

$$\ln(resources_tight) = \alpha_2 + \beta_2 \ln(resources_conv_gas) + u_2 \quad (60)$$

Όπου τα *resources_shale*, *resources_tight*, *resources_conv_gas* εκφράζουν τους πόρους σχιστολιθικού, έγκλειστου και συμβατικού φυσικού αερίου αντίστοιχα και τα β_1 , β_2 , αντιπροσωπεύουν τις αντίστοιχες ελαστικότητες, ενώ τα u_1 , u_2 είναι οι όροι σφάλματος, οι οποίοι ακολουθούν την κανονική κατανομή με μηδενική μέση τιμή και σταθερή διακύμανση ενώ δεν υπάρχει συσχέτιση μεταξύ τους. Για να γίνει η οικονομετρική εκτίμηση των εξισώσεων, χρησιμοποιήθηκαν τα στοιχεία του παρακάτω πίνακα που αντλήθηκαν από την μελέτη του Παγκόσμιου Ινστιτούτου Ανάλυσης Εφαρμοσμένων Συστημάτων (IIASA) [111], Πίνακας 4-12.

Region	Shale gas		Tight gas		Natural gas Historical production till 2009 [tcm]	Natural gas Reserves + resources BGR [tcm]	Natural gas Original Gas-in- Place [tcm]
	Resource		Resource				
	Potential [tcm]	%	Potential [tcm]	%			
USA	113.81	28.2%	37.58	17.7%	26.59	30.60	57.19
CAN	10.36	2.6%	21.76	10.2%	8.60	5.15	13.75
WEU	15.52	3.8%	4.94	2.3%	12.61	9.10	21.71
EEU	15.52	3.8%	4.94	2.3%	1.43	1.83	3.26
FSU	150.03	37.2%	34.61	16.3%	177.38	25.29	202.67
NAF	10.36	2.6%	9.90	4.7%	16.83	2.71	19.53
EAF	5.17	1.3%	4.94	2.3%	0.61	0.03	0.64
WCA	20.69	5.1%	14.83	7.0%	10.51	0.34	10.85
SAF	5.17	1.3%	4.94	2.3%	2.41	0.05	2.47
MEE	NA	NA	19.77	9.3%	108.73	5.44	114.17
CHN	5.17	1.3%	4.94	2.3%	12.23	0.96	13.19
OEA	5.17	1.3%	4.94	2.3%	2.28	0.05	2.34
IND	5.17	1.3%	4.94	2.3%	1.99	0.56	2.55
OSA	15.52	3.8%	9.90	4.7%	3.45	0.93	4.38
JPN	0.13	0.0%	0.13	0.0%	0.03	0.11	0.13
OCN	10.36	2.6%	4.94	2.3%	5.12	0.96	6.08
PAS	5.17	1.3%	9.90	4.7%	15.31	3.53	18.84
LAC	10.36	2.6%	14.83	7.0%	18.58	4.41	22.98
TOTAL	403.54	100.0%	212.57	100.0%	424.7	92.0	516.7

Πίνακας 4-12: Πόροι σχιστολιθικού, έγκλειστου και συμβατικού αερίου (πηγή: GEA, 2012)

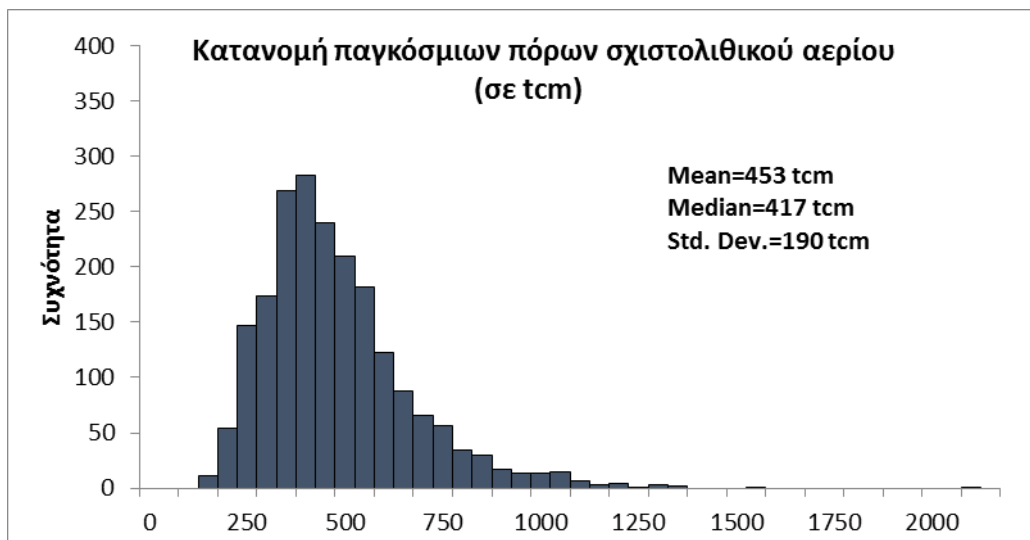
Στην οικονομετρική εκτίμηση χρησιμοποιώ διαστρωματικά δεδομένα (*panel data analysis*), τα οποία αξιοποιούνται εκτενώς στη σύγχρονη οικονομετρία, καθώς επιτρέπουν την συμπερίληψη δεδομένων από N στρώματα-τμήματα (χώρες, εταιρείες κ.α.) και T χρονικές περιόδους. Αποτελούν δηλαδή ένα σύνολο δεδομένων όπου ένα διαστρωματικό δείγμα απεικονίζεται διαχρονικά (συνδυασμός διαστρωματικών δεδομένων και χρονολογικών σειρών). Ένα σύνολο δεδομένων που αποτελείται μόνο από παρατηρήσεις για N τμήματα για την ίδια χρονική περίοδο ονομάζεται *cross-sectional* (συγχρονικό). Η οικονομετρική εκτίμηση με *panel data* χρησιμοποιείται:

- Όταν οι εκτιμήσεις με χρονολογικές σειρές (*time series*) δεν είναι ιδιαίτερα ακριβείς λόγω της ύπαρξης πολυσυγγραμμικότητας, η οποία περιορίζεται με χρήση *panel*
- Αυξάνεται σημαντικά ο αριθμός των παρατηρήσεων που χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση με συνέπεια η αύξηση των βαθμών ελευθερίας να οδηγεί στην βελτίωση της αποτελεσματικότητας των εκτιμημένων συντελεστών.

- Αποφεύγεται το σφάλμα προσθετικότητας καθώς μια διαχρονική συμπεριφορά δεν είναι αναγκαίο να χαρακτηρίζει το σύνολο των παρατηρήσεων
- Διευκολύνεται ο έλεγχος της ετερογένειας μεταξύ των διαστρωματικών δεδομένων

Στη συνέχεια εφαρμόστηκε η μέθοδος των σταθμισμένων ελαχίστων τετραγώνων και συγκεκριμένα η *Pooled OLS Regression*, η οποία βασίζεται σε διαστρωματικά δεδομένα και υποθέτει ότι οι ατομικές επιδράσεις είναι κοινές για όλα τα i . Ως στάθμιση χρησιμοποιήσαμε την τρίτη και πέμπτη στήλη του παραπάνω πίνακα, οι οποίες εκφράζουν τα μερίδια κάθε περιοχής στους συνολικούς πόρους αερίου.

Ύστερα, ακολουθείται η διαδικασία “*generation*”, η οποία έχει παρουσιαστεί εκτενώς στις προηγούμενες ενότητες, για την κατασκευή των κατανομών πιθανότητας (με 2048 παρατηρήσεις) για τα κοιτάσματα μη συμβατικού φυσικού αερίου (ξεχωριστά για κάθε κατηγορία). Τα τελευταία εισάγονται στο μοντέλο με την ίδια λογική όπως και τα συμβατικά κοιτάσματα, δηλαδή σε κάθε πείραμα Monte Carlo το μοντέλο ξεκινάει από μια διαφορετική κατάσταση του κόσμου όσον αφορά τους πόρους αερίου. Στο Γράφημα 4-9 παρουσιάζεται η κατανομή των παγκόσμιων πόρων σχιστολιθικού αερίου μετρούμενη σε trillion cubic meters (tcm).



Γράφημα 4-9: Κατανομή παγκόσμιων πόρων σχιστολιθικού αερίου (σε tcm) που χρησιμοποιούνται ως είσοδος στο έτος βάσης στον ΠΡΟΜΗΘΕΑ

Οι πόροι μεθανίου από κοιτάσματα γαιάνθρακα είναι στατιστικά ανεξάρτητοι από τους πόρους συμβατικού φυσικού αερίου καθώς συναντώνται σε μεταλλεία άνθρακα και δεν σχετίζονται στατιστικά με τα κοιτάσματα φυσικού αερίου. Αυτό προκύπτει επίσης από την οικονομετρική ανάλυση με δεδομένα panel από την μελέτη GEA-2012 [111]). Επίσης βασιζόμενοι στην θεωρία που ανέπτυξε ο Masters το 1979 [193] ότι όλοι οι φυσικοί πόροι στη γη ακολουθούν την λογαριθμο-κανονική κατανομή (*lognormal distribution*), θεωρώ ότι τα κοιτάσματα του μεθανίου από γαιάνθρακες ακολουθούν αυτή την κατανομή. Έτσι, παράγεται ένα διάλυμα 2048 ψευδο-τυχαίων

αριθμών που ακολουθούν την λογαριθμοκανονική κατανομή με τις παραμέτρους μέσης τιμής και απόκλισης που είναι συμβατές με τις μελέτες [110, 111].

Στη συνέχεια, πρέπει να παραχθεί η κατανομή για τον συντελεστή ανάκτησης των μη συμβατικών κοιτασμάτων, ο οποίος εκφράζει εκείνο το τμήμα των πόρων αερίου στο κοίτασμα που μπορεί να μετατραπεί σε αποθέματα και να παραχθεί. Ο συντελεστής αυτός θεωρείται ότι συνδέεται με ένα επίπεδο κορεσμού (εκφράζει την τεχνολογική πρόοδο που σημειώνεται στην εξορυκτική δραστηριότητα μη συμβατικού αερίου π.χ. υδραυλική ρωγμάτωση, οριζόντια γεώτρηση) και την διεθνή τιμή φυσικού αερίου, καθώς όταν η τελευταία αυξάνεται, μεγαλώνει η πιθανότητα πραγματοποίησης γεωτρήσεων σε ταμιευτήρες μη συμβατικού αερίου και έτσι ο συντελεστής ανάκτησης αυξάνεται [109]. Η σχέση αυτή αποτυπώνεται στην παρακάτω εξίσωση:

$$R.F = \frac{S_t}{1 + e^{-a(avgasprice - b)}} \quad (61)$$

Όπου η μεταβλητή S_t εκφράζει το επίπεδο κορεσμού (που διαφέρει ανάμεσα στις κατηγορίες κοιτασμάτων), η *avgasprice* αναπαριστά την παγκόσμια τιμή φυσικού αερίου (σταθμισμένος μέσος όρος των τιμών των τελευταίων πέντε ετών) και το b την τιμή-κατώφλι του αερίου πάνω από την οποία θεωρείται οικονομική η παραγωγή μη συμβατικού φυσικού αερίου. Με βάση μελέτες της IEA θεωρώ ότι η τιμή-κατώφλι για το σχιστολιθικό αέριο είναι τα 6.7\$/Mbtu (σε σταθερούς όρους). Η τιμή αυτή προκύπτει από τον μέσο όρο των τιμών φυσικού αερίου που ανακτούν το κόστος παραγωγής (*break-even costs*) μη συμβατικού αερίου στην Β. Αμερική, την Ευρώπη και την Αυστραλία. Η τιμή κατώφλι για την παραγωγή έγκλειστου αερίου και του μεθανίου από κοιτάσματα γαιανθράκων είναι μεγαλύτερη (7.7 \$/Mbtu).

Η μεταβλητή S_t εκφράζει την τεχνολογική πρόοδο στην εξόρυξη μη συμβατικού αερίου (υδραυλική ρωγμάτωση, οριζόντια γεώτρηση) και υπολογίζεται με βάση

$$S_t = S_{t-1} * e^{tech_progress + u} \quad (62)$$

όπου *tech_progress* εκφράζει την ετήσια τεχνολογική βελτίωση και προκύπτει από την παραγωγή τυχαίων αριθμών με μέση τιμή 0.025 και τυπική απόκλιση 0.008 (για το σχιστολιθικό αέριο). Αυτό σημαίνει ότι η μέση ετήσια βελτίωση της τεχνολογίας την περίοδο 2020-2050 ισούται με 2.5%. Η τεχνολογική πρόοδος περιλαμβάνει την βελτίωση του ρυθμού επιτυχίας της εξερεύνησης και ανάπτυξης καινούργιων φρεάτων φυσικού αερίου, την αύξηση της ανακτησιμότητας ανά φρέαρ και του ρυθμού αρχικής παραγωγής αερίου. Τα στοιχεία αυτά προκύπτουν από την μελέτη του Εθνικού Συμβουλίου Πετρελαίου των ΗΠΑ (US NPC) σχετικά με το μη συμβατικό αέριο [194]. Χαμηλότερες (κατά μέσο όρο) βελτιώσεις υποτίθενται για τις άλλες κατηγορίες μη συμβατικού αερίου. Ωστόσο, οι συντελεστές τεχνολογικής προόδου έχουν ιδιαίτερα υψηλό συντελεστή συσχέτισης μεταξύ τους κυρίως εξαιτίας των παρεμφερών τεχνολογιών που χρησιμοποιούν.

Στο σημείο αυτό πρέπει να αναφερθεί ότι εξαιτίας της μεγάλης αβεβαιότητας που περιβάλλει τα κοιτάσματα και κυρίως τις προοπτικές εκμετάλλευσής τους στις

διάφορες περιοχές, το σενάριο αναφοράς που αναπτύχθηκε με την στοχαστική έκδοση του ΠΡΟΜΗΘΕΑ υποθέτει παραγωγή μη συμβατικού φυσικού αερίου μόνο από την περιοχή της Β. Αμερικής. Εναλλακτικές υποθέσεις για την εκτεταμένη ανάπτυξη των παγκόσμιων κοιτασμάτων ερευνώνται σε εναλλακτικά σενάρια (κεφάλαια 6 και 7).

4.7.3 Κατανομές κλιματικών πολιτικών

Υποθέτοντας καμία πολιτική απάντηση στο παγκόσμιο πρόβλημα της κλιματικής αλλαγής, θα ήταν ισοδύναμο με την παραδοχή ότι δεν υπάρχει καμία πιθανότητα μιας τέτοιας πολιτικής οπουδήποτε στον κόσμο για τα επόμενα 40 χρόνια. Ωστόσο, μια τέτοια παραδοχή είναι αντίθετη με την λογική του στοχαστικού μοντέλου. Τα περισσότερα ντετερμινιστικά ενεργειακά μοντέλα (μετά από την υπογραφή του πρωτοκόλλου του Κιότο) έχουν εισάγει τα ζητήματα κλιματικής και περιβαλλοντικής πολιτικής συνήθως με την υπόθεση της επιβολής ποσοτικών στόχων/περιορισμών για την μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου. Στον ΠΡΟΜΗΘΕΑ, από την άλλη πλευρά, η χρήση ρητών κλιματικών στόχων θα αποτελούσε διαστρέβλωση της αβεβαιότητας που περιβάλλει τις μελλοντικές πολιτικές για το κλίμα, καθώς πρέπει να εξεταστεί η πιθανότητα να τεθούν στόχοι αλλά να μην υλοποιηθούν. Για το λόγο αυτό, το στοχαστικό μοντέλο χρησιμοποιεί μια κατανομή πιθανότητας για την «τιμή του διοξειδίου του άνθρακα» ως συνολικό μέτρο της έντασης της κλιματικής πολιτικής, όπως χρησιμοποιείται συνήθως και από τα ντετερμινιστικά μοντέλα μεγάλης κλίμακας στην ανάπτυξη σεναρίων [11]. Η τιμή διοξειδίου του άνθρακα εισάγεται με τη μορφή ενός επιπρόσθετου κόστους σε όλες τις δραστηριότητες που εκπέμπουν διοξείδιο του άνθρακα και προσδιορίζονται στο πλαίσιο του μοντέλου. Η επιβολή της τιμής άνθρακα όπως αναλύθηκε στο κεφάλαιο 3 οδηγεί σε εξοικονόμηση ενέργειας και υποκατάσταση των ορυκτών καυσίμων από τεχνολογίες χαμηλού και μηδενικού άνθρακα.

Δεδομένου ότι καμία πραγματικά επιστημονική εμπειρία και τεχνογνωσία όσον αφορά τον χρόνο, την έκταση, τη φύση και την πιθανότητα κλιματικών πολιτικών στις διάφορες περιοχές του κόσμου δεν είναι πραγματικά διαθέσιμη και αξιόπιστη, μια μεθοδολογία τύπου Delphi χρησιμοποιείται για να παραχθούν οι απαραίτητες κατανομές των κλιματικών πολιτικών (που εισάγονται στο μοντέλο). Οι υποκειμενικές κρίσεις έχουν επηρεαστεί από την εμπειρία που αποκτήθηκε από τη διαδικασία του πρωτοκόλλου του Κιότο και των πιο πρόσφατων διεθνών διαπραγματεύσεων για το κλίμα (Κοπεγχάγη, Κανκούν, Ντέρμπαν) και συνεπώς υποδηλώνουν υψηλό κίνδυνο καθυστερήσεων και αποτυχιών στις κλιματικές πολιτικές και μικρή πιθανότητα συντονισμένης και φιλόδοξης παγκόσμιας δράσης για το κλίμα. Ο συνδυασμός/άθροιση των κρίσεων των εμπειρογνομόνων έχει χρησιμοποιηθεί εκτενώς στο παρελθόν για να παρέχει ένα μέτρο για την αξιολόγηση της αβεβαιότητας ιδίως στο πλαίσιο της έλλειψης ιστορικών δεδομένων ή άλλων αξιόπιστων στοιχείων [170]. Στο πλαίσιο της στοχαστικής μοντελοποίησης του ΠΡΟΜΗΘΕΑ, μια σειρά από εμπειρογνώμονες παρείχαν πιθανολογικές εκτιμήσεις για τις μελλοντικές κλιματικές πολιτικές μέσω κατάλληλων ερωτηματολογίων Delphi [11]. Σε αυτό το πλαίσιο, αναλάβαμε την κυκλοφορία ενός ερωτηματολογίου μεταξύ όλων των συμμετεχόντων και των εταιρών

στα Ευρωπαϊκά προγράμματα SAPIENTIA [11] και CASCADE-MINTS [127] ζητώντας την εμπειρία τους όσον αφορά τις πολιτικές για το κλίμα έως το 2050 για τις διάφορες περιοχές που προσδιορίζονται στο μοντέλο. Το ερωτηματολόγιο συμπληρώθηκε από περισσότερους από 40 διεθνώς αναγνωρισμένους εμπειρογνώμονες, φορείς χάραξης πολιτικής και επιστήμονες, χωρίς καμία αλληλεπίδραση μεταξύ τους εξασφαλίζοντας έτσι την επαρκή ετερογένεια και αξιοπιστία του στατιστικού δείγματος. Συγκεκριμένα, οι ειδικοί ποσοτικοποίησαν (με υποκειμενικό τρόπο) τις πιθανότητες να μην υπάρξει καμία δράση για το κλίμα και τις πιθανότητες ώστε ο μέσος, ο διάμεσος και σημαντικά εκατοστημόρια της κατανομής των τιμών διοξειδίου του άνθρακα ανά περιοχή να υπερβούν μια ορισμένη τιμή κατά την περίοδο 2020 έως 2050. Πιο συγκεκριμένα, για κάθε χρονικό διάστημα (ανά δεκαετία), οι εμπειρογνώμονες κλήθηκαν να παρέχουν τις απαντήσεις τους για τα παρακάτω:

- Πιθανότητα ότι καμία κλιματική πολιτική δεν θα πραγματοποιηθεί
- Οι πιθανότητες μόνο η ΕΕ θα εφαρμόσει κλιματικές πολιτικές και σε αυτή την βάση, η μέση προσπάθεια μετρούμενη σε τιμή διοξειδίου του άνθρακα (carbon value).
- Οι πιθανότητες ότι οι υπόλοιπες ανεπτυγμένες οικονομίες θα υλοποιήσουν κλιματικές πολιτικές ισοδύναμες ή χαμηλότερες σε ένταση σε σύγκριση με την Ευρώπη και το μέσο ποσοστό της τιμής διοξειδίου του άνθρακα που εφαρμόζεται σε αυτήν την περιοχή ως προς την τιμή για την ΕΕ-28
- Οι πιθανότητες ότι η Κίνα (και στη συνέχεια οι υπόλοιπες αναπτυσσόμενες περιοχές) θα υλοποιήσουν κλιματικές πολιτικές και το μέσο ποσοστό της τιμής άνθρακα που εφαρμόζεται σε αυτές τις περιοχές ως προς την τιμή για την ΕΕ-28

Τα αποτελέσματα των ερωτηματολογίων αναλύθηκαν εκτενώς προκειμένου να παραχθούν από κοινού κατανομές των κλιματικών πολιτικών στις περιοχές του μοντέλου. Η εξέλιξη της μέσης τιμής των κατανομών πιθανοτήτων για την περίοδο 2015-2050 έχει ανανεωθεί υπό το πρίσμα των διεθνών διαβουλεύσεων για το κλίμα στην Κοπεγχάγη και στο Κανκούν [174], του σημερινού διεθνούς τοπίου για τις κλιματικές πολιτικές και των ήδη αποφασισμένων υποσχέσεων (emission pledges) και κλιματικών στόχων των οικονομιών με τις περισσότερες εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου. Φυσικά, μια τέτοια ενημέρωση έπρεπε σεβαστεί την βασική αρχή του ΠΡΟΜΗΘΕΑ ότι όλες οι (ενεργειακές και κλιματικές) πολιτικές είναι στοχαστικές και συνεπώς υπόκεινται σε τυχαίες μεταβολές.

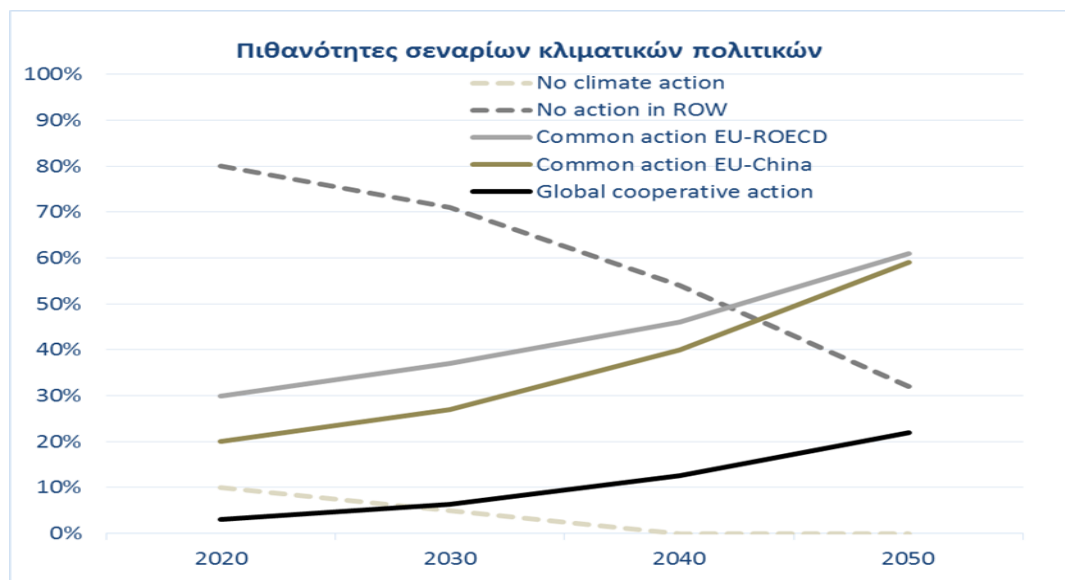
Ο βαθμός συμμετοχής στην προσπάθεια μείωσης των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου διαφέρει μεταξύ των περιοχών, αλλά σε γενικές γραμμές υπάρχει μεγάλη πιθανότητα ότι η ένταση των πολιτικών μετριασμού της κλιματικής αλλαγής θα αυξάνεται σε όλες τις περιοχές με το πέρασμα του χρόνου. Το συνολικό σχέδιο που έχει εφαρμοστεί στο μοντέλο είναι ότι η Ευρωπαϊκή Ένωση θα ηγηθεί της παγκόσμιας προσπάθειας μείωσης των εκπομπών άνθρακα [175], όπως ήδη παρατηρείται εξαιτίας της θέσπισης πλαισίων κλιματικών πολιτικών, της υλοποίησης φιλόδοξων πολιτικών εξοικονόμησης και διείσδυσης των ΑΠΕ και της θέσπισης του Ευρωπαϊκού μηχανισμού ΣΕΔΕ. Το μοντέλο υποθέτει ότι η Ευρωπαϊκή προσπάθεια ακολουθείται αργότερα από

μικρότερες σε ένταση κλιματικές πολιτικές στο υπόλοιπες ανεπτυγμένες οικονομίες του ΟΟΣΑ; η πιθανότητα ότι η Βόρεια Αμερική υιοθετεί ισχυρότερη προσπάθεια μείωσης εκπομπών, δηλαδή υψηλότερη τιμή διοξειδίου του άνθρακα, σε σύγκριση με την ΕΕ το 2050 είναι μόλις 16%, ενώ για τις αναπτυσσόμενες οικονομίες η αντίστοιχη πιθανότητα είναι 0%. Οι αναπτυσσόμενες περιοχές γενικά υιοθετούν τις προσπάθειες για το κλίμα μόνο ύστερα από τις αναπτυγμένες οικονομίες. Με αυτό το πρότυπο, δημιουργείται συσχέτιση μεταξύ των κλιματικών πολιτικών ανάμεσα στις περιοχές του μοντέλου. Ο μηχανισμός λαμβάνει υπόψη την σημαντική διαφοροποίηση μεταξύ των αναπτυσσομένων περιοχών, καθώς οι αναδυόμενες οικονομίες και κυρίως η Κίνα έχουν υψηλότερες πιθανότητες να εφαρμόσουν ισχυρές κλιματικές πολιτικές σε αντίθεση με τις χώρες της Αφρικής και της Μ. Ανατολής. Επίσης η ανάλυση θεωρεί ότι η Κίνα έχει αυξημένες πιθανότητες να συμμετέχει ενεργά στην κλιματική πολιτική, καθώς:

- Η Κίνα είναι πιθανό να αντιμετωπίσει ιδιαίτερα σημαντικές επιπτώσεις από την κλιματική αλλαγή, πχ στα υδάτινα αποθέματα που είναι ήδη περιορισμένα σε ορισμένες περιοχές της χώρας [176] και στον τομέα της ατμοσφαιρικής ρύπανσης
- Τα τελευταία χρόνια, η Κίνα είναι ιδιαίτερα ενεργή όσον αφορά την θέσπιση μιας σειράς από εγχώριες πολιτικές για το κλίμα και την ενέργεια [177]
- Η Κίνα αποτελεί την οικονομία με τις μεγαλύτερες εκπομπές άνθρακα παγκοσμίως και άρα η αυστηρότητα των κλιματικών της πολιτικών θα έχει ιδιαίτερα σημαντικές επιπτώσεις για τις παγκόσμιες εκπομπές άνθρακα και για την κλιματική αλλαγή

Επιπλέον, ο PROMHΘΕΑΣ ενσωματώνει μια διακριτή πιθανότητα ανάληψης παγκόσμιας φιλόδοξης δράσης για την μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου. Η πιθανότητα αυτή ορίζεται υποκειμενικά και οι μεταβολές της τιμής της αντιπροσωπεύουν εναλλακτικά σενάρια κλιματικής πολιτικής (κεφάλαιο 7). Η καθαρά υποκειμενική φύση της συγκεκριμένης πιθανότητας σημαίνει ότι οι τιμές της καθορίζονται εξωγενώς και γενικά αυξάνονται από 0% το 2015 σε 22% το 2050 αντανakλώντας την ολοένα μεγαλύτερη πιθανότητα για φιλόδοξες πολιτικές προς το τέλος του ορίζοντα προβολής, όταν οι συγκεντρώσεις αερίων του θερμοκηπίου θα έχουν αυξηθεί και οι επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής θα είναι ήδη εμφανείς σε αρκετές περιοχές. Το Γράφημα 4-10 παρουσιάζει τα αποτελέσματα της διαδικασίας Delphi για τις «μέσες» πιθανότητες που δίνουν οι εμπειρογνώμονες σε εναλλακτικές σενάρια κλιματικής πολιτικής την περίοδο 2020-2050. Ξεκινώντας από το πιο απαισιόδοξο σενάριο (μηδενική τιμή άνθρακα σε όλες τις περιοχές μέχρι το 2050) οι απαντήσεις οδηγούν σε μια συνεχώς μειούμενη πιθανότητα παρότι έχει μια μη-αμελητέα τιμή μέχρι το 2020 (10%). Ωστόσο η πιθανότητα μιας τέτοιας εξέλιξης καταγράφει μια απότομη πτώση κατά την επόμενη δεκαετία και εξαφανίζεται την περίοδο μετά το 2030. Από την άλλη πλευρά, η ανάλυση έδειξε υψηλές πιθανότητες για καμία κλιματική πολιτική στις αναπτυσσόμενες περιοχές (εκτός Κίνας) ακόμα και το 2050 (32%). Συνολικά, οι απαντήσεις στα ερωτηματολόγια δείχνουν μια συνεχώς αυξανόμενη ανάγκη για εφαρμογή συντονισμένης κλιματικής πολιτικής μεσοπρόθεσμα (π.χ. κοινές πολιτικές στις οικονομίες του ΟΟΣΑ ή στην ΕΕ και στην Κίνα) όταν η παγκόσμια διάσταση των επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής γίνει εμφανής. Η γενική

εικόνα παρουσιάζει ένα σταδιακό σχηματισμό μιας διεθνούς συνεργασίας για τον περιορισμό των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου που γίνεται ιδιαίτερα εμφανής μετά το 2030. Συνεπώς, το 2050 οι πιθανότητες κοινής κλιματικής δράσης του συνόλου των ανεπτυγμένων οικονομιών εκτιμώνται σε 61%, ενώ η δράση Ευρώπης-Κίνας 59%.



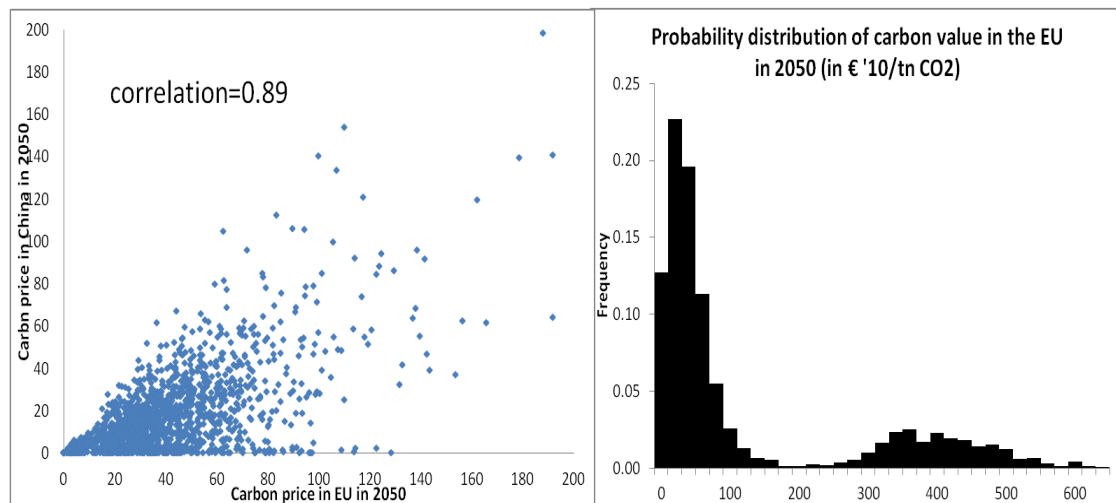
Γράφημα 4-10: Πιθανότητες εναλλακτικών σεναρίων κλιματικής πολιτικής την περίοδο 2020-2050 (που χρησιμοποιούνται σαν είσοδος στην στοχαστική ανάλυση)

Στις περιπτώσεις συντονισμένης διεθνούς δράσης για τον δραστικό περιορισμό των παγκόσμιων εκπομπών άνθρακα είναι πολύ πιθανό ότι επιπρόσθετες πολιτικές και μέτρα εξειδικευμένα ανά τομέα πέρα από την τιμή άνθρακα θα πρέπει επίσης να εφαρμοστούν. Τα μέτρα αυτά περιλαμβάνουν πρότυπα ενεργειακής απόδοσης για τους τομείς της βιομηχανίας, των μεταφορών και κυρίως για τον οικιακό τομέα (επενδύσεις σε ενεργειακά αποδοτικές τεχνολογίες, μονώσεις στα κτίρια κ.α.), πρόσθετους φόρους στα πετρελαϊκά προϊόντα στις οδικές μεταφορές, κρατικές επιδοτήσεις στο κόστος κεφαλαίου των τεχνολογιών ΑΠΕ (κυρίως στα φωτοβολταϊκά), πολιτικές προώθησης τεχνολογιών με μηδενικό άνθρακα και παροχή των αναγκαίων υποδομών (βελτίωση του ηλεκτρικού δικτύου, υποδομές επαναφόρτισης μπαταριών) και χρησιμοποίηση ενός (στοχαστικού) ποσοστού των εσόδων από τον φόρο άνθρακα σε πρόσθετες επενδύσεις σε R&D για τις τεχνολογίες χαμηλού και μηδενικού άνθρακα.

Με βάση την παραπάνω ανάλυση, οι τιμές διοξειδίου του άνθρακα αναμένεται να ακολουθήσουν μια συνεχώς αυξητική πορεία (κατά μέσο όρο) σε όλες τις περιοχές. Η απροθυμία για την αντιμετώπιση της κλιματικής αλλαγής αναμένεται να μειωθεί σημαντικά σε όλο τον κόσμο, με την Ευρώπη να ηγείται της παγκόσμιας προσπάθειας, ακολουθούμενη από τις οικονομίες του ΟΟΣΑ και την Κίνα. Την περίοδο μετά το 2030, αυξάνονται σημαντικά οι πιθανότητες για παγκόσμια συντονισμένη δράση για το κλίμα, παρότι γενικά παραμένουν σε σχετικά χαμηλά επίπεδα (22% το 2050). Ο διάμεσος της παγκόσμιας τιμής διοξειδίου του άνθρακα αυξάνεται από 4.5 €/2010/τόνο διοξειδίου το 2020 σε 7 €/τόνο το 2030 και σε 25 €/τόνο το 2050. Με βάση την

στατιστική ανάλυση των ερωτηματολογίων το άνω 5% εκατοστημόριο της κατανομής είναι 215 €/τόνο το 2050 (παγκόσμια δράση) και το κάτω 5% είναι μόλις 2 €/τόνο σε περιπτώσεις μηδενικής κλιματικής δράσης στις αναπτυσσόμενες οικονομίες.

Οι κρίσεις των εμπειρογνομών έχουν συνδυαστεί για να παράγουν τις κατανομές πιθανοτήτων για τις τιμές του άνθρακα σε κάθε περιοχή την περίοδο 2020-2050. Κατά την παραγωγή των κατανομών για τις παραμέτρους εισόδου, έχει δοθεί ιδιαίτερη προσοχή στα θέματα συνυπολογισμού και άθροισης των κρίσεων των εμπειρογνομών και στην πιστοποίηση της ανεξαρτησίας τους. Η παραγωγή των κατανομών πιθανοτήτων για τις τιμές άνθρακα που χρησιμοποιούνται στον ΠΡΟΜΗΘΕΑ ακολουθεί την μεθοδολογία γραμμικής δεξαμενής γνώμης- *linear opinion pool methodology* (αναλυτική περιγραφή στο [171]), η οποία παρά την απλότητά της αποδίδει αρκετά ικανοποιητικά αποτελέσματα, ενώ οι πιο σύνθετες μεθοδολογίες μπορεί να είναι ευαίσθητες, οδηγώντας σε κακή απόδοση σε ορισμένες περιπτώσεις [170]. Δύο βασικά χαρακτηριστικά των κατανομών των τιμών άνθρακα (Γράφημα 4-11) είναι η ισχυρή θετική συσχέτιση μεταξύ των περιοχών (ιδιαίτερα μετά το 2030) και η μεγάλη ασυμμετρία τους, εξαιτίας κυρίως της εισαγωγής πιθανοτήτων συντονισμένης παγκόσμιας δράσης για το κλίμα, που καθιστούν τις μέσες τιμές πολύ υψηλότερες από τις διαμέσους (π.χ. η μέση τιμή του άνθρακα στην ΕΕ προβλέπεται να είναι 105 € ανά τόνο διοξειδίου το 2050, ενώ η μέση τιμή είναι μόνο 54 €).



Γράφημα 4-11: Κατανομή των τιμών άνθρακα στην Ευρώπη που χρησιμοποιούνται σαν είσοδος στο μοντέλο το 2050 (σε € 2010/tn CO₂)

4.7.4 Στοχαστικές μεταβάσεις

Οι στοχαστικές μεταβάσεις χρησιμοποιούνται για να αναπαραστήσουν διαρθρωτικές αλλαγές, μεταρρύθμιση της αγοράς ενέργειας και εναλλακτικά πρότυπα κατανάλωσης. Σε γενικές γραμμές, οι στοχαστικές μεταβάσεις έχουν εφαρμοστεί στις εξισώσεις ζήτησης ενέργειας για την αναπαράσταση των διαρθρωτικών αλλαγών που συμβαίνουν όταν μια αναπτυσσόμενη περιοχή φτάνει σε επίπεδα εισοδήματος τυπικά για μια ανεπτυγμένη οικονομία. Σε μια τέτοια περίπτωση, γίνεται η υπόθεση ότι η ειδική

εξίσωση ενεργειακής ζήτησης για αυτή την περιοχή σταδιακά αντικαθίσταται από την αντίστοιχη εξίσωση για τις ανεπτυγμένες περιοχές. Γενικά, μια στοχαστική διαδικασία μετάβασης (για απλότητα παρουσιάζεται μια μετάβαση στο χρόνο) καθορίζεται ως:

$$y_t = (1 - \lambda_t(t; \sigma)) * f_1(\mathbf{x}_{1t}, \boldsymbol{\theta}_1) + \lambda_t(t; \sigma) * f_2(\mathbf{x}_{2t}, \boldsymbol{\theta}_2). \quad (63)$$

Όπου οι f_1 και f_2 αναπαριστούν εναλλακτικούς προσδιορισμούς της εξίσωσης που πιθανώς περιέχουν διαφορετικά σύνολα μεταβλητών ($\mathbf{x}_{1t}, \mathbf{x}_{2t}$) και αναφέρονται σε βραχυχρόνιες και μακροχρόνιες εξισώσεις αντίστοιχα. Η μετάβαση από την f_1 στην f_2 καθορίζεται από τον στοχαστικό παράγοντα- «βάρος»- $\lambda_t(t; \sigma)$, ο οποίος λαμβάνει τιμές μεταξύ μηδέν (στο έτος έναρξης της διαδικασίας) και ένα (όταν η μετάβαση έχει ολοκληρωθεί). Ο στοχαστικός παράγοντας εξαρτάται από την παράμετρο $\sigma \in \mathfrak{R}^+$ που αναπαριστά έναν γενικό δείκτη της αβεβαιότητας που περιβάλλει την διαδικασία και τον χρόνο t , με $t = 0$ όταν αρχικοποιείται η διαδικασία. Ο στοχαστικός παράγοντας $\lambda_t(t; \sigma)$ εκτός από τις μεταβλητές σ και t περιέχει τις ακόλουθες παραμέτρους:

- i) $\omega \in \mathfrak{R}^+$, που αναπαριστά την μέση διάρκεια της διαδικασίας μέχρι την ολοκλήρωση, δηλαδή μέχρι το $\lambda_t(t; \sigma)$ να γίνει 1;
- ii) $M < \omega$ που ορίζεται ως το ολοκλήρωμα $M = \int_0^\omega t\lambda(t)dt$, εκφράζει την μέση τιμή του $\lambda_t(t; \sigma)$ στο διάστημα $[0, \omega]$ και αποτελεί έναν γενικό δείκτη του μέσου σημείου της διαδικασίας, παρότι με μαθηματική ακρίβεια είναι ένα ορθό μέσο σημείο μόνο όταν $M = \omega/2$;
- iii) $s \in [0,1]$ είναι ένα μέτρο της μέσης ταχύτητας της στοχαστικής μετάβασης. Μια τιμή της παραμέτρου s κοντά στο μηδέν σημαίνει ένα πολύ ξαφνικό πέρασμα του λ_t από την τιμή 0 στο 1 κοντά στην τιμή M . Μια μέση γραμμική μετάβαση επιτυγχάνεται όταν $s = \frac{1}{\sqrt{3}} = 0.577$, με το $M = \frac{\omega}{2}$. Τιμές του s κοντά στο 1 τείνουν να παράγουν μακροχρόνιες διαδικασίες μετάβασης, οι οποίες τελικά καταρρέουν στην περίπτωση όπου το λ_t λαμβάνει την τιμή M στην αρχή, παραμένει σχεδόν σταθερό μέχρι την ω και τελικά παίρνει την τιμή 1.

Εν απουσία συγκεκριμένης γνώσης, η παράμετρος M λαμβάνει την τιμή με $\omega/2$ και το s θεωρείται ίσο με 0.5. Κατά μέσο όρο, οι τιμές αυτές θα οδηγήσουν σε μια ελαφρώς σιγμοειδή (S-shaped) μετάβαση. Ένας τέτοιος προσδιορισμός επιτρέπει στον αναλυτή να επικεντρωθεί στον καθορισμό της μέσης διάρκειας της διαδικασίας (ω) και ενός γενικού μέτρου της «έλλειψης γνώσης» κατά τη διάρκεια της διαδικασίας σ . Η διακύμανση του σ συνεισφέρει στην διακύμανση της διάρκειας της μετάβασης, του μέσου σημείου της και του προφίλ-μορφής της.

Ο στοχαστικός μηχανισμός προσομοίωσης των μεταβάσεων που επιλέχθηκε για το μοντέλο βασίζεται στις ακόλουθες εξισώσεις (T αναπαριστά το τέλος της περιόδου πρόβλεψης του μοντέλου):

$$\lambda(t) = \begin{cases} 1, & \text{if } t \geq \omega_t \\ \int_0^{t/\omega_t} \frac{\Gamma(\alpha_t \beta_t) x^{\alpha_t-1} (1-x)^{\beta_t-1}}{\Gamma(\alpha_t) \Gamma(\beta_t)} dx, & \text{if } t < \omega_t, \text{ for } t = 1, \dots, T \end{cases} \quad (64)$$

όπου

$$\omega_t = \omega_{t-1} * e^{z_t}, \quad z_t \sim N(0, \sigma^2) \quad (65)$$

$$\alpha_t = \alpha_{t-1} * e^{a_t}, \quad a_t \sim N\left(0, \left(\frac{\alpha_0 + \beta_0}{\beta_0} * \sigma\right)^2\right) \quad (66)$$

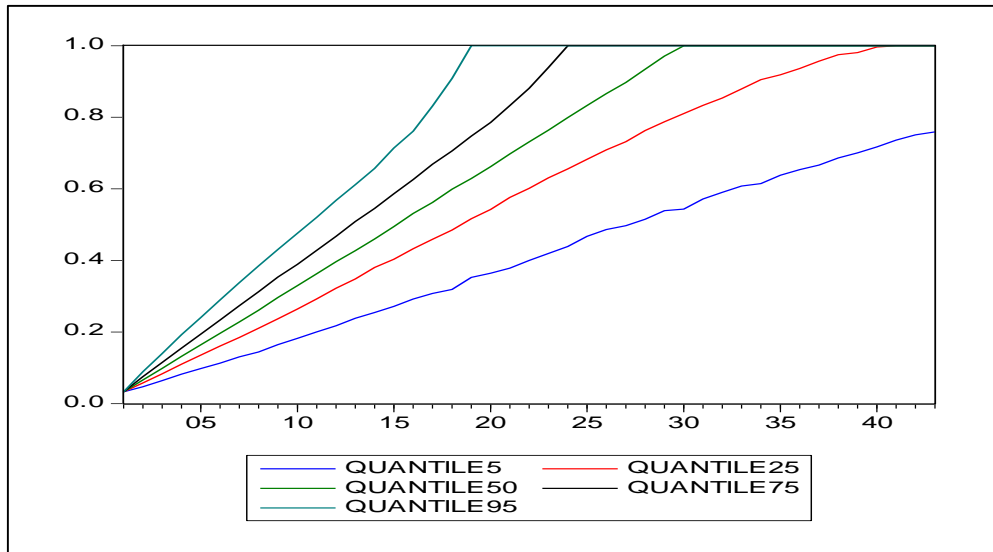
$$\beta_t = \beta_{t-1} * e^{b_t}, \quad b_t \sim N\left(0, \left(\frac{\alpha_0 + \beta_0}{\beta_0} * \sigma\right)^2\right) \quad (67)$$

Με τις παραμέτρους της στοχαστικής διαδικασίας να καθορίζονται ως εξής: $M = \omega/2$ (η τιμή του μέσου σημείου του λ), $m = M/\omega$ (βοηθητική παράμετρος), $\omega_0 = \omega$, $\beta_0 = (1 - m) \left(\frac{1-s^2}{s^2}\right)$, $\alpha_0 = \beta_0 * \left(\frac{m}{1-m}\right)$ που αναπαριστούν τις αρχικές τιμές για τις τυχαίες διαδικασίες καθορισμού των παραμέτρων της εξίσωσης (64).

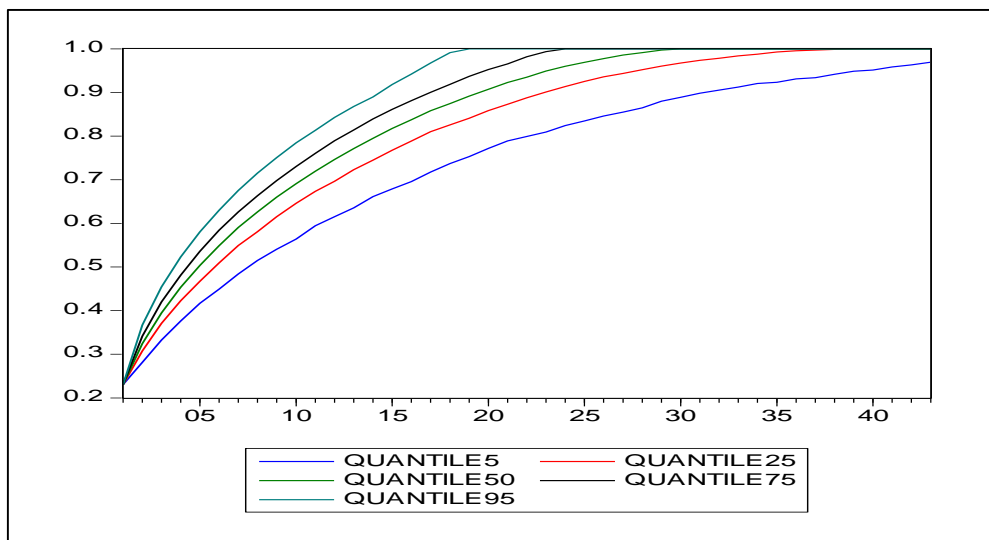
Η συνάρτηση μέσα στο ολοκλήρωμα της εξίσωσης (62) είναι η κατανομή beta (η αθροιστική της οποίας είναι διαθέσιμη στο E-VIEWS), στην οποία γίνεται η υπόθεση ότι οι παράμετροί της α_t και β_t ακολουθούν μια γεωμετρική τυχαία διαδικασία Brownian (geometric random walk) με βάση τις εξισώσεις (64) και (65). Η παράμετρος διάρκειας της διαδικασίας ω_t επίσης ακολουθεί την γεωμετρική τυχαία διαδικασία γύρω από την τιμή ω . Η γεωμετρική διαδικασία Brownian είναι μια στοχαστική διαδικασία στην οποία ο λογάριθμος της τυχαίας μεταβαλλόμενης ποσότητας ακολουθεί την κίνηση Brownian με αλλαγή της μέσης τιμής της στοχαστικής διαδικασίας στο χρόνο. Για παράδειγμα, η εξέλιξη της ιδιοκτησίας αυτοκινήτων στις αναπτυσσόμενες περιοχές γίνεται η υπόθεση ότι αρχικά ακολουθεί εξισώσεις που έχουν εκτιμηθεί οικονομικά με ιστορικά δεδομένα για αυτές τις περιοχές. Οι ειδικές εξισώσεις των περιοχών σταδιακά αντικαθίστανται (με τον μηχανισμό μεταβάσεων) από εξισώσεις που έχουν εκτιμηθεί με βάση ένα διαστρωματωμένο σύνολο δεδομένων από Ευρωπαϊκές χώρες. Συνεπώς, οι μακροχρόνιες παράμετροι (π.χ. πιθανά επίπεδα κορεσμού στο επίπεδο ιδιοκτησίας οχημάτων) αντιμετωπίζονται παράλληλα με την βραχυχρόνια διακύμανση έτσι ώστε να παραχθεί το μονοπάτι της συνολικής μεταβλητότητας, με τις μεταβλητές να μεταβάλλονται σε απόκριση τυχαίων βραχυπρόθεσμων ερεθισμάτων αλλά ταυτόχρονα τείνουν προς εξίσου αβέβαιη μακροχρόνια κατάσταση.

Σαν παράδειγμα γραφικής απεικόνισης της μεθοδολογίας στοχαστικών μεταβάσεων, το παρακάτω γράφημα παρουσιάζει την κατανομή των 2048 πειραμάτων ενός στοχαστικού παράγοντα μετάβασης $\lambda_t(t; \sigma)$ όταν η παράμετρος σ λαμβάνει την τιμή 0.005 και $M = \frac{\omega}{2}$ (δηλαδή 20 χρόνια). Ο οριζόντιος άξονας αναπαριστά την χρονική διάρκεια της μετάβασης με $T=40$, ενώ το γράφημα παρουσιάζει την εξέλιξη της

διάμεσης τιμής και άλλων σημαντικών εκατοστημορίων της κατανομής του λ_t , σύμφωνα με την οποία η μετάβαση θα έχει ολοκληρωθεί το έτος 30 της περιόδου (διάμεσος τιμή). Η πιθανότητα ότι η μετάβαση θα έχει ολοκληρωθεί μέχρι την μέση της χρονικής περιόδου (έτος 20) εκτιμάται σε 25%, ενώ υπάρχει επίσης και πιθανότητα 23% ότι η μετάβαση δεν θα έχει ολοκληρωθεί μέχρι το τέλος της περιόδου. Τέλος, το Γράφημα 4-13 δείχνει την ιδιαίτερα μεγάλη σημασία της τιμής της παραμέτρου M , καθώς όταν αυτή θεωρείται ίση με $\frac{\omega}{4}$ η πιθανότητα μη ολοκλήρωσης της μετάβασης μειώνεται από 23% σε μόλις 8%.



Γράφημα 4-12: Παράδειγμα υπολογισμού του παράγοντα λ που καθορίζει την στοχαστική μετάβαση μεταξύ εξισώσεων όταν $\sigma=0.005$ και $M = \omega/2$



Γράφημα 4-13: Παράδειγμα υπολογισμού του παράγοντα λ που καθορίζει την στοχαστική μετάβαση μεταξύ εξισώσεων όταν $\sigma=0.005$ και $M = \frac{\omega}{4}$

Κεφάλαιο 5

5. Αξιολόγηση επενδύσεων στην παραγωγή ηλεκτρισμού υπό αβεβαιότητα

5.1 Σκοπός και βιβλιογραφική ανάλυση

Η αβεβαιότητα αποτελεί έναν ιδιαίτερα σημαντικό παράγοντα για τις μελλοντικές οικονομικές αποφάσεις (π.χ. επενδύσεις σε ενεργειακές τεχνολογίες, αποφάσεις για την βέλτιστη κατανομή του R&D, κίνδυνοι ασφάλειας ενεργειακού εφοδιασμού). Συγκεκριμένα, οι επενδύσεις στον τομέα της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας έχουν τρία σημαντικά χαρακτηριστικά: την αβεβαιότητα όσον αφορά τις τιμές πώλησης του ηλεκτρισμού στους τελικούς καταναλωτές, την αβεβαιότητα για την εξέλιξη του κόστους παραγωγής των τεχνολογιών (το οποίο συμπεριλαμβάνει το κόστος της επένδυσης, τις τιμές αγοράς των ορυκτών καυσίμων, καθώς και το κόστος εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα) καθώς και την μη αντιστρεψιμότητα της μεγάλης-κλίμακας επένδυσης. Ο σκοπός της παρούσας ενότητας είναι να παρουσιάσει μια από τις ιδιαίτερα σημαντικές εφαρμογές της στοχαστικής ανάλυσης του ΠΡΟΜΗΘΕΑ και συγκεκριμένα την αξιολόγηση του χαρτοφυλακίου των επενδύσεων στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας υπό το πρίσμα της αβεβαιότητας.

Οι επενδύσεις στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας αποτελούν μια από τις πιο σημαντικές και δύσκολες αποφάσεις που λαμβάνονται στο πλαίσιο του μακροχρόνιου σχεδιασμού του ενεργειακού συστήματος και συνήθως λαμβάνουν υπόψη τους μια σειρά από πολιτικές και στόχους (βιωσιμότητα επενδύσεων, ελαχιστοποίηση κόστους, μείωση εισαγωγών καυσίμων, ασφάλεια τροφοδοσίας και μείωση των εκπομπών άνθρακα). Το χαρτοφυλάκιο των σταθμών παραγωγής σε ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας είναι καθοριστικός παράγοντας της εξέλιξης του μακροπρόθεσμου κόστους της βιομηχανίας. Γενικά, οι επενδύσεις στην ηλεκτροπαραγωγή είναι μεγάλης κλίμακας, μη αναστρέψιμες, έχουν μακρά διάρκεια ζωής, μεγάλη ένταση κεφαλαίου και έχουν σημαντικές καθυστερήσεις κατά την διάρκεια κατασκευής τους [181] (ιδίως όσον αφορά τους πυρηνικούς σταθμούς). Οι αβεβαιότητες σχετικά με το κόστος και την μη αντιστρεψιμότητα των επενδύσεων τείνουν να οδηγήσουν τους επενδυτές προς ευέλικτες τεχνολογίες παραγωγής ηλεκτρισμού μικρής κλίμακας με βραχυπρόθεσμη απόσβεση της αρχικής επένδυσης και σύντομο χρόνο κατασκευής (π.χ. σταθμοί φυσικού αερίου, ανεμογεννήτριες). Από την άλλη πλευρά, οι οικονομίες κλίμακας ενθαρρύνουν τους επενδυτές να αναπτύξουν μεγάλης κλίμακας εγκαταστάσεις

ηλεκτρικής ενέργειας (πυρηνικά, σταθμοί άνθρακα), οι οποίες συνήθως είναι οι καταλληλότερες για την κάλυψη το φορτίου βάσης.

Τα τελευταία χρόνια, πολύπλοκα μοντέλα έχουν κατασκευαστεί για να διερευνήσουν τη βέλτιστη κατανομή των επενδύσεων σε παραγωγική ισχύ και να αξιολογήσουν εναλλακτικά χαρτοφυλάκια τεχνολογιών ηλεκτροπαραγωγής. Υπάρχει επίσης ένας αριθμός μοντέλων που ενσωματώνουν πιο λεπτομερή αναπαράσταση της λειτουργίας του εργοστασίου και ανταγωνιστική λειτουργία της αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας. Ένας βασικός περιορισμός των μοντέλων και των προσεγγίσεων αυτών είναι ότι οι τεχνικές που εφαρμόζονται είναι αιτιοκρατικές και συνεπώς βασίζονται σε ένα πλήθος ντετερμινιστικών υποθέσεων σχετικά με την μελλοντική εξέλιξη εγγενώς αβέβαιων παραγόντων και μεταβλητών (π.χ. κόστος κεφαλαίου των τεχνολογιών, μελλοντικές τιμές καυσίμων, μέγεθος και προφίλ της μελλοντικής ζήτησης, κλιματικές πολιτικές). Το ολοένα αυξανόμενο διεθνές εμπόριο του φυσικού αερίου και του άνθρακα οδηγεί σε μεγαλύτερη αστάθεια και αβεβαιότητα για τις μελλοντικές τιμές των ορυκτών καυσίμων και της ηλεκτρικής ενέργειας σε πολλές χώρες και ιδιαίτερα σε εισαγωγείς ενέργειας, όπως η Ευρωπαϊκή Ένωση [38].

Την περίοδο μετά το 2000, η ένταση των πολιτικών για το κλίμα έχει αναδειχθεί ως ένας καινούργιος και εξαιρετικά αβέβαιος παράγοντας για τις επενδύσεις στον τομέα της ηλεκτροπαραγωγής. Οι προσπάθειες της Ευρώπης (και άλλων περιοχών) για την αντιμετώπιση της κλιματικής αλλαγής βασίζονται κατά κύριο λόγο στην καθιέρωση του φόρου στις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα (π.χ. σύστημα ETS για τις Ευρωπαϊκές βιομηχανίες), ο οποίος προσθέτει επιπλέον κόστος και συνεπώς μειώνει την ανταγωνιστικότητα των εργοστασίων ηλεκτροπαραγωγής που λειτουργούν με ορυκτά καύσιμα. Οι αβεβαιότητες σχετικά με την ένταση των κλιματικών πολιτικών (και συνεπώς του φόρου άνθρακα) συχνά αναγνωρίζονται ως σημαντικό εμπόδιο για τις επενδύσεις ηλεκτροπαραγωγής [183].

Πολλά συμβατικά εργαλεία υποστήριξης αποφάσεων και σχεδιασμού των επενδύσεων βασίζονται σε ντετερμινιστικές τεχνικές βελτιστοποίησης με σκοπό τον καθορισμό του βέλτιστου μίγματος σταθμών παραγωγής (ελαχιστοποίηση κόστους) για την προβλεπόμενη μελλοντική ζήτηση ηλεκτρισμού. Στην απλούστερη μορφή τους, αυτές οι προσεγγίσεις αναπαριστούν διαφορετικές επιλογές εργοστασίων παραγωγής ηλεκτρισμού σύμφωνα με το εκτιμώμενο ετησιοποιημένο κόστος κεφαλαίου και λειτουργίας/συντήρησης, και στη συνέχεια «ταιριάζουν» τις τεχνολογίες με την αναμενόμενη μελλοντική καμπύλη διάρκειας φορτίου [182]. Άλλες προσεγγίσεις εφαρμόζουν μεθοδολογία προεξοφλημένων ταμειακών ροών για την εκτίμηση του συνολικού κόστους παραγωγής κάθε ανταγωνιστικής τεχνολογίας. Οι κύριες μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για την αξιολόγηση επενδύσεων είναι (παρουσιάζονται αναλυτικά στο [180]):

- Καθαρή Παρούσα Αξία (*Net Present Value*)
- Εσωτερικός Βαθμός Απόδοσης (*Internal Rate of Return*)
- Λόγος οφέλους-κόστους και Συνολικός Βαθμός Απόδοσης (*Benefit-Cost Ratio*)

- Χρόνος ανάκτησης κεφαλαίου της αρχικής επένδυσης (*Payback period*)

Η αξιολόγηση των επενδύσεων στην ηλεκτροπαραγωγή γίνεται συνήθως με την κατασκευή εναλλακτικών σεναρίων ή την εκτέλεση ανάλυσης ευαισθησίας, όπου οι αβέβαιες τιμές για μια σειρά παραμέτρων (π.χ. κλιματικές πολιτικές, τιμές καυσίμων, κόστος των τεχνολογιών) μεταβάλλονται συστηματικά προκειμένου να διερευνηθεί το φάσμα των πιθανών αποτελεσμάτων. Αυτές οι τεχνικές έχουν σημαντική προστιθέμενη αξία για την διαδικασία λήψης επενδυτικών αποφάσεων, ωστόσο υπάρχουν σημαντικές προκλήσεις για την κατάλληλη ενσωμάτωση της αβεβαιότητας στον σχεδιασμό και την αξιολόγηση των επενδύσεων. Ένα βασικό ζήτημα είναι ότι κρίσιμοι παράγοντες της αβεβαιότητας όπως οι τιμές των καυσίμων, η τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας, οι κλιματικές πολιτικές και τα κόστη των τεχνολογιών δεν είναι μόνο εξαιρετικά αβέβαιοι (έχουν μεγάλες διακυμάνσεις), αλλά συσχετίζονται μεταξύ τους. Για παράδειγμα, οι υψηλοί φόροι στις εκπομπές άνθρακα είναι πιθανό να αυξήσουν τη χρήση του φυσικού αερίου που έχει χαμηλότερο συντελεστή εκπομπών σε σύγκριση με την καύση άνθρακα [184], ενώ παράλληλα τείνουν να αυξήσουν την ελκυστικότητα επενδύσεων σε τεχνολογίες μηδενικών εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα (π.χ. ΑΠΕ, πυρηνική ενέργεια). Αυτό προκαλεί αύξηση της τιμής της ηλεκτρικής ενέργειας και μείωση της ζήτησης λόγω της ελαστικότητας της ζήτησης ηλεκτρισμού ως προς την τιμή [185]. Ένα άλλο σημαντικό θέμα είναι η ικανότητα των μοντέλων για καλύτερη ανάλυση της ισορροπίας μεταξύ του αναμενόμενου κόστους του χαρτοφυλακίου των τεχνολογιών παραγωγής και των σχετικών αβεβαιοτήτων και κινδύνων [181].

Για τους παραπάνω λόγους, τα τελευταία χρόνια έχουν αναπτυχθεί στοχαστικά εργαλεία ανάλυσης επενδύσεων τα οποία χρησιμοποιούνται για την αξιολόγηση των επενδύσεων υπό συνθήκες αβεβαιότητας. Η πρώτη μέθοδος που έχει αναπτυχθεί είναι η μέθοδος των επενδυτικών δικαιωμάτων προαίρεσης (*Real Options Approach*) η οποία αποτελεί ουσιαστικά μια προέκταση της ανάλυσης με βάση την Καθαρή Παρούσα Αξία και ενσωματώνει ρητά τις αβεβαιότητες στον υπολογισμό των ταμειακών ροών λαμβάνοντας υπόψη την ευελιξία τροποποίησης των επενδυτικών αποφάσεων όταν μεταβάλλονται οι συνθήκες της αγοράς [183]. Τυπικά η μέθοδος ROA δεν υποθέτει σταθερό χρόνο πραγματοποίησης της επένδυσης και τοποθετεί μια αξία στην καθυστέρηση της απόφασης για επένδυση μέχρι οι συγκεκριμένες αβεβαιότητες να επιλυθούν ή μια αξία διατήρησης της επιλογής έναρξης των επενδύσεων οι οποίες θα είχαν απορριφθεί με βάση την Καθαρή Παρούσα Αξία [186]. Η συγκεκριμένη μέθοδος έχει χρησιμοποιηθεί ευρέως για την αξιολόγηση επενδύσεων σε ΑΠΕ, πυρηνικούς σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής [187] και σε εργοστάσια ενσωματωμένης αεριοποίησης άνθρακα. Παρά την χρησιμότητά της, η μέθοδος ROA συνήθως επικεντρώνεται σε μεμονωμένες επενδύσεις ή στην σύγκριση εναλλακτικών τεχνολογιών.

Η στοχαστική ανάλυση με την μέθοδο *Monte Carlo* αναγνωρίζεται ως μια από τις πλέον ολοκληρωμένες και ευέλικτες μεθοδολογίες για ανάλυση προβλημάτων που αφορούν πολλαπλές και ενδεχομένως αλληλεπιδρούντες αβεβαιότητες [188, 189]. Οι μέθοδοι *Monte Carlo* ποσοτικοποιούν την αβεβαιότητα προσδιορίζοντας τις κατανομές πιθανοτήτων για τις αβέβαιες παραμέτρους εισόδου, οι οποίες καθορίζονται από τα

ιστορικά δεδομένα, την βιβλιογραφία ή από την κρίση εμπειρογνομόνων. Σε αυτήν την μέθοδο μπορεί να χρησιμοποιηθεί οποιαδήποτε μορφή κατανομών πιθανότητας, ενώ η συνδιακύμανσή τους λαμβάνεται υπόψη. Στη συνέχεια πραγματοποιείται ένας μεγάλος αριθμός προσομοιώσεων/πειραμάτων έτσι ώστε να καθοριστεί η κατανομή των αποτελεσμάτων που παρέχει το πλήρες φάσμα των πιθανών τιμών των ενδογενών μεταβλητών. Τα στατιστικά χαρακτηριστικά του μέσου και της τυπικής απόκλισης (μαζί με τον συντελεστή συσχέτισης) χρησιμοποιούνται συνήθως για τη μέτρηση του προφίλ του προσδοκώμενου κόστους και της αβεβαιότητας για τις ενδογενείς μεταβλητές. Η τυπική απόκλιση αποτελεί την πιο ευρέως χρησιμοποιούμενη μέθοδο για τη μέτρηση της αβεβαιότητας, καθώς είναι ένα μέτρο της στατιστικής διασποράς που δείχνει το μέγεθος της εξάπλωσης των τιμών στο σύνολο των δεδομένων [181].

5.2 Ενσωμάτωση της αβεβαιότητας στην λήψη αποφάσεων

Τα ντετερμινιστικά μοντέλα συνήθως βελτιστοποιούν μια αντικειμενική συνάρτηση (ευημερία, πλεόνασμα παραγωγού ή/και καταναλωτή) ή ελαχιστοποιούν την συνάρτηση συνολικού κόστους (π.χ. του ενεργειακού συστήματος, της απώλειας ΑΕΠ κλπ.). Η λήψη αποφάσεων σε αυτά τα μοντέλα βασίζεται σε διάφορα κριτήρια όπως η Καθαρή Παρούσα Αξία, ο Βαθμός Απόδοσης και ο χρόνος ανάκτησης του αρχικού κεφαλαίου της επένδυσης (ενότητα 5.1), ενώ η μέθοδος των Real Options (η οποία αποτελεί ουσιαστικά γενίκευση της ΚΠΑ) μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί με έμφαση κυρίως στην αποφυγή των κινδύνων (risk hedging).

Από την στιγμή που κατασκευάστηκε το στοχαστικό μοντέλο με βάση είτε την μέθοδο διάδοσης της αβεβαιότητας, όπως ο PROMHΘΕΑΣ, είτε με την μεθοδολογία της διαδοχικής λήψης αποφάσεων υπό συνθήκες αβεβαιότητας [9], πιθανοτικές εκτιμήσεις μπορούν να πραγματοποιηθούν με την ενσωμάτωση της αβεβαιότητας στην λήψη των αποφάσεων. Η πλέον διαδεδομένη μέθοδος στα μεγάλης κλίμακας μοντέλα ενέργειας-οικονομίας [77-81] αποτελεί η διάδοση της αβεβαιότητας, με βάση την οποία τυχαίες τιμές των παραμέτρων εισόδου δειγματοληπτούνται από κατανομές πιθανοτήτων (Monte Carlo ή Latin Hypercube Sampling) και στη συνέχεια το μοντέλο επιλύεται ντετερμινιστικά για κάθε τιμή των παραμέτρων, ενώ τα αποτελέσματα των πειραμάτων μπορούν να αναλυθούν στατιστικά. Από την άλλη πλευρά, οι Kanudia-Loulou [212] παρουσίασαν μια έκδοση του μοντέλου MARKAL η οποία ενσωματώνει την διαδοχική λήψη αποφάσεων με στοχαστικό προγραμματισμό και περιλαμβάνει τόσες επαναλήψεις του MARKAL όσες και ο αριθμός των σεναρίων που αναλύονται. Η βελτιστοποίηση πραγματοποιείται με ελαχιστοποίηση του μέσου κόστους σε όλα τα σεναρία το οποίο ισούται με το σταθμισμένο άθροισμα των συναρτήσεων κόστους των σεναρίων με βάση την πιθανότητα πραγματοποίησης κάθε σεναρίου και δεδομένου ότι τα σεναρία είναι ανεξάρτητα μεταξύ τους. Σύμφωνα με τον γενικό κανόνα [9], τα μοντέλα διαδοχικής λήψης απόφασης υπό αβεβαιότητα λαμβάνουν αποφάσεις σε περισσότερα από ένα μελλοντικά σημεία με βάση την μεγιστοποίηση του αθροίσματος της μέσης ευημερίας (με συντελεστή προεξόφλησης) των καταναλωτών σε κάθε χρονική περίοδο. Οι Birge και Rosa [213] ενσωμάτωσαν την αβεβαιότητα για το

ποσοστό απόδοσης των επενδύσεων σε ενεργειακές τεχνολογίες στο μοντέλο Global 2100 με σκοπό την μεγιστοποίηση της αναμενόμενης τιμής της συνάρτησης ευημερίας.

Τα μοντέλα στοχαστικού προγραμματισμού χρησιμοποιούν την έννοια του δέντρου σεναρίων για την αναπαράσταση αβέβαιων πληροφοριών (Wallace και Fleten [214]). Η πρόκληση είναι ότι το μέγεθος ενός δέντρου σεναρίων μεγαλώνει εκθετικά με τον αριθμό των χρονικών περιόδων απαιτώντας περιορισμένα σενάρια και χρονικά διαστήματα. Εναλλακτικές μέθοδοι μείωσης της πολυπλοκότητας έχουν προταθεί (η ανάλυσή τους ξεφεύγει από τα πλαίσια της διατριβής). Ένας ακόμη περιορισμός στην χρήση στοχαστικού προγραμματισμού είναι ότι τα τυχαία σενάρια δεν εξαρτώνται από την αλληλουχία των αποφάσεων. Ο στοχαστικός προγραμματισμός απαιτεί πρόωρη δημιουργία των σεναρίων και αυτό περιορίζει την ικανότητά του να συλλάβει την αλληλεπίδραση μεταξύ των αποφάσεων και εξωγενών γεγονότων

Σε αρκετές περιπτώσεις, το κριτήριο της μέσης τιμής δεν δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα, ιδιαίτερα στην περίπτωση του τομέα της ενέργειας με εκτεταμένες πολιτικές, οικονομικές και τεχνολογικές αβεβαιότητες και αμετάκλητες επενδύσεις μεγάλης κλίμακας (irreversible). Σε αυτές τις περιπτώσεις, εναλλακτικά κριτήρια μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να αναπαραστήσουν με μεγαλύτερη ακρίβεια την διαδικασία λήψης απόφασης με αβεβαιότητα και την συμπεριφορά των επενδυτών που χαρακτηρίζεται από αποστροφή στο ρίσκο (risk averse). Το μοντέλο TIMES έχει χρησιμοποιήσει το κριτήριο της μεγιστοποίησης της συνάρτησης χρησιμότητας που αποτελείται από γραμμικό συνδυασμό του μέσου πλεονάσματος μείον μια ποσότητα που αντιπροσωπεύει το ρίσκο [51] και το κριτήριο Minimax regret [81] με το οποίο αποφεύγονται οι μη βέλτιστες επιλογές (για τις οποίες ο επενδυτής «μετανιώνει»). Αν θεωρήσω $C_{z,s}$ το κόστος όταν επιλέγεται η στρατηγική z και έρχεται το αποτέλεσμα s , τότε η επιλογή regret ορίζεται ως η διαφορά του κόστους που συνεπάγεται το (z,s) σε σύγκριση με το ελάχιστο κόστος που επιτυγχάνεται με τέλεια πληροφόρηση για z :

$R_{z,s} = C_{z,s} - \text{Min}_{t \in S} C_{z,s} \geq 0$ (1) για κάθε $z \in Z$ (σύνολο πιθανών εκβάσεων) και $s \in S$ (σύνολο εφικτών στρατηγικών). Συνεπώς, μια στρατηγική Minimax regret είναι κάθε στρατηγική s^* η οποία ελαχιστοποιεί το χειρότερο $R_{z,s}$. Δηλαδή,

$$MMR = \text{Min}_{s \in S} \{ \text{Max}_{z \in Z} C_{z,s} \} \quad (2)$$

Στην μελέτη [81], οι Loulou και Kanudia χρησιμοποίησαν το κριτήριο Minimax regret (MMR) σε ένα μεγάλης κλίμακας μοντέλο ενέργειας-οικονομίας, το οποίο ελαχιστοποιεί το αναμενόμενο προεξοφλημένο κόστος του ενεργειακού συστήματος και βασίζεται σε στοχαστικό προγραμματισμό πολλών σταδίων με την πιθανότητα πραγματοποίησής τους να ορίζεται. Η μέθοδος Minimax συγκρίνεται με την μέθοδο ελάχιστου μέσου κόστους (MEV) και έχει σημαντικά πλεονεκτήματα, καθώς η μέθοδος MMR δεν απαιτεί την ανάθεση πιθανοτήτων σε εναλλακτικά αποτελέσματα, ενώ το κόστος που υπολογίζεται με την MMR είναι πιο «ισχυρά-robust» σε σύγκριση με την μέθοδο MEV. Επιπλέον, η ανάλυση έδειξε ότι οι στρατηγικές μείωσης του κινδύνου μπορεί να βρίσκονται εκτός της λύσης με τέλεια πληροφόρηση και άρα η αβεβαιότητα δεν μπορεί να μοντελοποιηθεί μέσω απλής ανάλυσης σεναρίων.

Άλλες μελέτες έχουν χρησιμοποιήσει ως κριτήριο για επιλογή των βέλτιστων επενδύσεων την ελαχιστοποίηση της αβεβαιότητας/ρίσκου, η οποία συνήθως έγκειται στην ελαχιστοποίηση της τυπικής απόκλισης της κατανομής του ποσοστού απόδοσης από τον μέσο. Για την μελέτη των επενδύσεων στην ηλεκτροπαραγωγή υπό συνθήκες αβεβαιότητας, διάλεξα το κριτήριο της ελαχιστοποίησης της πιθανότητας αποτυχίας, δηλαδή της πιθανότητας το ποσοστό απόδοσης της επένδυσης να ξεπεράσει έναν συγκεκριμένο στόχο. Με αυτόν τον τρόπο, εκμεταλλεύομαι πλήρως τις κατανομές πιθανοτήτων του ΠΡΟΜΗΘΕΑ που περιέχουν το συνολικό αθροιστικό αποτέλεσμα όλων των αβεβαιοτήτων για την εξέλιξη του παγκόσμιου ενεργειακού συστήματος. Το υπόδειγμα που προτείνεται δίνει ξεκάθαρη έμφαση στην αποφυγή των κινδύνων (risk hedging) υιοθετώντας μια συμπεριφορά αποστροφής του κινδύνου για τους επενδυτές (risk aversion). Το υπόδειγμα αναλύεται εκτενώς στις ενότητες 5.3 και 5.4 και εμπεριέχει πολλαπλούς στόχους και αξιολόγηση του ρίσκου των εναλλακτικών επενδύσεων και παίρνει τη μορφή πολυκριτηριακού μη γραμμικού προβλήματος, όπου μεγιστοποιείται η πιθανότητα ότι ο κύριος στόχος ξεπερνά ένα επιθυμητό όριο (τιμή κατωφλίου) με την προϋπόθεση ότι οι υπόλοιποι στόχοι ικανοποιούνται ως περιορισμοί είτε ντετερμινιστικοί (προσδοκώμενη απόδοση) είτε πιθανοτικοί (δηλαδή οι πιθανότητες ότι οι υπόλοιποι στόχοι ξεπερνούν ένα δεδομένο κατώφλι είναι μεγαλύτερες από κάποιο επιθυμητό επίπεδο).

5.3 Μεθοδολογία

Οι τεχνικές Monte Carlo έχουν χρησιμοποιηθεί εκτενώς σε μια σειρά μελετών και αναλύσεων για την αξιολόγηση του κινδύνου των επενδύσεων στην παραγωγή ηλεκτρισμού που προκύπτει από αβεβαιότητες σχετικά με τις τιμές των καυσίμων, τις κλιματικές πολιτικές και τα κόστη επένδυσης των εναλλακτικών τεχνολογιών. Ενώ κάποιες μελέτες βασίζονται σε ανάλυση επενδύσεων σε μεμονωμένες τεχνολογίες [187], η μεθοδολογία που προτείνεται στην διατριβή βασίζεται σε αξιολόγηση χαρτοφυλακίων ηλεκτροπαραγωγής που αποτελούνται από εναλλακτικές τεχνολογίες, σε αντιστοιχία με την [189]. Παρά το μεγάλο πλήθος εφαρμογών την μεθόδου Monte Carlo, ορισμένα από τα προβλήματα τους είναι:

- Η ανάλυση μεμονωμένων τεχνολογιών δεν αναγνωρίζει την αξία του συνδυασμού εναλλακτικών επιλογών ηλεκτροπαραγωγής στο ευρύτερο πλαίσιο και συνεπώς μπορεί να οδηγήσει σε μη οικονομικά αποδοτικά αποτελέσματα [190]
- Η διακύμανση και η συνδιακύμανση των παραμέτρων εισόδου εισάγονται συνήθως με βάση την υποκειμενική κρίση και δεν βασίζονται σε οικονομετρικές εκτιμήσεις ή αποτελέσματα μοντέλων [181]
- Σημαντικοί παράγοντες για την εξέλιξη του συστήματος ηλεκτροπαραγωγής και της αβεβαιότητας που το περιβάλλει συχνά παραλείπονται από την ανάλυση

Το στοχαστικό μοντέλο ΠΡΟΜΗΘΕΑΣ από την άλλη πλευρά αναπαριστά ενδογενώς πολλαπλές αβεβαιότητες που συνδέονται με επενδύσεις σε σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, οι οποίες αλληλοεπιδρούν μεταξύ τους και ως εκ

τούτου η προτεινόμενη στοχαστική ανάλυση μπορεί να προσφέρει μια νέα διάσταση στην ποσοτική αξιολόγηση και καθορισμό του βέλτιστου χαρτοφυλακίου τεχνολογιών ηλεκτροπαραγωγής. Ιδιαίτερα στον συγκεκριμένο τομέα, ο οποίος συνήθως απαιτεί μεγάλου μεγέθους επενδύσεις σε σταθμούς και υποδομές, ο κίνδυνος είναι ιδιαίτερα υψηλός εξαιτίας μη αντιστρεψιμότητας των επενδύσεων (*irreversible investments*). Τα σημερινά μοντέλα (ανεξάρτητα από τον σκοπό τους) βασικά υποθέτουν ότι οι παράγοντες (*agents*) του προβλήματος:

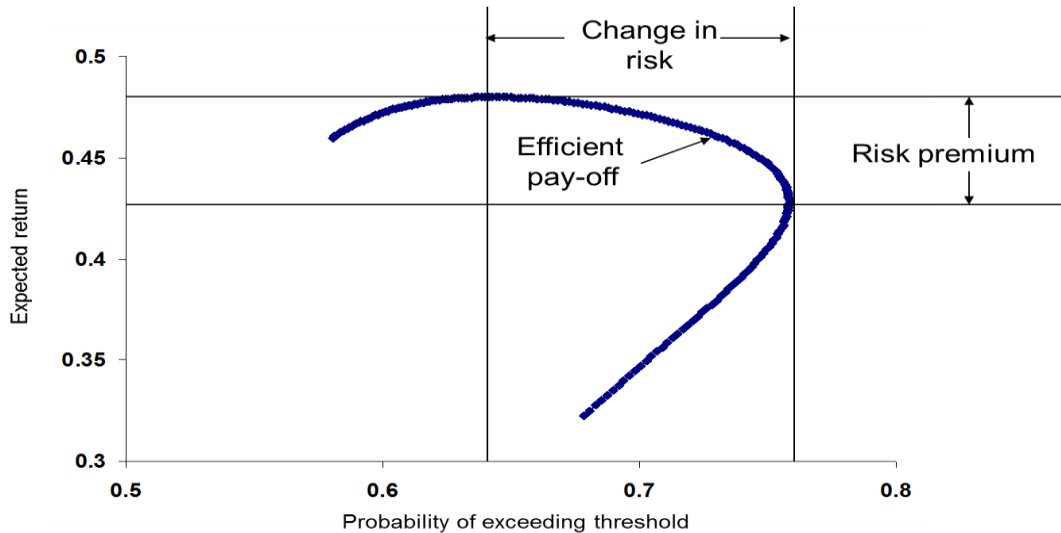
- Έχουν απλούς και ξεκάθαρους στόχους (π.χ. ελαχιστοποίηση του κόστους, μεγιστοποίηση του κέρδους ή της χρησιμότητας)
- Δρύνε σε απομόνωση από το υπόλοιπο ενεργειακό και οικονομικό σύστημα
- Έχουν πλήρη γνώση των παραμέτρων των αποφάσεων και μόνο περιστασιακά ενσωματώνουν την αβεβαιότητα προσθέτοντας ασφάλιστρα κινδύνου (*risk premium*) σε συγκεκριμένες τεχνολογίες κατά την διαδικασία λήψης απόφασης

Από την άλλη πλευρά, οι έννοιες της αβεβαιότητας και του κινδύνου είναι στρατηγικά σημαντικές στην διαδικασία λήψης επενδυτικών αποφάσεων, καθώς σε όλες τις περιπτώσεις οι παράγοντες του συστήματος λειτουργούν υπό αβεβαιότητα για τις μελλοντικές συνθήκες της αγοράς, τις πολιτικές και τα κόστη. Η αβεβαιότητα αντικατοπτρίζεται σε μεγάλο βαθμό στις αποφάσεις των παραγόντων του ενεργειακού συστήματος. Γενικά, υπάρχουν δυο βασικές διαμορφώσεις για την ενσωμάτωση της έννοιας του κινδύνου στην ανάλυση αποφάσεων.

- Μεγιστοποίηση του προσδοκώμενου κέρδους υπό την προϋπόθεση ότι ικανοποιείται ένας στοχαστικός περιορισμός (π.χ. η πιθανότητα μη απόσβεσης της αρχικής επένδυσης να είναι μικρότερη από 10%). Αυτή η μέθοδος τοποθετεί την έμφαση στο προσδοκώμενο μέσο κέρδος, ενώ υπάρχουν δυσκολίες στην θέσπιση του περιορισμού της αβεβαιότητας (δηλαδή ποια πιθανότητα πρέπει να τεθεί ως άνω όριο/κατώφλι ανοχής)
- Μεγιστοποίηση της πιθανότητας το κέρδος ή το ποσοστό απόδοσης της αρχικής επένδυσης να ξεπεράσει μια τιμή κατωφλίου (*threshold*), η οποία μπορεί να είναι στοχαστική. Η έμφαση δίδεται στην ελαχιστοποίηση του κινδύνου, η οποία γενικά υποεκτιμάται σαν παράγοντας της οικονομικής συμπεριφοράς. Οι τιμές κατωφλίου μπορούν να ορισθούν διαισθητικά (π.χ. με βάση το προεξοφλητικό επιτόκιο ή το ποσοστό απόδοσης της επένδυσης). Συνεπώς, η μεθοδολογία της ελαχιστοποίησης του κινδύνου προτιμάται στη παρούσα ανάλυση.

Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζεται μια γραφική αναπαράσταση της σημασίας της έννοιας του κινδύνου στην λήψη επενδυτικών αποφάσεων υπό την μορφή αναπαράστασης *pay-off* μεταξύ της προσδοκίας (αναμενόμενη μέση τιμή) και της πιθανότητας να υπερβεί την τιμή κατωφλίου. Το σχήμα παρουσιάζει την καμπύλη αποδοτικότητας *pay-off*, η οποία προσομοιάζει μια υποθετική κατάσταση στην οποία καθώς η μέση απόδοση μειώνεται, η πιθανότητα ότι η κατανομή της απόδοσης θα ξεπεράσει την τιμή κατωφλίου αυξάνεται. Αυτή αποτελεί μια ιδιαίτερα συνηθισμένη περίπτωση κατά την οποία οι μεγαλύτερες προσδοκώμενες αποδόσεις συνδέονται με

μεγαλύτερες πιθανότητες αποτυχίας. Οι επενδυτές έχουν ως στόχο τόσο τα υψηλότερα προσδοκώμενα μέσα κέρδη όσο και την ελαχιστοποίηση της πιθανότητας αποτυχίας και συνεπώς η εύρεση της βέλτιστης ισορροπίας μεταξύ των δύο στόχων γίνεται συνήθως με τις καμπύλες pay-off.



Γράφημα 5-1: Γραφική αναπαράσταση καμπυλών pay-off με βάση την μέση απόδοση και τον κίνδυνο (υποθετικά δεδομένα για να καταδείξει την σημασία του ρίσκου στην λήψη αποφάσεων).

5.4 Στοχαστικά ποσοστά απόδοσης των επενδύσεων

Στην παρούσα ενότητα εξετάζεται μια εντελώς υποθετική κατάσταση όπου το 2030 πρέπει να ληφθεί μια απόφαση για την επιλογή των τεχνολογιών που θα καλύψουν την αύξηση της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας (φορτίο βάσης-7.000 ώρες ετησίως) στην περιοχή της Ευρωπαϊκής Ένωσης. Η επενδυτική απόφαση εξαρτάται από τον κίνδυνο να μην καλυφθεί ένα συγκεκριμένο ποσοστό απόδοσης της αρχικής κεφαλαιουχικής επένδυσης [84]. Οι τεχνολογίες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας που θεωρούνται στην ανάλυση είναι:

1. Πυρηνικός σταθμός τρίτης γενιάς με χρήση αντιδραστήρα πεπιεσμένου ύδατος
2. Σταθμός φυσικού αερίου συνδυασμένου κύκλου
3. Ανεμογεννήτρια σε συνδυασμό με φυσικό αέριο συνδυασμένου κύκλου προκειμένου να εξασφαλισθεί η απαραίτητη διαθεσιμότητα ισχύος
4. Σταθμός φυσικού αερίου συνδυασμένου κύκλου με τεχνολογία CCS
5. Ανεμογεννήτρια σε συνδυασμό με φυσικό αέριο συνδυασμένου κύκλου CCS

Το ποσοστό απόδοσης της επένδυσης υπολογίζεται μέσω της σχέσης μεταξύ των μελλοντικών εσόδων (ετήσιες χρηματικές ροές) και των αρχικών κεφαλαιουχικών δαπανών με βάση τα στοχαστικά αποτελέσματα του ΠΡΟΜΗΘΕΑ. Τα ετήσια έσοδα για την τεχνολογία j υπολογίζονται από την εξίσωση 1:

$$rev_j = hours * capfact_j \left(elcprice - vom_j - \frac{(fprice_j + CV * emfac_j)}{eff_j} - cdist \right) - fc_j \quad (3)$$

Στην παραπάνω εξίσωση, η παράμετρος *hours* συμβολίζει τις απαιτούμενες ώρες λειτουργίας του σταθμού ηλεκτροπαραγωγής (δηλαδή 7000 στην συγκεκριμένη περίπτωση), η *capfact_j* αναπαριστά τον συντελεστή ισχύος-διαθεσιμότητα της τεχνολογίας *j* (ο οποίος είναι στοχαστικός και προέρχεται από τα αποτελέσματα του ΠΡΟΜΗΘΕΑ), ενώ η μεταβλητή *elcprice* είναι η τιμή πώλησης χονδρικής της ηλεκτρικής ενέργειας για την κάλυψη του βιομηχανικού φορτίου βάσης (επίσης στοχαστική και εξαρτώμενη από τα μελλοντικά κόστη παραγωγής των τεχνολογιών). Οι παράμετροι *vom_j* και *eff_j* συμβολίζουν τα μεταβλητά κόστη λειτουργίας και συντήρησης (O&M) και την τεχνική απόδοση αντίστοιχα (επίσης στοχαστικά και προέρχονται από το μοντέλο τεχνολογικής προόδου του ΠΡΟΜΗΘΕΑ), η *fprice_j* αντιπροσωπεύει την τιμή των καυσίμων για τον τομέα της ηλεκτροπαραγωγής (στοχαστική και προερχόμενη από τον μηχανισμό διαμόρφωσης των τιμών), η παράμετρος *CV* είναι η στοχαστική τιμή άνθρακα (μέτρο έντασης κλιματικής πολιτικής) που προέρχεται από τις υποθέσεις σχετικά με τις μελλοντικές κλιματικές πολιτικές, *emfac_j* είναι ο ντετερμινιστικός συντελεστής εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα (διαφορετικός ανά καύσιμο), *cdist* συμβολίζει το κόστος μεταφοράς και διανομής της ηλεκτρικής ενέργειας στους βιομηχανικούς καταναλωτές (το οποίο είναι κοινό για όλες τις τεχνολογίες και άρα δεν επηρεάζει την απόφαση επένδυσης) και τέλος η μεταβλητή *fc_j* αντιπροσωπεύει τα στοχαστικά σταθερά κόστη O&M (που αντλούνται από το μοντέλο τεχνικής προόδου). Το ποσό των αρχικών επενδύσεων δίνεται από την εξίσωση (4).

$$cc_j = ovcc2030_j * \left[\frac{ctime_j * ir * (1+ir)^{ctime_j}}{(1+ir)^{ctime_j-1}} + decshare_j * e^{-(ir+0.04)*lft_j} \right] \quad (4)$$

Όπου η μεταβλητή *ovcc2030_j* αναπαριστά το αρχικό κόστος της επένδυσης το 2030 (στοχαστικό και προέρχεται από τις καμπύλες τεχνολογικής εκμάθησης του ΠΡΟΜΗΘΕΑ), το *decshare_j* είναι η παράμετρος με την οποία υπολογίζονται τα κόστη παροπλισμού των τεχνολογιών παραγωγής ηλεκτρισμού, *ctime_j* είναι η στοχαστική διάρκεια κατασκευής του σταθμού, *lft_j* είναι η οικονομική διάρκεια ζωής της τεχνολογίας *j* ενώ η παράμετρος *ir* αντιπροσωπεύει το στοχαστικό μακροχρόνιο επιτόκιο, το οποίο προέρχεται από την ανάλυση με το μοντέλο της οικονομικής δραστηριότητας του ΠΡΟΜΗΘΕΑ.

Χρησιμοποιώντας τα στοχαστικά αποτελέσματα του μοντέλου, μπορεί να υπολογιστεί η κατανομή του ποσοστού απόδοσης της επένδυσης για συγκεκριμένες τεχνολογίες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Η παρακάτω ανάλυση λαμβάνει υπόψη τις συστημικές επιπτώσεις στο σύνολο του ενεργειακού συστήματος, ενώ οι κατανομές και οι συσχετίσεις μεταξύ των μεταβλητών που χρησιμοποιούνται καθορίζονται από το συνολικό πλαίσιο ενεργειακής αναπαράστασης του ΠΡΟΜΗΘΕΑ και όχι από υποκειμενικές εκτιμήσεις και εικασίες ("guess estimates"), όπως και στις περισσότερες μελέτες που ασχολούνται με το συγκεκριμένο θέμα [181].

Παράγοντες	Κατανομή των παραμέτρων
Κεφαλαιουχικό κόστος	Από την στοχαστική ανάλυση του μοντέλου
Φόρος στις εκπομπές άνθρακα	Δικόρυφη με υποκειμενικές πιθανοτικές εκτιμήσεις
Χρόνος κατασκευής	Κανονική (η μέση τιμή προκύπτει από βιβλιογραφία)
Τιμή πώλησης ηλεκτρισμού	Από την στοχαστική ανάλυση του μοντέλου
Κόστος λειτουργίας	Από την στοχαστική ανάλυση του μοντέλου
Απόδοση τεχνολογιών	Από την στοχαστική ανάλυση του μοντέλου
Κόστος διανομής ηλεκτρισμού	Αιτιοκρατικό (με βάση την βιβλιογραφία)

Πίνακας 5-1: Αβέβαιοι παράγοντες στο πρόβλημα ελαχιστοποίησης κινδύνου επενδύσεων σε τεχνολογίες ηλεκτροπαραγωγής

Ο πυρηνικός σταθμός ηλεκτροπαραγωγής είναι με διαφορά η επιλογή με την μεγαλύτερη ένταση κεφαλαίου από αυτές που θεωρούνται στην παρούσα ανάλυση. Η κατάσταση αυτή επιδεινώνεται εξαιτίας των μεγαλύτερων χρόνων κατασκευής (με μέσο όρο 7-8 έτη) και το υψηλό κόστος παροπλισμού. Αυτό οδηγεί σε σχετικά χαμηλό μέσο ποσοστό απόδοσης σε σύγκριση με τις υπόλοιπες τεχνολογίες. Από την άλλη πλευρά, το ποσοστό απόδοσης της πυρηνικής ενέργειας δεν υπόκειται στην αστάθεια των τιμών των καυσίμων ούτε στην αβεβαιότητα των πολιτικών για το κλίμα και συνεπώς η κατανομή του ποσοστού απόδοσης χαρακτηρίζεται από ιδιαίτερα χαμηλή τυπική απόκλιση (Πίνακας 5-2). Σχεδόν το αντίστροφο συμβαίνει για την τεχνολογία φυσικού αερίου συνδυασμένου κύκλου (GCC), η οποία έχει χαμηλό κεφαλαιουχικό κόστος και μικρή διάρκεια κατασκευής, αλλά χαρακτηρίζεται από μεγάλη έκθεση στις διακυμάνσεις των διεθνών τιμών του φυσικού αερίου και στην πιθανή επιβολή υψηλών φόρων άνθρακα. Συνεπώς, αυτή η τεχνολογική επιλογή έχει το υψηλότερο μέσο προσδοκώμενο ποσοστό απόδοσης, αλλά ταυτόχρονα ιδιαίτερα μεγάλη τυπική απόκλιση. Ο συνδυασμός του συνδυασμένου κύκλου με αιολικά συστήματα ξηράς συνεπάγεται μείωση του μέσου ποσοστού απόδοσης (από 10% σε 9% ετησίως) αλλά οδηγεί σε σημαντική μείωση της τυπικής απόκλισης (από 8.4% σε 5.9%). Η προσθήκη της τεχνολογίας CCS στον συνδυασμένο κύκλο αυξάνει σημαντικά τα κεφαλαιουχικά κόστη και συνεπώς τείνει να μειώσει το μέσο (και το διάμεσο) του ποσοστού απόδοσης, ενώ παράλληλα μειώνει τους κινδύνους που προέρχονται από τις κλιματικές πολιτικές και συνεπώς οδηγεί σε μείωση κοντά στο 50% της τυπικής απόκλισης σε σύγκριση με την τεχνολογία GCC. Επιπρόσθετες σημαντικές μειώσεις της μεταβλητότητας πραγματοποιούνται όταν συνδυαστεί η τεχνολογία CCS με την αιολική ενέργεια.

	Nuclear	Gas Combined Cycle (CC)	Wind + Gas CC	Gas CC with CCS	Wind + Gas CC with CCS
Μέσος	8.5	10.0	9.0	8.9	9.4
Διάμεσος	8.4	9.9	10.5	8.4	9.4
Τυπική απόκλιση	0.8	8.4	5.9	4.6	2.7

Πίνακας 5-2: Στατιστικά στοιχεία των ποσοστών απόδοσης των τεχνολογιών (σε %) όπως προκύπτουν από την στοχαστική ανάλυση του μοντέλου

Οι περιπτώσεις ιδιαίτερα υψηλών διεθνών τιμών φυσικού αερίου και υψηλών φόρων στο διοξείδιο του άνθρακα σχετίζονται στατιστικά με υψηλές τιμές ηλεκτρικής ενέργειας οι οποίες τείνουν να αυξήσουν το ποσοστό απόδοσης των σταθμών πυρηνικής ενέργειας. Κατά συνέπεια, υπάρχει σημαντική αρνητική συσχέτιση μεταξύ της κερδοφορίας των πυρηνικών σταθμών και της κερδοφορίας των επιλογών φυσικού αερίου συνδυασμένου κύκλου (Πίνακας 5-3). Οι κερδοφορίες του συνόλου των επιλογών που περιέχουν τεχνολογίες φυσικού αερίου συσχετίζονται θετικά σε μεγάλο βαθμό μεταξύ τους μέσω της κοινής τους εξάρτησης από την αβεβαιότητα του κεφαλαιουχικού κόστους και της απόδοσης της ίδιας της τεχνολογίας και της μεταβλητότητας των διεθνών τιμών του φυσικού αερίου. Η συσχέτιση είναι προφανώς ασθενέστερη στις περιπτώσεις όπου προστίθεται η τεχνολογία CCS, δεδομένου η τελευταία συνεπάγεται σημαντική μείωση της ευαισθησίας της κερδοφορίας σε σχέση με την μεταβλητότητα στην ένταση της κλιματικής πολιτικής.

	Nuclear	Gas Combined Cycle (CC)	Wind + Gas CC	Gas CC with CCS
Gas Combined Cycle	-0.35			
Wind + Gas combined cycle	-0.43	0.95		
Gas CC with CCS	-0.13	0.61	0.46	
Wind + Gas CC with CCS	-0.18	0.65	0.54	0.96

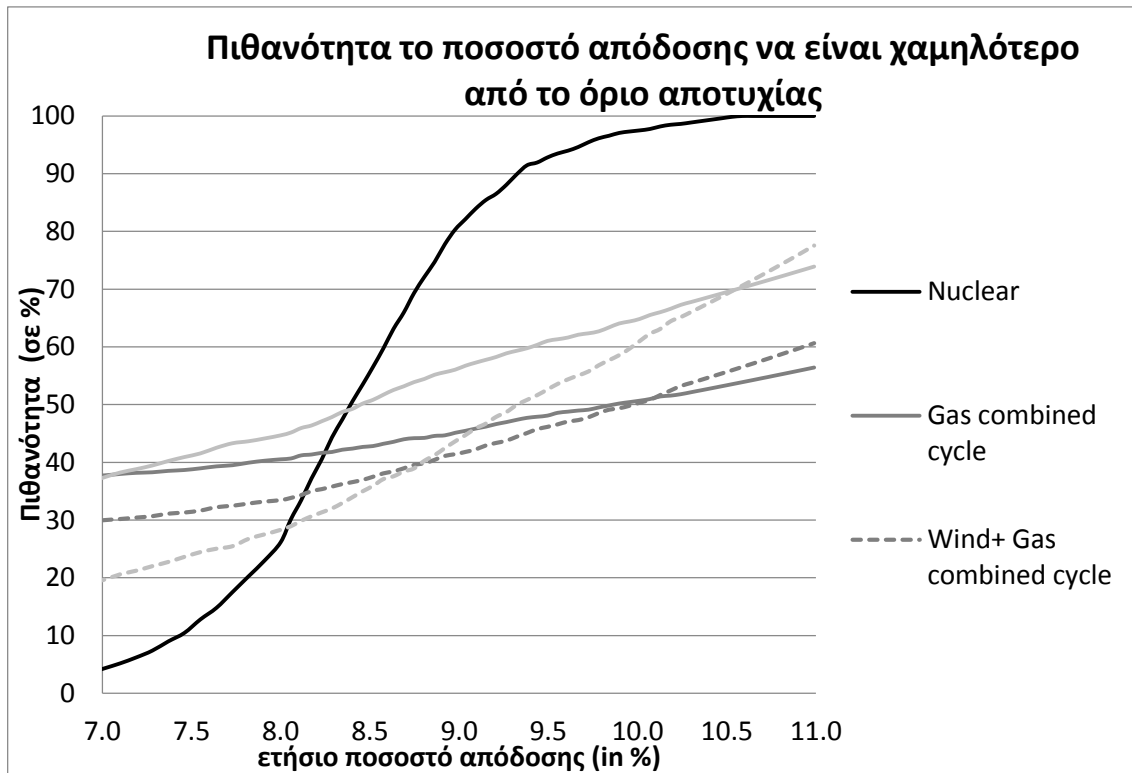
Πίνακας 5-3: Συσχετίσεις μεταξύ των ποσοστών απόδοσης των εναλλακτικών τεχνολογιών ηλεκτροπαραγωγής (όπως προκύπτουν από την στοχαστική ανάλυση του ΠΡΟΜΗΘΕΑ)

Οι βασικές πηγές αβεβαιότητας για το ποσοστό απόδοσης των τεχνολογιών είναι οι τιμές ηλεκτρικής ενέργειας για τους βιομηχανικούς καταναλωτές, οι τιμές διοξειδίου του άνθρακα (ως δείκτης της έντασης των κλιματικών πολιτικών), οι διεθνείς τιμές των καυσίμων, το κόστος της επένδυσης και η διάρκεια κατασκευής. Ο ΠΡΟΜΗΘΕΑΣ παρέχει ένα αναλυτικό και συνεκτικό πλαίσιο μοντελοποίησης και ολοκληρωμένης ανάλυσης για την ποσοτική αξιολόγηση εναλλακτικών μέτρων αβεβαιότητας, εκτός από την τυπική απόκλιση, η οποία πολύ συχνά χρησιμοποιείται στην παραδοσιακή ανάλυση κινδύνου. Το Γράφημα 5-2 απεικονίζει τους κινδύνους της

αποτυχίας να επιτευχθεί ένα ορισμένο επίπεδο κερδοφορίας (ποσοστό απόδοσης της επένδυσης) για τις επιλογές παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας που θεωρούνται στο συγκεκριμένο παράδειγμα. Η απόδοση των εναλλακτικών τεχνολογικών επιλογών ποικίλλει σημαντικά ανάλογα με το επίπεδο της φιλοδοξίας (το οποίο αναπαρίσταται με την τιμή κατώφλιου). Αν η απαίτηση είναι σχετικά μικρή, δηλαδή το κατώφλι του ποσοστού απόδοσης παίρνει τιμή μικρότερη από 8% ετησίως, τότε η πυρηνική ενέργεια είναι η προτιμώμενη επιλογή (το ποσοστό απόδοσης έχει πιθανότητα μόλις 4% να είναι χαμηλότερο από 7% ετησίως και 26% να είναι χαμηλότερο από 8% ετησίως). Ωστόσο, πέρα από το όριο του 8%, η ελκυστικότητα των πυρηνικών σταθμών επιδεινώνεται ραγδαία, καθιστώντας την επιλογή κατασκευής πυρηνικού εργοστασίου μη οικονομικά αποδοτική εάν απαιτείται ποσοστό απόδοσης υψηλότερο από 8-8.5%.

Αν η απαίτηση για ελάχιστη απόδοση κυμαίνεται μεταξύ 8 και 8.7% ετησίως, ο συνδυασμός φυσικού αερίου συνδυασμένου κύκλου με CCS και ανεμογεννήτριες δίνει τις καλύτερες προοπτικές (η πιθανότητα ότι αυτή η επιλογή θα έχει απόδοση μικρότερη από 8.5% ετησίως είναι μόνο 35% σε σύγκριση με 53% για τους πυρηνικούς σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής). Για υψηλότερα επίπεδα απαίτησης κερδοφορίας (μεταξύ 8.7 και 10.1% ετησίως), ο συνδυασμός του συνδυασμένου κύκλου με την αιολική ενέργεια είναι η πιο κατάλληλη επιλογή, δεδομένου ότι απαιτεί μικρότερες κεφαλαιουχικές δαπάνες σε σύγκριση με την επιλογή «CCS και ανεμογεννήτριες». Πέρα από το όριο του 10.1% ετησίως, η τεχνολογία φυσικού αερίου συνδυασμένου κύκλου είναι η πιο οικονομικά αποδοτική επιλογή, καθώς περιλαμβάνει μικρότερη ποσότητα κεφαλαιουχικών επενδύσεων σε κίνδυνο και χαρακτηρίζεται από υψηλό αναμενόμενο μέσο ποσοστό απόδοσης. Από την άλλη πλευρά, θα πρέπει να σημειωθεί ότι η τεχνολογία συνδυασμένου κύκλου φυσικού αερίου παρέχει μικρή κάλυψη για ενδεχόμενα ιδιαίτερα χαμηλών αποδόσεων (η πιθανότητα ότι το ποσοστό απόδοσης θα πέσει κάτω από 7% ετησίως εκτιμάται σε 38%).

Η παραπάνω ανάλυση εξέτασε διακριτές τεχνολογικές επιλογές. Οι στρατηγικές αντιστάθμισης του κινδύνου επενδύσεων (*risk hedging*) συνήθως περιλαμβάνουν συνδυασμό επιλογών, κάτι το οποίο μεγεθύνεται στην συγκεκριμένη περίπτωση εξαιτίας των σχετικά υψηλών συσχετίσεων μεταξύ των αποδόσεων των τεχνολογιών ηλεκτροπαραγωγής. Οι κίνδυνοι μπορούν να μειωθούν σημαντικά με προσεκτική στάθμιση και συνδυασμό, ιδιαίτερα μεταξύ των επιλογών που εμφανίζουν αρνητική συσχέτιση μεταξύ τους. Για παράδειγμα, εάν εξεταστεί ένας συνδυασμός 50-50 του πυρηνικού σταθμού και της επιλογής ανεμογεννητριών σε συνδυασμό με τεχνολογία CCS, ο κίνδυνος για ποσοστό απόδοσης μικρότερο από 8.5% ετησίως μειώνεται σε 39%, σε σύγκριση με 54% για την επιλογή της πυρηνικής ενέργειας.



Γράφημα 5-2: Πιθανότητα αποτυχίας των επενδύσεων να ξεπεράσουν δεδομένες τιμές κατωφλίου ποσοστών απόδοσης (με βάση τα στοχαστικά αποτελέσματα του μοντέλου)

5.5 Μεθοδολογία βελτιστοποίησης της απόδοσης επενδύσεων

5.5.1 Αλγεβρική αναπαράσταση της μεθοδολογίας

Η παρούσα ενότητα παρουσιάζει την μεθοδολογία που χρησιμοποιήθηκε για την αξιολόγηση των επενδύσεων σε σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής υπό αβεβαιότητα. Επίσης αναλύεται το στοχαστικό υπόδειγμα των αποφάσεων ηλεκτροπαραγωγής, το οποίο δίνει ιδιαίτερη έμφαση στα αβέβαια χαρακτηριστικά της κερδοφορίας (ποσοστό απόδοσης) των εναλλακτικών επιλογών. Ουσιαστικά το προτεινόμενο υπόδειγμα εξερευνά βέλτιστες στρατηγικές επενδύσεων στην ηλεκτροπαραγωγή σε περιβάλλον ρίσκου και αβεβαιότητας (π.χ. ενσωματώνοντας έννοιες αποφυγής κινδύνων) και με παρουσία πολλαπλών στόχων. Εξαιτίας της φύσεως του προβλήματος (υιοθέτηση πολλαπλών στόχων και του ρίσκου αποτυχίας των επενδύσεων), το προτεινόμενο υπόδειγμα παίρνει τη μορφή ενός πολυκριτηριακού μη γραμμικού προβλήματος, όπου μεγιστοποιείται η πιθανότητα ότι ο κύριος στόχος ξεπερνά ένα επιθυμητό όριο (τιμή κατωφλίου) με την προϋπόθεση ότι οι υπόλοιποι στόχοι ικανοποιούνται ως περιορισμοί είτε ντετερμινιστικοί (προσδοκώμενη απόδοση) είτε πιθανοτικοί (δηλαδή οι πιθανότητες ότι οι υπόλοιποι στόχοι ξεπερνούν ένα δεδομένο κατώφλι είναι μεγαλύτερες από κάποιο επιθυμητό επίπεδο). Επιπρόσθετα η κατανομή των επενδύσεων στις εναλλακτικές τεχνολογίες πρέπει να είναι μεγαλύτερη του μηδενός.

Η βασική μαθηματική τεκμηρίωση του υποδείγματος είναι:

$\max Pr\{\sum_{j=1}^n x_j * ror_j > A_1 * B\}$, (5), ο στόχος μεγιστοποίησης πιθανότητας, Υπό τους ακόλουθους περιορισμούς:

$Pr\{\sum_{j=1}^n x_j * ror_j > A_i * B\} \geq p_i$, (6) $i=2\dots m$, οι περιορισμοί για τους υπόλοιπους πιθανοτικούς στόχους

$\sum_{j=1}^n x_j * ror_j \geq k$, (7) ο περιορισμός για την μέση απόδοση

$\sum_{j=1}^n x_j \leq B$, (8) ο περιορισμός του διαθέσιμου προϋπολογισμού,

$x_j \geq 0$, (9) $j=1, 2, \dots, n$, περιορισμός θετικών κατανομών του προϋπολογισμού

όπου n είναι ο αριθμός των τεχνολογικών επιλογών, m είναι ο αριθμός των στόχων, το x_j αντιπροσωπεύει την διανομή του συνολικού προϋπολογισμού στις τεχνολογίες j , τα ror_j είναι τυχαίες μεταβλητές που αναπαριστούν την κατανομή του ποσοστού απόδοσης των τεχνολογιών j (ενότητα 8.2 βασισμένα στα στοχαστικά αποτελέσματα του ΠΡΟΜΗΘΕΑ), A_i είναι τα επίπεδα (κατώφλια) που πρέπει να ξεπεράσει ο κάθε στοχαστικός στόχος, k είναι το επίπεδο που πρέπει να ξεπεράσει η μέση απόδοση της επένδυσης, το p_i αντιπροσωπεύει τις πιθανότητες που σχετίζονται με τις αντίστοιχες τιμές κατωφλίου και B είναι ο συνολικός προϋπολογισμός για επενδύσεις στην ηλεκτροπαραγωγή (εκφρασμένος σε GW εγκατεστημένης ισχύος). Οποιοσδήποτε από τους στόχους που λαμβάνονται υπόψη στο υπόδειγμα μπορεί να πάρει τη θέση του κυρίως στόχου (εξίσωση 5).

Τα κύρια χαρακτηριστικά του προτεινόμενου υποδείγματος είναι:

- Ενιαίος ορίζοντας, δηλαδή η κατανομή του διαθέσιμου προϋπολογισμού θεωρείται ότι αποφασίζεται σε κάποια μελλοντική χρονική στιγμή (π.χ. 2030) και η κατανομή των ποσοστών απόδοσης υπολογίζεται με βάση σταθερό μελλοντικό ορίζοντα (εδώ είναι σημαντικό να κατανοηθεί ότι το προτεινόμενο υπόδειγμα δεν προσομοιώνει αναβολές στις επενδυτικές αποφάσεις ώστε να συμπεριλάβουν οποιαδήποτε γνώση αποκτήθηκε στο μεσοδιάστημα- αντίθετα με τις αναλύσεις *Real Options*).
- Εξαιτίας της ενσωμάτωσης ρίσκου στο πρόβλημα κατανομής του προϋπολογισμού για ηλεκτροπαραγωγή, το μοντέλο χειρίζεται τις αποφάσεις για την βέλτιστη κατανομή στοχαστικά και δίνει τη δυνατότητα για πιθανοτική ανάλυση.
- Υπάρχει στατιστική εξάρτηση των ποσοστών απόδοσης σε εναλλακτικές επενδύσεις, η οποία προέρχεται από το γεγονός ότι οι κατανομές πιθανοτήτων ενσωματώνουν την συνδιακύμανση μεταξύ των μεταβλητών (προερχόμενη από τον ΠΡΟΜΗΘΕΑ) εξαιτίας της εξάρτησής τους από κοινές μεταβλητές (π.χ. τιμή ηλεκτρικής ενέργειας, τιμές καυσίμων και διοξειδίου του άνθρακα). Συνεπώς, η συγκεκριμένη ανάλυση του χαρτοφυλακίου επενδύσεων λαμβάνει υπόψη της τα συστημικά αποτελέσματα στο πλαίσιο του ενεργειακού συστήματος.
- Γίνεται η υπόθεση ότι η κατανομή του προϋπολογισμού ανάμεσα στις διαθέσιμες επιλογές δεν επηρεάζει τις στοχαστικές ιδιότητες του προβλήματος. Παρ' ότι

σχετικά απλοποιημένη, η υπόθεση μπορεί να δικαιολογηθεί από τις μικρές σε μέγεθος επενδύσεις και εξαιτίας της περιορισμένης σημασίας της κατανομής του προϋπολογισμού σχετικά με τις υπόλοιπες πηγές κινδύνων.

- Επιπλέον, γίνεται η υπόθεση ότι οι επενδυτές είναι price-takers δηλαδή δεν μπορούν να επηρεάσουν τα κόστη των τεχνολογιών, των καυσίμων και την τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας (υπόθεση Walras), εξαιτίας του μικρού μεγέθους τους
- Τα όρια (τιμές κατωφλίων) A_i πρέπει να επιλεγθούν αρκετά χαμηλά ώστε οι πιθανότητες p_i να είναι μεγαλύτερες του 50%. Αν αυτή η συνθήκη δεν τηρείται, τότε το πρόβλημα γίνεται μη κυρτό, που σημαίνει ότι πέρα από τις δυσκολίες για την εύρεση ενός συνολικού βέλτιστου μεταβάλλεται και η φύση του προβλήματος από τη μείωση ρίσκου ("hedging") στην κερδοσκοπία ("speculation").

5.5.2 Μη γραμμικός προσδιορισμός του υποδείγματος

Επί της αρχής, οι κατανομές πιθανοτήτων των τυχαίων μεταβλητών για τα ποσοστά απόδοσης ror_j μπορούν να πάρουν οποιαδήποτε μορφή. Ωστόσο στην γενική περίπτωση ο γραμμικός μετασχηματισμός αυτών των μεταβλητών (όπως υπονοείται από τις εξισώσεις 3 και 4) δεν είναι γνωστός με την εξαίρεση της ειδικής περίπτωσης των κανονικών κατανομών. Συνεπώς, υποθέτοντας ότι οι μεταβλητές ror_j είναι κατανομημένες κανονικά και χρησιμοποιώντας την αναπαραγωγική ιδιότητα της κανονικής κατανομής, ξέρουμε ότι οι γραμμικοί μετασχηματισμοί των εξισώσεων (5) και (6) θα είναι και αυτοί κανονικά κατανομημένοι. Αυτή η υπόθεση επιτρέπει τον αναλυτικό προσδιορισμό του υποδείγματος που παρουσιάστηκε παραπάνω σαν ένα πρόβλημα μη γραμμικής βελτιστοποίησης¹⁹:

$$\max_x \frac{\mathbf{p}'_1 * \mathbf{x} - A_1 * B}{\sqrt{\mathbf{x}' * \mathbf{V}_1 * \mathbf{x}}} \quad (10), \text{ ο στόχος (αντικειμενική συνάρτηση)}$$

Περιορισμοί:

$$\mathbf{p}'_1 * \mathbf{x} - \mathbf{F}^{-1}(p_i) * \sqrt{\mathbf{x}' * \mathbf{V}_1 * \mathbf{x}} \geq A_1 * B \quad (11), \text{ όπου } i=2,..,m \text{ οι περιορισμοί στους υπόλοιπους στόχους}$$

$$\mathbf{u}' * \mathbf{x} \leq B \quad (12), \text{ ο περιορισμός του προϋπολογισμού}$$

$$\mathbf{x} \geq 0 \quad (13), \text{ μη αρνητικότητα της κατανομής}$$

Όπου \mathbf{x} αντιπροσωπεύει το διάνυσμα $n*1$ που περιέχει την κατανομή του διαθέσιμου προϋπολογισμού στις n εναλλακτικές τεχνολογίες ηλεκτροπαραγωγής και $\mathbf{p}_i = \mathbf{E}(\mathbf{ror}_i)$ όπου \mathbf{ror}_i είναι τα διανύσματα $n*1$ τα οποία αντιπροσωπεύουν τα στοχαστικά ποσοστά αποδόσεων των τεχνολογικών επιλογών i που προκύπτουν από τα αποτελέσματα του ΠΡΟΜΗΘΕΑ.

¹⁹ Στην παραπάνω περιγραφή, τα έντονα γράμματα υποδεικνύουν διανύσματα, ενώ τα έντονα κεφαλαία γράμματα υποδεικνύουν πίνακες

Στον παραπάνω προσδιορισμό ορίζουμε ως $V_i = E[(\mathbf{r} \mathbf{or}_i - \mathbf{p}_i)(\mathbf{r} \mathbf{or}_i - \mathbf{p}_i)']$ τους πίνακες διακύμανσης-συνδιακύμανσης των ποσοστών απόδοσης, οι οποίοι είναι εξ' ορισμού συμμετρικοί και θετικά ορισμένοι και αποτελούν ένα σημαντικό στοιχείο για την αξιολόγηση των επενδύσεων υπό αβεβαιότητα, καθώς περιέχουν τα χαρακτηριστικά αντιστάθμισης κινδύνων, p_i τον πιθανοτικό περιορισμό για τον i -th στόχο και $F(p_i) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{p_i} e^{0.5z^2} dz$ την αθροιστική συνάρτηση πιθανότητας της κανονικής κατανομής, η αντίστροφη της οποίας χρησιμοποιείται σαν παράμετρος στους περιορισμούς του υποδείγματος. Τέλος, το u αναπαριστά το μοναδιαίο $n \times 1$ διάνυσμα, οι παράμετροι A_i τις τιμές κατωφλίου που συνδέονται με τον i -th στόχο και η παράμετρος B αναπαριστά τον περιορισμό του διαθέσιμου προϋπολογισμού (επενδύσεις σε GW ισχύος). Τα όρια A_i πρέπει να επιλεγθούν αρκετά χαμηλά έτσι ώστε να αποφύγουμε την μη κυρτότητα και την επακόλουθη αλλαγή στον χαρακτήρα του προβλήματος (που απομακρύνεται από την αποφυγή κινδύνου).

Το παραπάνω υπόδειγμα προσφέρει έναν μεγάλο αριθμό δυνατοτήτων για αξιολόγηση επενδύσεων. Κατ' αρχάς, καθορίζεται ένα εφικτό σύνολο λύσεων το οποίο αντιπροσωπεύει για κάθε στόχο τα κατώτατα επιτρεπτά όρια (τιμές κατωφλίου) και τις ελάχιστες πιθανότητες που θα πρέπει να ξεπερνιούνται. Η εξερεύνηση ξεκινάει με την τοποθέτηση κάθε στόχου στην θέση της κύριας αντικειμενικής συνάρτησης μεγιστοποιώντας την πιθανότητα επίτευξης της τιμής κατωφλίου. Αυτή η διαδικασία επαναλαμβάνεται με την τοποθέτηση άλλων στόχων στην θέση κύριας αντικειμενικής συνάρτησης. Διαδοχικές λύσεις οδηγούν στην κατασκευή μιας σειράς από καμπύλες *ray-off*. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον σε αυτές τις καμπύλες έχουν τα σημεία καμπής, τα οποία υποδεικνύουν λύσεις όπου το κέρδος σε ένα στόχο μπορεί να επιτευχθεί μόνο με το κόστος της χειροτέρευσης σε ένα άλλο στόχο (δηλαδή σηματοδοτεί το τέλος της συνέργειας ανάμεσα σε δύο στόχους). Υπό την παρουσία διαφοροποιημένων μιγμάτων επενδύσεων, καθίσταται δυνατός ο καθορισμός λύσεων «συμβιβασμού» με την χρήση κανόνων και μεθόδων που έχουν αναπτυχθεί για την βελτιστοποίηση πολλαπλών κριτηρίων με στόχο την εξερεύνηση πιθανών συνεργιών μεταξύ των στόχων. Στη συνέχεια η λύση βελτιώνεται με την εδραίωση των συνεργιών και χαλάρωσης των τιμών κατωφλίου και τελικά θυσιάζοντας τις απαιτήσεις για ορισμένους στόχους. Στην παραπάνω διαδικασία, τα δυικά κόστη παρέχουν καθοδήγηση.

5.5.3 Προσδιορισμός προβλήματος με Μικτό Ακέραιο Προγραμματισμό

Στην παραπάνω ενότητα παρουσιάστηκε η διαδικασία κατασκευής του υποδείγματος στην περίπτωση που τα στοχαστικά ποσοστά απόδοσης των επενδύσεων ακολουθούν την κανονική κατανομή. Παρ' όλα αυτά, εκτεταμένη ανάλυση με τα αποτελέσματα του ΠΡΟΜΗΘΕΑ έδειξε ότι η υπόθεση για κανονικές κατανομές (η οποία ήταν απαραίτητη για τον μη γραμμικό προσδιορισμό του προβλήματος) δεν είναι κατάλληλη. Η αιτιολόγηση της υπόθεσης κανονικότητας των κατανομών βασίστηκε κυρίως στο γεγονός ότι το κεντρικό οριακό θεώρημα υπονοεί ότι ο γραμμικός μετασχηματισμός μη κανονικών κατανομών θα τείνει στην κανονικότητα όσο οι λύσεις είναι διαφοροποιημένες και οι αποκλίσεις από την κανονικότητα ομοιόμορφες ανάμεσα

στις τεχνολογικές επιλογές. Ωστόσο, η υπόθεση κανονικότητας είναι συχνά ιδιαίτερα ανακριβής απλοποίηση και παραβιάζει την μορφή της πραγματικής κατανομής, τα πρότυπα συνδιακύμανσης και την συνθήκη προσήμου όπως προκύπτουν από την συστηματική ανάλυση με το μοντέλο.

Στις περισσότερες περιπτώσεις, οι κατανομές των ποσοστών απόδοσης των τεχνολογικών επιλογών του ΠΡΟΗΘΕΑ διαφέρουν από την κανονική. Συνεπώς, το υπόδειγμα μοντελοποιείται με χρήση Μικτού Ακέραιου Προγραμματισμού (MIP) χρησιμοποιώντας απευθείας τα αποτελέσματα του στοχαστικού σεναρίου αναφοράς. Τα πιο σημαντικά πλεονεκτήματα της προτεινόμενης μεθόδου είναι:

- Πλήρης ευελιξία για αναπαράσταση των από κοινού κατανομών των αποδόσεων των τεχνολογιών, καθώς αυτή η μεθοδολογία μπορεί να χειριστεί μη συμμετρικές κατανομές. Επιπλέον η μεθοδολογία MIP μπορεί να χειριστεί τις κατανομές των ποσοστών απόδοσης των τεχνολογιών όπως προκύπτουν από τα αποτελέσματα του ΠΡΟΜΗΘΕΑ με βάση τα 2048 πειράματα Monte Carlo, παρέχοντας συνεπώς την δυνατότητα για την ανάλυση των συνθηκών υπό τις οποίες μια συγκεκριμένη περίπτωση συμβαίνει (αυξημένη διαφάνεια της μεθοδολογίας)
- Σύνθετα πρότυπα διακύμανσης και συν-διακύμανσης λαμβάνονται αυτομάτως υπόψη, ενώ η βέλτιστη λύση δεν περιλαμβάνει περιοχές, οι οποίες σύμφωνα με την οικονομική θεωρία και την κοινή λογική είναι μη δυνατές.
- Διευρύνει τις δυνατότητες για υιοθέτηση διαφορετικών προτύπων αποστροφής του κινδύνου, καθώς η μέθοδος μπορεί να χειριστεί περιπτώσεις μη κυρτότητες και δεν υπάρχει κανένας περιορισμός σε πιθανότητες μεγαλύτερες από 50%.

Από την άλλη πλευρά, τα κύρια μειονεκτήματα της μεθόδου είναι ότι συνήθως αντιμετωπίζει σημαντικές υπολογιστικές δυσκολίες, οι οποίες περιορίζουν τον αριθμό των τεχνολογιών και των πιθανοτικών στόχων που μπορούν να διερευνηθούν καθώς οι χρόνοι επίλυσης είναι ιδιαίτερα μεγάλοι και μερικές φορές ασταθείς εξαιτίας του μεγάλου αριθμού δυαδικών μεταβλητών (περισσότερες από 4000 στο συγκεκριμένο παράδειγμα). Ωστόσο με την εξοικείωση με το πρόβλημα μπορούν να βρεθούν χρήσιμες συντομεύσεις. Τέλος, η μέθοδος παρέχει περιορισμένες δυνατότητες για τη χρήση του σκιώδους κόστους (δυικές τιμές) για την καθοδήγηση της εξερεύνησης πιθανών λύσεων. Ο αλγεβρικός προσδιορισμός του προβλήματος είναι:

$$\max_{x,W} \mathbf{u}'\mathbf{w}_1 \quad (14), \text{ η αντικειμενική συνάρτηση}$$

Υπό τους περιορισμούς:

$$(A_i + s)\mathbf{w}_i - \mathbf{r}\mathbf{or}_i\mathbf{x} \leq \mathbf{s}\mathbf{u} \quad (15), \text{ όπου } i=2,..m \text{ περιορισμοί στους υπόλοιπους στόχους}$$

$$\mathbf{u}'\mathbf{x} \leq 1 \quad (16) \text{ ο περιορισμός του διαθέσιμου προϋπολογισμού}$$

$$\mathbf{W}'\mathbf{u} \geq \mathbf{s}\mathbf{p} \quad (17) \text{ οι στόχοι για τους υπόλοιπους περιορισμούς}$$

$$\sum_{j=1}^n x_j * ror_j \geq k, \quad (18) \text{ ο περιορισμός για την μέση απόδοση}$$

$$\mathbf{x} \in \mathbf{B} \subset \mathcal{R}^{+n}, \quad \mathbf{w} \in \{0,1\}^{s(m+1)} \quad (19)$$

Όπου m είναι ο αριθμός των πιθανοτικών (στοχαστικών) περιορισμών, n ο αριθμός των τεχνολογικών επιλογών, s ο αριθμός των πειραμάτων Monte Carlo, ενώ ο δείκτης 1 χρησιμοποιείται για την αντικειμενική συνάρτηση. Επιπλέον, το διάνυσμα \mathbf{x} αντιπροσωπεύει το $n*1$ διάνυσμα το οποίο περιέχει την κατανομή του διαθέσιμου προϋπολογισμού στις n εναλλακτικές τεχνολογίες ηλεκτροπαραγωγής, ror_i είναι τα διανύσματα $n*1$ τα οποία αντιπροσωπεύουν τα στοχαστικά ποσοστά αποδόσεων των τεχνολογικών επιλογών i , οι παράμετροι A_i αναπαριστούν τις τιμές κατωφλίου που πρέπει να ξεπεραστούν με πιθανότητες που περιέχονται στο διάνυσμα \mathbf{p} , ενώ το \mathbf{B} είναι ένα προαιρετικό σύνολο γραμμικών περιορισμών. Το \mathbf{u} αναπαριστά το μοναδιαίο $n*1$ διάνυσμα και το \mathbf{W} είναι ένας πίνακας που περιέχει 0 ή 1 σηματοδοτώντας αν το πείραμα j ικανοποιεί κάθε περιορισμό i (π.χ. όταν $w_{ji} = 0$ σημαίνει ότι το πείραμα j δεν ικανοποιεί τον περιορισμό i).

Το πρόβλημα όπως προσδιορίστηκε στις εξισώσεις (14) με (19) είναι ένα πρόβλημα μικτού ακέραιου μαθηματικού προγραμματισμού (MIP) και μπορεί να επιλυθεί με διάφορες εκδοχές του αλγόριθμου Branch and Bound [191] όπως υλοποιείται στο υπολογιστικό πρόγραμμα GAMS. Το σύνολο των περιορισμών που ορίζεται από την εξίσωση (13) ουσιαστικά εκτελεί την καταμέτρηση του συνόλου των περιπτώσεων όπου γίνεται υπέρβαση ενός συγκεκριμένου ορίου σε έναν στόχο, ενώ οι περιορισμοί (15) αντικαθιστούν τους πιθανοτικούς περιορισμούς (εξίσωση 9) του προβλήματος μη γραμμικού προγραμματισμού. Η εξίσωση (16) αναφέρεται στον ντετερμινιστικό περιορισμό ώστε η μέση απόδοση της επένδυσης να ξεπερνάει μια ελάχιστη τιμή. Σε αυτό το σημείο πρέπει να τονιστεί ότι τα αποτελέσματα του ΠΡΟΜΗΘΕΑ αποτελούνται από 2048 πειράματα Monte Carlo και αυτό σημαίνει ότι το MIP πρόβλημα θα έχει $s*m=2048*m$ δυικές μεταβλητές; Αν δεν χρησιμοποιήσουμε κανένα στοχαστικό περιορισμό τότε το πρόβλημα θα έχει 2048 δυικές μεταβλητές, ενώ αν χρησιμοποιήσουμε 2 περιορισμούς τότε οι δυικές μεταβλητές αυξάνονται σε 6144 και συνεπώς αποτελούν ένα ιδιαίτερα δύσκολο πρόβλημα σε υπολογιστικούς όρους.

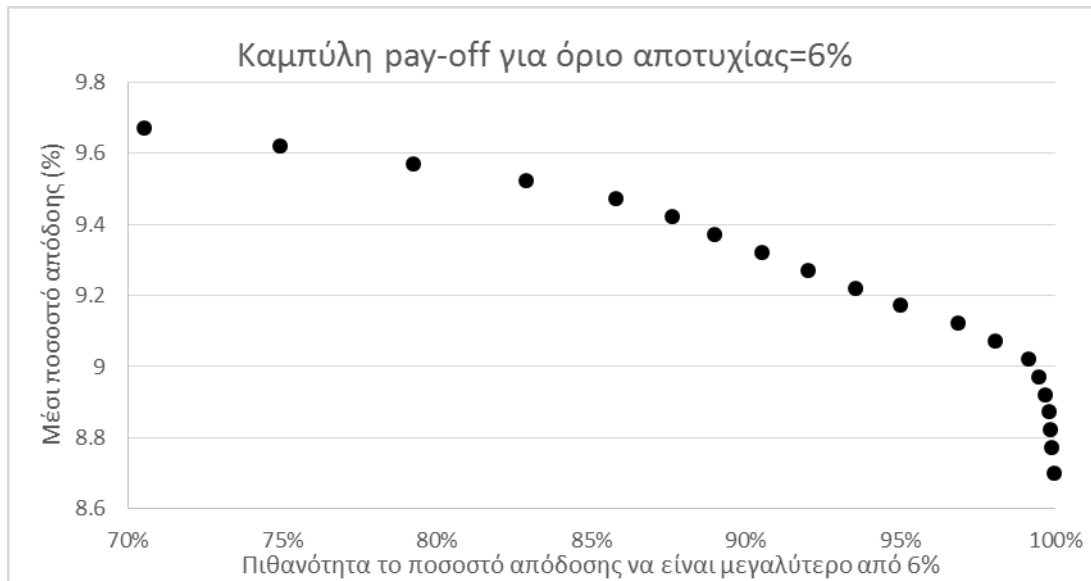
Στην ουσία, το προτεινόμενο υπόδειγμα εξερευνά ένα σύνολο βέλτιστων στρατηγικών για τις επενδύσεις σε τεχνολογίες ηλεκτροπαραγωγής σε ένα πλαίσιο αβεβαιότητας και με την παρουσία πολλαπλών στόχων, όπως γίνεται συνήθως σε αποφάσεις για μεγάλης κλίμακας επενδύσεις. Παρ' όλες τις δυσκολίες η διατύπωση του προβλήματος σε κωδικοποιήθηκε στο αλγεβρικό μαθηματικό περιβάλλον GAMS χρησιμοποιώντας την μέθοδο CPLEX και επιλύθηκε για μια σειρά εναλλακτικών διαμορφώσεων των τιμών κατωφλίου και των πιθανοτικών περιορισμών και τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στην παρακάτω ενότητα.

5.5.4 Ανάλυση αποτελεσμάτων

Η ενότητα θα παρουσιάσει ενδεικτικά αποτελέσματα του μοντέλου βέλτιστης κατανομής των επενδύσεων στις τεχνολογίες παραγωγής ηλεκτρισμού που έχει παρουσιαστεί εκτενώς στις προηγούμενες ενότητες. Εξαιτίας της ιδιαίτερα μεγάλης υπολογιστικής πολυπλοκότητας, αρχικά η ανάλυση με το μοντέλο υποθέτει έναν πιθανοτικό στόχο για ελαχιστοποίηση του κινδύνου η απόδοση της επένδυσης να είναι χαμηλότερο από ένα συγκεκριμένο ποσοστό (εξετάστηκαν περιπτώσεις μεταξύ 6 και 7.5%), ενώ παράλληλα ικανοποιείται ο ντετερμινιστικός περιορισμός σύμφωνα με τον οποίο το μέσο ποσοστό απόδοσης είναι υψηλότερο από ένα δοσμένο όριο/κατώφλι.

Αρχικά, η εξερεύνηση της βέλτιστης κατανομής των επενδύσεων σε εργοστάσια ηλεκτροπαραγωγής υποθέτει απαίτηση η μέση απόδοση να είναι μεγαλύτερη από 8.7% (η τιμή προσδιορίστηκε με βάση τα ποσοστά απόδοσης των επιλογών και το Γράφημα 5-2). Στη συνέχεια, αυξάνεται σταδιακά μέχρι το 9.7% με βήμα 0.05% έτσι ώστε να εξερευνηθεί ένα σχετικά μεγάλο εύρος λύσεων, οι οποίες όμως είναι ρεαλιστικές και πολιτικά και οικονομικά επιλέξιμες. Αν στόχος είναι η ελαχιστοποίηση της πιθανότητας το ποσοστό απόδοσης της επένδυσης να είναι μικρότερο από 6% τότε το παρακάτω γράφημα παρουσιάζει την σχέση μεταξύ του μέσου ποσοστού απόδοσης (οριζόντιος άξονας) και της πιθανότητας «αποτυχίας»; Η τελευταία ορίζεται σαν η περίπτωση στην οποία το ποσοστό απόδοσης της αρχικής επένδυσης είναι μικρότερο από 6%.

Παρατηρούμε ότι όσο αυξάνονται οι απαιτήσεις για μεγαλύτερο μέσο ποσοστό απόδοσης, τόσο αυξάνεται και η πιθανότητα «αποτυχίας» της επένδυσης από 0% (για μέσο ποσοστό κερδοφορίας 8.7%) σε 30% (όταν απαιτούμε μέση ετήσια κερδοφορία τουλάχιστον 9.7%). Για απαιτήσεις μέσης απόδοσης μέχρι 9.2% ετησίως, οι πιθανότητες «αποτυχίας» είναι μικρότερες από 5%. Ωστόσο, όταν η απαιτούμενη μέση απόδοση ξεπερνάει το 9.2%, τότε η πιθανότητα αποτυχίας παρατηρούμε ότι αυξάνεται μη γραμμικά, δεδομένου ότι ευνοούνται τεχνολογίες με μεγαλύτερη αβεβαιότητα (και μεγαλύτερη αναμενόμενη απόδοση). Έτσι, η πιθανότητα αποτυχίας διπλασιάζεται από 5% σε 10% όταν η μέση απόδοση αυξάνεται από 9.2% σε 9.4% ετησίως, ενώ για ακόμα μεγαλύτερες απαιτήσεις η πιθανότητα αποτυχίας αυξάνεται σχεδόν εκθετικά. Συνεπώς, όταν απαιτείται μέσο ποσοστό απόδοσης τουλάχιστον 9.7% η πιθανότητα αποτυχίας αυξάνεται σε σχεδόν 30% (δηλαδή η πιθανότητα ότι η απόδοση είναι μικρότερη από 6%). Η ανάλυση δεν μελετά χαρτοφυλάκια επενδύσεων που οδηγούν σε πιθανότητες αποτυχίας μεγαλύτερες από 30% καθώς σε αυτήν την περίπτωση απομακρυνόμαστε από τον χαρακτήρα αποφυγής κινδύνων που έχει η συγκεκριμένη εφαρμογή.

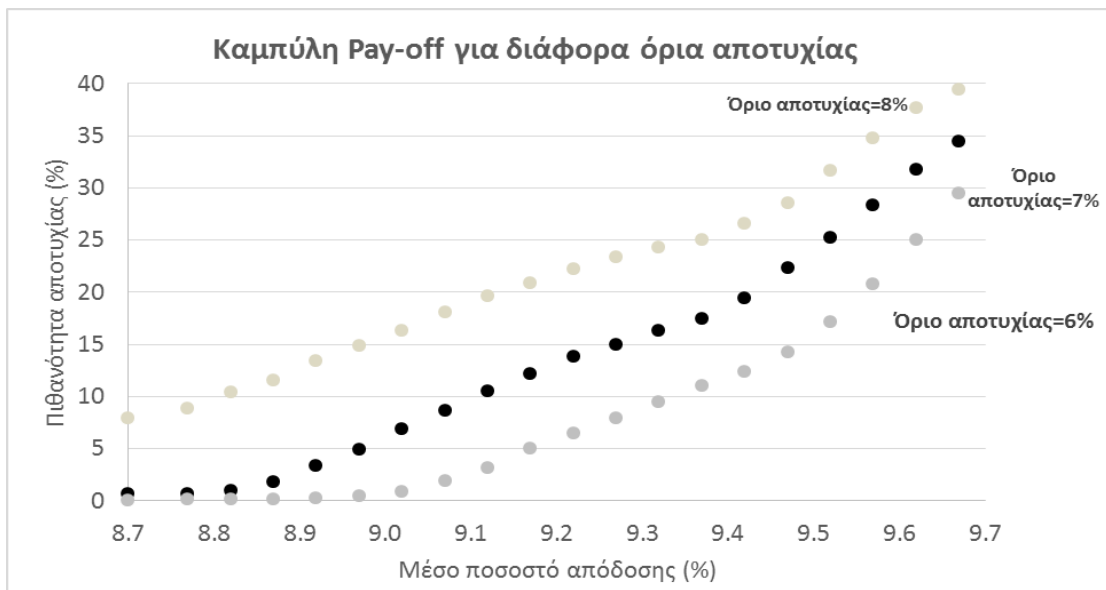


Γράφημα 5-3: Πιθανότητα επίτευξης ποσοστού απόδοσης 6% σαν συνάρτηση της μέσης απόδοσης της επένδυσης (όπως προκύπτει από την ελαχιστοποίηση κινδύνου)

Στο Γράφημα 5-4 παρουσιάζονται οι καμπύλες pay-off μεταξύ του μέσου ποσοστού απόδοσης και της πιθανότητας αποτυχίας η απόδοση της επένδυσης να είναι μεγαλύτερη από ένα συγκεκριμένο όριο; Στο συγκεκριμένο παράδειγμα μελετώνται τα όρια αποτυχίας 6%, 7% και 8%. Γενικά, παρατηρούμε ότι η μορφή των καμπυλών είναι γνησίως αύξουσα σε όλα τα εξεταζόμενα ποσοστά αποτυχίας, καθώς όσο αυξάνεται το μέσο ποσοστό απόδοσης της επένδυσης σε εναλλακτικές τεχνολογίες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας τόσο αυξάνονται και οι πιθανότητες αποτυχίας. Όπως είναι λογικό το ποσοστό «αποτυχίας» αυξάνεται επίσης όσο μεγαλύτερο είναι το όριο της αποτυχίας. Αν το μέσο ποσοστό απόδοσης της επένδυσης είναι 8.7% ετησίως, τότε όταν το όριο αποτυχίας θεωρείται το ποσοστό 6%, η πιθανότητα «αποτυχίας» είναι 0%, ενώ όταν το όριο ανεβαίνει στο 8%, η πιθανότητα «αποτυχίας» είναι 8.5%. Αντίστοιχα, όταν απαιτείται μέση κερδοφορία 9.7% ετησίως, τότε οι πιθανότητες αποτυχίας κυμαίνονται μεταξύ 30% (για όριο αποτυχίας 6%) και 40% (για όριο 8%).

Ο σκοπός της παρούσας ανάλυσης δεν είναι να παρουσιάσει την βέλτιστη λύση του συγκεκριμένου προβλήματος, αλλά να εξετάσει πιθανοτικά τις εναλλακτικές τεχνολογικές επιλογές και να αναλύσει και κατασκευάσει καμπύλες κόστους-κέρδους (*pay-off curves*) με βάση τις οποίες οι αναλυτές, οι επενδυτές και οι φορείς χάραξης πολιτικές μπορούν να επιλέγουν τις βέλτιστες στρατηγικές με βάση τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά και τους στόχους τους. Για παράδειγμα, ένας επενδυτής που αποστρέφεται τον κίνδυνο (*risk-averse*) θα τείνει να επιλέξει επενδύσεις στο αριστερό άκρο των καμπυλών, όπου τόσο οι πιθανότητες αποτυχίας της επένδυσης όσο και το μέσο ποσοστό απόδοσης είναι σε χαμηλά επίπεδα. Σε περίπτωση που αποτυχία θεωρείται ένα ποσοστό απόδοσης χαμηλότερο από 7%, τότε η ανάλυση παρουσιάζει το κόστος-όφελος του επενδυτή καθώς μετακινούμαστε σε υψηλότερη μέση απόδοση. Συγκεκριμένα, αν ο επενδυτής απαιτεί μηδενική πιθανότητα «αποτυχίας» τότε το μέσο

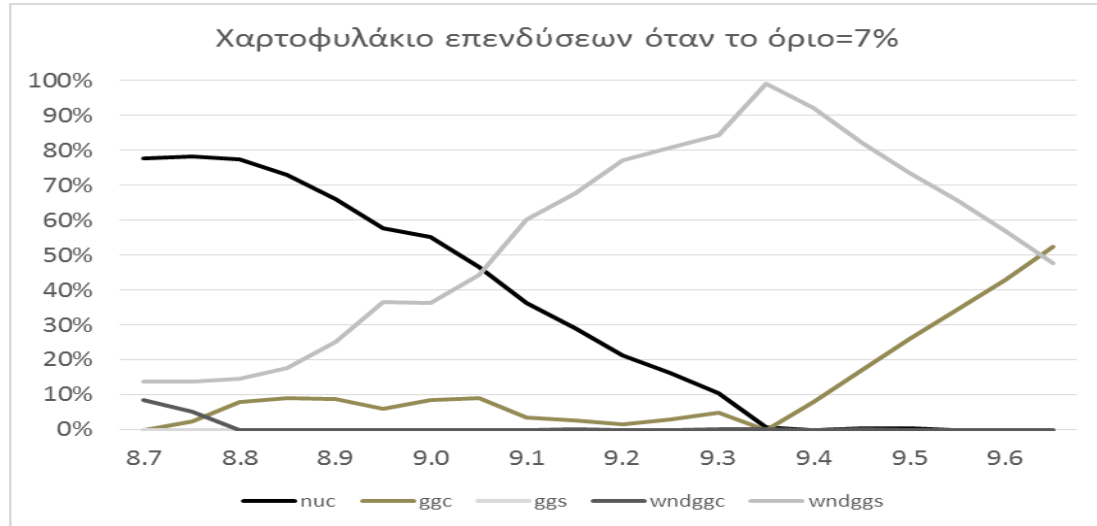
ποσοστό της βέλτιστης επένδυσης που μπορεί να επιλέξει εκτιμάται σε 8.7% ετησίως. Αν ο επενδυτής αποφασίσει ότι επιθυμεί μεγαλύτερο μέσο ποσοστό κέρδους (π.χ. 9.1%) τότε η πιθανότητα αποτυχίας αυξάνεται σε 10%, ενώ στην περίπτωση που επιθυμεί μέση απόδοση 9.4% ή 9.7% ετησίως τότε η πιθανότητα αποτυχίας της βέλτιστης επιλογής αυξάνεται σε 20% και 35% αντίστοιχα. Συνεπώς, ο επενδυτής ανάλογα με την αντίδρασή και την στάση του απέναντι στην αβεβαιότητά και το ρίσκο μπορεί να επιλέξει μια στρατηγική μείωσης του κινδύνου (ελαχιστοποίηση πιθανότητας αποτυχίας), μια στρατηγική αύξησης της μέσης απόδοσης ή μια μεικτή στρατηγική (με μικρές πιθανότητες αποτυχίας αλλά με ικανοποιητικό μέσο ποσοστό απόδοσης).



Γράφημα 5-4: Πιθανότητα αποτυχίας σαν συνάρτηση της μέσης απόδοσης της επένδυσης (όπως προκύπτει από πρόβλημα ελαχιστοποίησης κινδύνου για διάφορα όρια αποτυχίας)

Στο παρακάτω γράφημα παρουσιάζονται οι βέλτιστες κατανομές των επενδύσεων σε συγκεκριμένες τεχνολογίες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας όταν το όριο αποτυχίας θεωρείται 7% καθώς αυξάνεται σταδιακά ο ντετερμινιστικός περιορισμός στο μέσο ποσοστό απόδοσης. Παρατηρούμε ότι όταν η μέση απόδοση είναι 8.7% με 8.9%, η κύρια επιλογή είναι η επένδυση σε εργοστάσια πυρηνικής ενέργειας, καθώς (όπως έχει ήδη αναλυθεί) είναι η επιλογή με την μικρότερη μέση απόδοση αλλά και με ιδιαίτερα χαμηλή αβεβαιότητα. Καθώς αυξάνεται η απαίτηση για μέση απόδοση, η πυρηνική ενέργεια σταδιακά αποκαθίσταται από την επιλογή του συνδυασμού φυσικού αερίου με CCS και ανεμογεννητριών. Αυτή η επιλογή χαρακτηρίζεται από μεγαλύτερη αναμενόμενη απόδοση σε σύγκριση με την πυρηνική ενέργεια, αλλά και από χαμηλότερη τυπική απόκλιση σε σχέση με τις υπόλοιπες επιλογές. Όταν η αναμενόμενη απόδοση είναι 9.4% τότε το βέλτιστο χαρτοφυλάκιο αποτελείται 100% από την παραπάνω επιλογή (η οποία βέβαια οδηγεί σε πιθανότητες αποτυχίας 18%). Για ακόμα μεγαλύτερα μέσα ποσοστά απόδοσης, χρησιμοποιείται ολοένα περισσότερο η επένδυση στην τεχνολογία φυσικού αερίου συνδυασμένου κύκλου, η οποία έχει το μεγαλύτερο μέσο ποσοστό απόδοσης αλλά και τις μεγαλύτερες αβεβαιότητες σε σχέση

με τις υπόλοιπες επιλογές. Συνεπώς, όταν απαιτείται μέσο ποσοστό απόδοσης 9.7%, τότε το βέλτιστο χαρτοφυλάκιο αποτελείται κατά 52% από την τεχνολογία φυσικού αερίου και κατά 48% από τον συνδυασμό ανεμογεννητριών με CCS. Ωστόσο, αυτό το χαρτοφυλάκιο οδηγεί σε πιθανότητες αποτυχίας 35%.



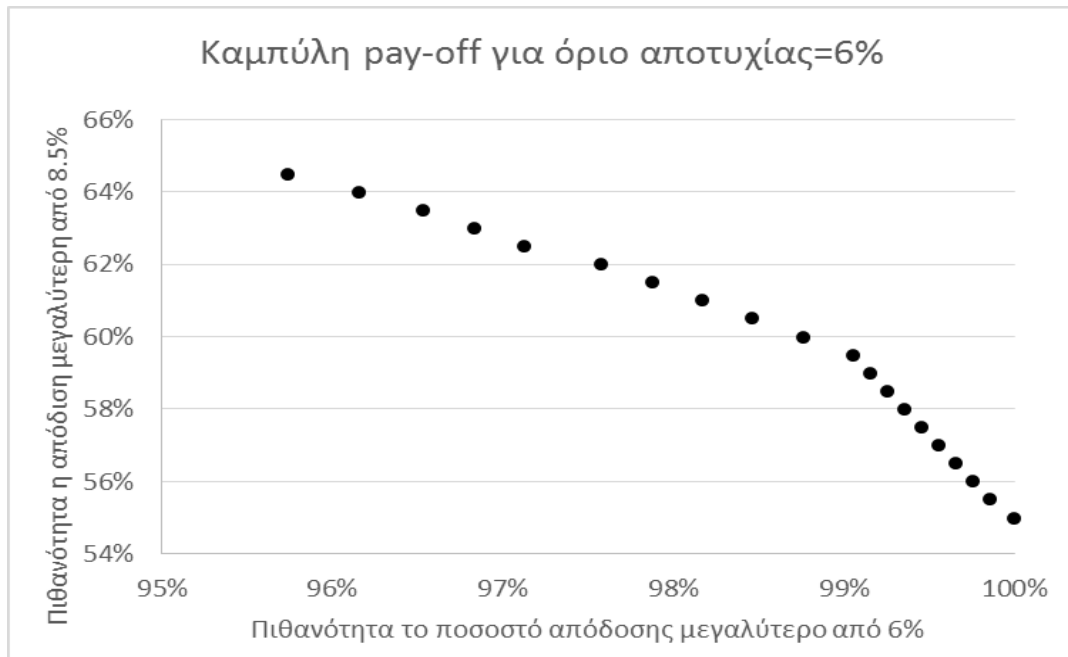
Γράφημα 5-5: Βέλτιστο χαρτοφυλάκιο επενδύσεων όταν το όριο αποτυχίας είναι 7% (όπως προκύπτει από το πρόβλημα ελαχιστοποίησης κινδύνου)

Σε γενικές γραμμές, για όριο αποτυχίας 8% οι επενδύσεις σε εναλλακτικές τεχνολογικές επιλογές ακολουθούν το μοτίβο της παραπάνω ανάλυσης, καθώς όσο μεγαλύτερες είναι οι απαιτήσεις σε μέση απόδοση τόσο περισσότερο ευνοούνται οι τεχνολογίες με υψηλότερη μέση κερδοφορία αλλά και με μεγαλύτερη αβεβαιότητα. Μια διαφορά είναι η σχετικά γρηγορότερη μείωση του ποσοστού της πυρηνικής ενέργειας σε σχέση με την περίπτωση που το όριο αποτυχίας τίθεται στο 7%. Παράλληλα, η διεξόδυση του φυσικού αερίου συνδυασμένου κύκλου γίνεται πιο γρήγορα, και όταν η μέση απόδοση γίνεται 9.7%, τότε η βέλτιστη κατανομή επενδύσεων οδηγεί σε ποσοστό 75% το φυσικό αέριο (ενώ όταν το όριο αποτυχίας είναι 7%, τότε το ποσοστό του αερίου εκτιμάται σε 50%).

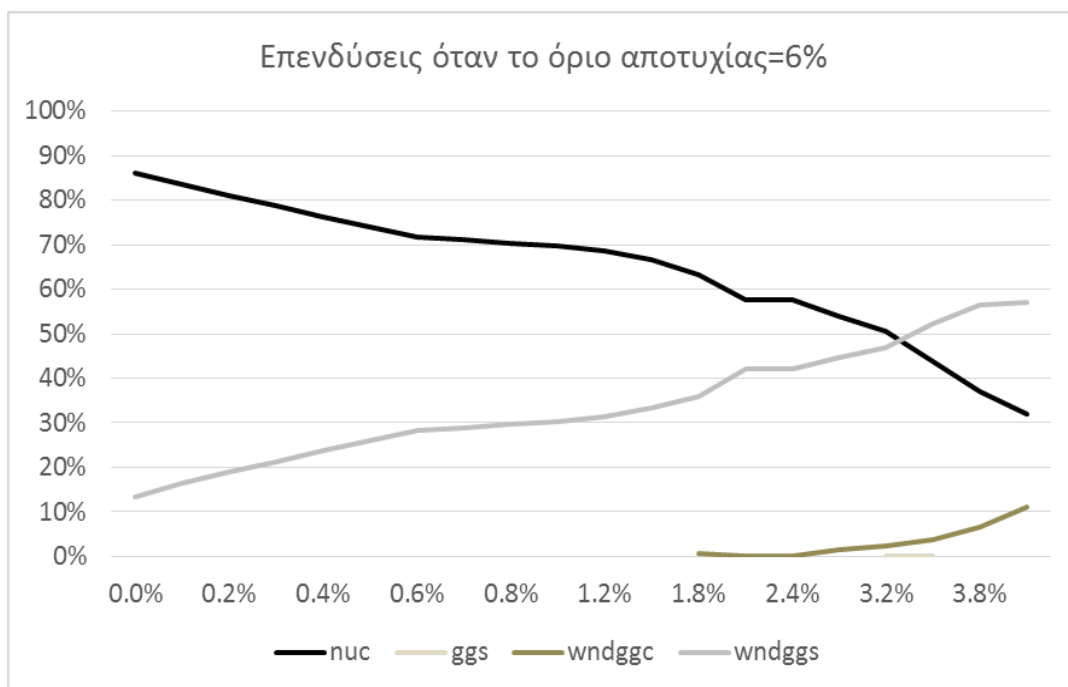
Στη συνέχεια, τα πειράματα επαναλαμβάνονται αλλά τώρα εισέρχεται στο πρόβλημα ένας επιπρόσθετος στοχαστικός περιορισμός, σύμφωνα με τον οποίο η πιθανότητα ότι η επένδυση θα έχει ποσοστό απόδοσης μικρότερο από 8.6% ετησίως (περίπτωση «επιτυχίας») είναι τουλάχιστον 55%. Η αντικειμενική συνάρτηση είναι η μεγιστοποίηση της πιθανότητας ότι το ποσοστό απόδοσης της επένδυσης είναι 6% ετησίως (δηλαδή «αποτυχία» θεωρείται η περίπτωση όπου η απόδοση είναι μικρότερη από 6%). Η συγκεκριμένη διαμόρφωση του προβλήματος σημαίνει ότι η έμφαση της ανάλυσης δίδεται εξολοκλήρου στην ελαχιστοποίηση του κινδύνου, η οποία γενικά υποεκτιμάται από τα περισσότερα μοντέλα και αναλύσεις σαν παράγοντας της συμπεριφοράς των παραγόντων του ενεργειακού συστήματος. Οι τιμές κατωφλίου για την επιτυχία και την αποτυχία μπορούν να ορισθούν διαισθητικά με βάση την εκτενή γνώση του συγκεκριμένου προβλήματος.

Η διερεύνηση της βέλτιστης στρατηγικής στο συγκεκριμένο πρόβλημα ξεκινάει θέτοντας πιθανότητα (τουλάχιστον) 55% για «επιτυχία» (ετήσια απόδοση 8.6%). Στην διαδικασία της εξερεύνησης ο πιθανοτικός περιορισμός στην επιτυχία αυξάνει μέχρι 65% με βήμα 0.5%. Αρχικά, όταν απαιτείται μικρή πιθανότητα επιτυχίας (55%) η πιθανότητα αποτυχίας είναι μηδενική (Γράφημα 5-6). Καθώς όμως ο περιορισμός για την πιθανότητα επιτυχίας γίνεται πιο αυστηρός, επιλέγονται τεχνολογίες μεγαλύτερου ρίσκου και μέσης απόδοσης και συνεπώς η πιθανότητα αποτυχίας αυξάνεται. Έτσι, όταν απαιτείται ελάχιστη πιθανότητα επιτυχίας 60%, τότε η πιθανότητα αποτυχίας αυξάνεται από 0% σε 1%. Ύστερα από το όριο επιτυχίας 60%, οι πιθανότητες το ποσοστό απόδοσης να μην ξεπεράσει το 6% αυξάνονται μη γραμμικά και συνεπώς όταν ο περιορισμός επιτυχίας (δηλαδή ποσοστό απόδοσης μεγαλύτερο του 8.6%) γίνει 65%, η πιθανότητα αποτυχίας εκτιμάται σε σχεδόν 4.5%. Το Γράφημα 5-6 παρουσιάζει την καμπύλη pay-off μεταξύ των πιθανοτήτων «αποτυχίας» και της «επιτυχίας», το οποίο έχει μεγάλη σημασία για τους φορείς χάραξης πολιτικής και για τους επενδυτές σε εργοστάσια παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.

Στο Γράφημα 5-7 παρουσιάζονται οι βέλτιστες επενδύσεις σε τεχνολογίες ηλεκτροπαραγωγής όταν το όριο αποτυχίας θεωρείται 6% καθώς αυξάνεται σταδιακά ο πιθανολογικός περιορισμός στην πιθανότητα επιτυχίας. Αυτό που παρατηρούμε είναι ότι όταν οι πιθανότητες αποτυχίας είναι ιδιαίτερα χαμηλές (από 0.5% έως 1%), η τεχνολογία που προτιμάται είναι η πυρηνική ενέργεια καθώς έχει την μικρότερη αβεβαιότητα. Όσο όμως οι απαιτήσεις για πιθανότητες «επιτυχίας» της επένδυσης (δηλαδή ποσοστό απόδοσης ίσο με 8.6% ετησίως) αυξάνονται, τόσο μειώνεται η χρήση της πυρηνικής ενέργειας η οποία υποκαθίσταται σταδιακά από τον συνδυασμό φυσικού αερίου με CCS και ανεμογεννητριών. Αυτή η επιλογή χαρακτηρίζεται από μεγαλύτερο μέσο όρο από την πυρηνική (γι' αυτό αυξάνονται οι πιθανότητες επιτυχίας) αλλά και από σχετικά χαμηλή αβεβαιότητα σε σύγκριση με τις υπόλοιπες τεχνολογικές επιλογές. Όταν ο περιορισμός για επιτυχία αυξάνεται περαιτέρω, εισάγεται σταδιακά και ο συνδυασμός ανεμογεννητριών με φυσικό αέριο (π.χ. όταν απαιτείται πιθανότητα επιτυχίας ίση με 65%, το βέλτιστο χαρτοφυλάκιο επενδύσεων στην ηλεκτροπαραγωγή αποτελείται κατά 57% από CCS και αιολική ενέργεια, 32% από πυρηνική ενέργεια και 11% από φυσικό αέριο και ανεμογεννήτριες). Μια σημαντική διαφορά της ανάλυσης με πιθανοτικό περιορισμό σε σύγκριση με την ντετερμινιστική περίπτωση είναι ότι η έμφαση δίδεται σε μεγάλο βαθμό στην μείωση της αβεβαιότητας και των κινδύνων για τις επενδύσεις και συνεπώς τεχνολογικές επιλογές υψηλής αβεβαιότητας και μεγάλης μέσης απόδοσης (π.χ. φυσικό αέριο) δεν προτιμώνται καθόλου.



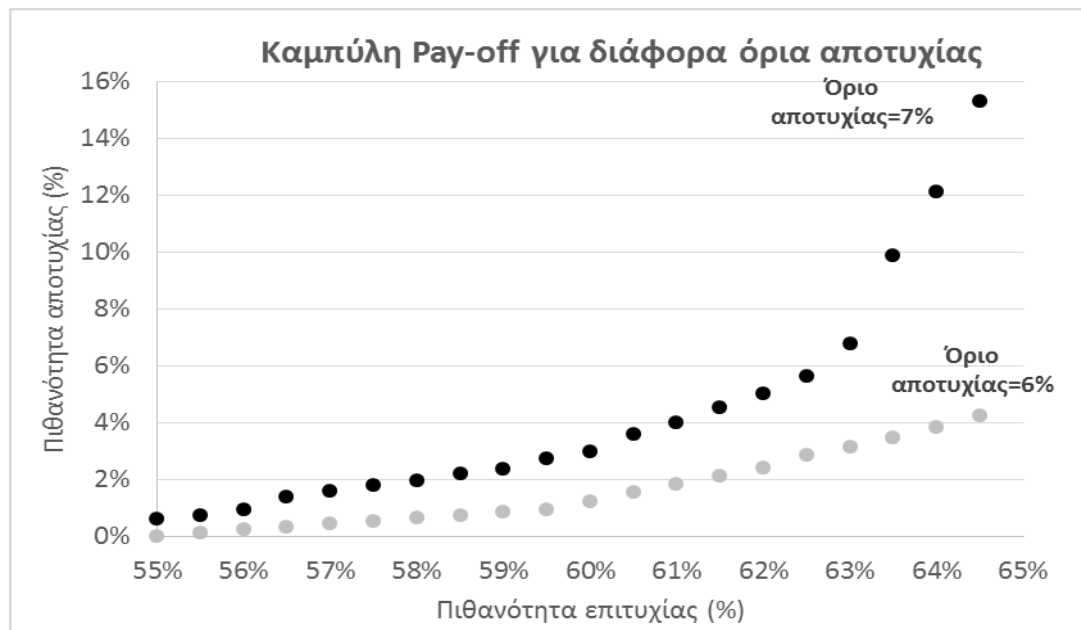
Γράφημα 5-6: Καμπύλη ray-off που απεικονίζει την πιθανότητα αποτυχίας επίτευξης ποσοστού απόδοσης 6% σαν συνάρτηση της πιθανότητας το ποσοστό απόδοσης της επένδυσης να είναι τουλάχιστον 8.5% (από το πρόβλημα ελαχιστοποίησης κινδύνου)



Γράφημα 5-7: Βέλτιστο χαρτοφυλάκιο επενδύσεων όταν το όριο αποτυχίας είναι 6% (όπως προκύπτει από το πρόβλημα ελαχιστοποίησης κινδύνου)

Στο παρακάτω γράφημα παρουσιάζονται οι καμπύλες ray-off μεταξύ της πιθανότητας επιτυχίας της επένδυσης (απόδοση μεγαλύτερη από 8.6% ετησίως) και

της πιθανότητας αποτυχίας η απόδοση της επένδυσης να είναι μεγαλύτερη από ένα συγκεκριμένο όριο; Στο συγκεκριμένο παράδειγμα μελετώνται τα όρια αποτυχίας 6% και 7%. Γενικά, παρατηρούμε ότι η μορφή των καμπυλών είναι γνησίως αύξουσα σε όλα τα ποσοστά αποτυχίας, καθώς όσο αυξάνεται ο περιορισμός στην πιθανότητα επιτυχίας, επιλέγονται τεχνολογίες με μεγαλύτερο μέσο ποσοστό απόδοσης αλλά και με υψηλότερη αβεβαιότητα, και συνεπώς αυξάνονται οι πιθανότητες επιτυχίας. Όπως είναι λογικό το ποσοστό «αποτυχίας» αυξάνεται επίσης όσο μεγαλύτερο είναι το όριο που τίθεται, π.χ. όταν θεωρείται περιορισμός στην πιθανότητα επιτυχίας 58%, τότε οι πιθανότητες αποτυχίας ικανοποίησης απόδοσης 6% εκτιμώνται σε 0.6%, ενώ για απόδοση 7% η πιθανότητα αποτυχίας αυξάνεται σε 2%. Οι καμπύλες για τα δυο όρια αποτυχίας αποκλίνουν καθώς ο πιθανοτικός περιορισμός αυξάνεται. Συγκεκριμένα, όταν ο ελάχιστος περιορισμός «επιτυχίας» τίθεται στο 62% τότε υπάρχουν 2.5% περισσότερες πιθανότητες αποτυχίας όταν το όριο τίθεται στο 7% (σε σύγκριση με την περίπτωση όπου το όριο είναι 6%), ενώ όταν ο πιθανολογικός περιορισμός τίθεται ίσος με 65%, τότε η διαφορά μεταξύ των δυο καμπυλών αυξάνεται σε περισσότερο από 11% (15.3% έναντι 4.3% όταν εξετάζεται ο περιορισμός του 6% ετήσια απόδοση). Τέλος, όσον αφορά το βέλτιστο χαρτοφυλάκιο επενδύσεων στην ηλεκτροπαραγωγή, όσο υψηλότερος είναι ο περιορισμός «επιτυχίας» τόσο γρηγορότερη και μεγαλύτερη σε έκταση είναι η υποκατάσταση της πυρηνικής ενέργειας (χαμηλότερη αβεβαιότητα) με συνδυασμούς τεχνολογιών φυσικού αερίου, CCS και ανεμογεννητριών.



Γράφημα 5-8: Πιθανότητα αποτυχίας σαν συνάρτηση πιθανότητας επιτυχίας της επένδυσης (όπως προκύπτει από το πρόβλημα ελαχιστοποίησης κινδύνου για διάφορα όρια αποτυχίας)

Κεφάλαιο 6

6. Αιτιοκρατική ανάλυση

6.1 Σκοπός της ανάλυσης

Το μοντέλο ΠΡΟΜΗΘΕΑΣ έχει χρησιμοποιηθεί εκτενώς για την μελέτη και την ποσοτική ανάλυση του παγκόσμιου ενεργειακού συστήματος, την διαμόρφωση των διεθνών τιμών των ορυκτών καυσίμων [114], την αξιολόγηση ενεργειακών και κλιματικών πολιτικών [86], την διεξόδυση νέων τεχνολογιών με χαμηλές ή μηδενικές εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα [127] και τις επιπτώσεις διαφορετικών υποθέσεων για τα κοιτάσματα υδρογονανθράκων στο παγκόσμιο ενεργειακό σύστημα [156]. Η παρούσα ενότητα περιγράφει τα εναλλακτικά σενάρια που ποσοτικοποιήθηκαν με τη χρήση της ντετερμινιστικής έκδοσης του μοντέλου, στην οποία γίνεται η υπόθεση ότι όλες οι εξωγενείς μεταβλητές, οι παράμετροι και οι ελαστικότητες έχουν πάρει την μέση τους τιμή (την μέση τιμή της κατανομής πιθανοτήτων τους), οι όροι σφάλματος των εξισώσεων είναι μηδέν και δεν εκτελείται στοχαστική ανάλυση. Συνεπώς το μοντέλο λειτουργεί σαν παγκόσμιο ντετερμινιστικό μοντέλο προσομοίωσης του ενεργειακού συστήματος, παρόμοια με το μοντέλο της IEA World Energy Model (WEM) [37] και το POLES [39], τα οποία έχουν εκτενώς χρησιμοποιηθεί σε μια σειρά από σημαντικές μελέτες για την ανάλυση των τάσεων του παγκόσμιου ενεργειακού συστήματος.

Η ανάλυση του κεφαλαίου 6 της παρούσας διατριβής αναλύει τα αποτελέσματα του μοντέλου σε μια σειρά από εναλλακτικά σενάρια, με σκοπό να εξεταστούν οι ιδιότητες, τα αποτελέσματα και η συμπεριφορά του μοντέλου σε διαφοροποίηση εξωτερικών παραμέτρων, υποθέσεων (για τα κοιτάσματα καυσίμων) και πολιτικών (φόρος άνθρακα, πολιτικές εξοικονόμησης ενέργειας και προώθησης ΑΠΕ). Ο σκοπός της ανάλυσης είναι να δοκιμαστεί η αξιοπιστία του μοντέλου σε εναλλακτικές υποθέσεις και πολιτικές. Η ενότητα 6.2 αναλύει το σενάριο αναφοράς το οποίο αποτελεί το βασικό σενάριο τάσεων σε σχέση με το οποίο συγκρίνονται τα εναλλακτικά σενάρια. Ακολούθως, η ενότητα 6.3 περιγράφει δυο σενάρια με διαφορετικές υποθέσεις σχετικά με τα κοιτάσματα των υδρογονανθράκων, οι οποίες επηρεάζουν τις διεθνείς τιμές των καυσίμων και την εξέλιξη του παγκόσμιου ενεργειακού συστήματος. Στην

ενότητα 6.4 μελετώνται οι συνέπειες μιας μονομερούς πολιτικής μείωσης των εκπομπών από την ΕΕ, ενώ η ενότητα 6.5 εξετάζει τις επιπτώσεις μιας παγκόσμιας προσπάθειας μετριασμού της κλιματικής αλλαγής στη ζήτηση και παραγωγή ενέργειας, στο μείγμα καυσίμων που χρησιμοποιείται, στην δομή της ηλεκτροπαραγωγής και στις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα. Τέλος, η ενότητα 6.6 μελετά τις επιπτώσεις όταν υπάρχει αβεβαιότητα για τις κλιματικές πολιτικές μέχρι το 2030.

6.2 Το σενάριο αναφοράς

Ο σκοπός του σεναρίου αναφοράς (Reference scenario) που αναπτύχθηκε με τον PROMHΘΕΑ είναι η ποσοτικοποίηση της εξέλιξης της παγκόσμιας προσφοράς και ζήτησης και ενέργειας σύμφωνα με τις βασικές υποθέσεις αναφοράς. Το σενάριο αναφοράς κρατά μια επιφυλακτική στάση σε σχέση με τις μελλοντικές εξελίξεις και ιδίως σε σχέση με τις πολιτικές για την ενέργεια και το κλίμα και την ανάπτυξη των τεχνολογιών χαμηλών εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα. Σε αυτό ακολουθεί την διεθνώς αποδεκτή πρακτική στην βιβλιογραφία [10, 60] της χρησιμοποίησης του σεναρίου Reference ως σημείο αναφοράς σε σχέση με το οποίο συγκρίνονται τα σενάρια πολιτικής. Έτσι, το σενάριο αναφοράς δεν είναι "πρόβλεψη" της εξέλιξης του παγκόσμιου ενεργειακού συστήματος για την περίοδο 2015-2050, αλλά μια συνεκτική, ρεαλιστική και συναφής πολιτικά «προέκταση» των σημερινών τάσεων, που λαμβάνει υπόψη τις ήδη αποφασισμένες πολιτικές. Συνολικά, το σενάριο αναφοράς βασίζεται σε προηγούμενες συμπεριφορές (ιστορικά δεδομένα), σε συνεπείς κοινωνικοοικονομικές προβλέψεις, σε εισαγωγή πολιτικών και bottom-up εκτιμήσεις (πχ εξέλιξη κόστους ενεργειακών τεχνολογιών, αποθέματα υδρογονανθράκων) έως το 2050.

6.2.1 Δημογραφία, μακρο-οικονομία και κλιματικές πολιτικές

Οι υποθέσεις σχετικά με τις δημογραφικές και οικονομικές μεταβλητές αποτελούν τις βασικές κινητήριες δυνάμεις της εξέλιξης της ζήτησης ενέργειας και των προκαλούμενων εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα. Οι προβλέψεις για τον παγκόσμιο πληθυσμό προέρχονται από το σενάριο μέτριας εξέλιξης της γονιμότητας των Προοπτικών του παγκόσμιου πληθυσμού του ΟΗΕ 2012 [85]. Ο ρυθμός αύξησης του παγκόσμιου πληθυσμού προβλέπεται να είναι θετικός μέχρι το 2050, αλλά να μειώνεται συνεχώς κατά την διάρκεια της περιόδου. Η Ινδία αναμένεται να είναι η πιο πυκνοκατοικημένη χώρα με 1.7 δισεκατομμύρια κατοίκους το 2050, ξεπερνώντας την Κίνα μετά το 2020. Το σενάριο αναφοράς προβλέπει βιώσιμη οικονομική ανάπτυξη σε παγκόσμια κλίμακα, με μέση παγκόσμια αύξηση του ΑΕΠ κατά 3.5% ετησίως την περίοδο 2010-2050, λόγω της ταχείας ανάπτυξης στις ραγδαία αναπτυσσόμενες οικονομίες (κυρίως Κίνα και Ινδία). Οι μακροοικονομικές προβλέψεις έχουν εισαχθεί εξωγενώς στο σενάριο αναφοράς του PROMHΘΕΑ και ακολουθούν τις δημοσιευμένες προβλέψεις του ΔΝΤ για την περίοδο 2010-2020 [88]. Μετά το 2020, η αύξηση της συνολικής οικονομικής δραστηριότητας είναι σε γενικές γραμμές σύμφωνη με την πιο πρόσφατη έκδοση της μελέτης «Economic Outlook» του ΟΟΣΑ [87, 131] και με τις υποθέσεις της ΔΟΕ [38, 86]. Για το σενάριο αναφοράς του PROMHΘΕΑ, οι βασικές

παραδοχές για τις προβλέψεις του ΑΕΠ είναι η μέτρια αύξηση του πληθυσμού, η μέση βελτίωση της συνολικής παραγωγικότητας και η ταχεία σύγκλιση μεταξύ των ανεπτυγμένων και των αναπτυσσόμενων οικονομιών. Ο Πίνακας 6-1 παρουσιάζει τις υποθέσεις για τους ετήσιους ρυθμούς αύξησης του ΑΕΠ στο σενάριο αναφοράς.

	2010-2020	2020-2030	2030-2040	2040-2050	2010-2050
EU	1.5%	1.5%	1.3%	1.3%	1.4%
NOAM	2.4%	1.9%	1.9%	1.8%	2.0%
WPAC	2.3%	1.7%	1.2%	1.1%	1.6%
CHN	9.2%	5.7%	3.0%	2.2%	5.0%
IND	7.9%	6.8%	5.7%	4.7%	6.3%
CIS	4.8%	2.9%	2.6%	1.8%	3.0%
EPROD	4.5%	3.9%	3.1%	2.2%	3.4%
EMRG	4.2%	3.7%	3.1%	2.8%	3.5%
RESTW	5.4%	5.4%	5.1%	4.9%	5.2%
WORLD	4.4%	3.8%	3.0%	2.7%	3.5%

Πίνακας 6-1: Προεκτάσεις για την αύξηση του ΑΕΠ μέχρι το 2050 (% ετήσια αύξηση) που χρησιμοποιούνται σαν είσοδος στο μοντέλο

Συγκεκριμένα, το σενάριο αναφοράς αντανακλά τις πρόσφατες προβλέψεις της DG ECFIN για το βραχυπρόθεσμο και το μεσοπρόθεσμο διάστημα και την Έκθεση της DG ECFIN για την δημογραφική γήρανση 2012 [130] για τον μακροπρόθεσμο ορίζοντα. Το σενάριο αναφοράς υποθέτει ανάκαμψη της ευρωπαϊκής οικονομίας από την τρέχουσα κρίση, που ακολουθείται από σταθερή (αλλά σχετικά χαμηλή) αύξηση του ΑΕΠ μεσοπρόθεσμα. Η αύξηση της οικονομικής δραστηριότητας στην Ευρωπαϊκή Ένωση αναμένεται είναι ακόμα χαμηλότερη μακροπρόθεσμα εξαιτίας της μείωσης του εργατικού δυναμικού και της επιβράδυνσης του ρυθμού αύξησης της παραγωγικότητας [114].

Το 2005, οι ανεπτυγμένες οικονομίες αντιπροσώπευαν τη μερίδα του λέοντος (πάνω από 58%) της παγκόσμιας οικονομικής δραστηριότητας (μετρούμενη σε PPPs € 05), ενώ η Κίνα αντιπροσώπευε μόλις το 10% του παγκόσμιου ΑΕΠ και η Ινδία το 5.4%. Σύμφωνα με το σενάριο αναφοράς, η ταχεία ανάπτυξη των μεγάλων αναδυόμενων οικονομιών σε συνδυασμό με την σχετικά αργή αύξηση του ΑΕΠ των ανεπτυγμένων θα μετατοπίσουν σταδιακά το σχετικό βάρος των περιοχών στην παγκόσμια οικονομία. Έτσι, το ποσοστό της Ευρώπης στο παγκόσμιο ΑΕΠ προβλέπεται να μειωθεί σημαντικά κατά τη διάρκεια της περιόδου πρόβλεψης (από 24% το 2005 σε 9.5% το 2050). Η ίδια τάση προβλέπεται για τις άλλες ανεπτυγμένες οικονομίες, καθώς το μερίδιο της Βόρειας Αμερικής στο παγκόσμιο ΑΕΠ προβλέπεται να μειωθεί από 24% το 2005 σε 12% το 2050. Έτσι, το συνολικό ποσοστό των ανεπτυγμένων οικονομιών στο παγκόσμιο ΑΕΠ αναμένεται να μειωθεί δραστικά από 58% το 2005 σε 26% το 2050, ενώ οι αναπτυσσόμενες οικονομίες της Κίνας και της Ινδίας θα αντιπροσωπεύουν το 41.5% της παγκόσμιας οικονομικής δραστηριότητας.

Μετά την αποτυχία της συνδιάσκεψης της Κοπεγχάγης το 2009 να θέσει δεσμευτικούς και φιλόδοξους στόχους μείωσης των εκπομπών άνθρακα σε παγκόσμιο επίπεδο, οι διεθνείς συνομιλίες κατέληξαν σε μια καινούργια προσπάθεια υιοθέτησης μιας παγκόσμιας συνθήκης, η οποία θα τεθεί σε ισχύ από το 2020 [3], η υλοποίηση της οποίας ωστόσο παραμένει αρκετά αβέβαιη. Συνεπώς, στο σενάριο αναφοράς, υλοποιείται η εφαρμογή των δεσμεύσεων χαμηλής φιλοδοξίας για την μείωση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα, όπως αποφασίστηκαν για την περίοδο μέχρι το 2020 στις συνδιασκέψεις στην Κοπεγχάγη και στο Κανκούν. Οι κλιματικοί στόχοι εισήχθησαν στο μοντέλο με την μορφή στόχων μείωσης στις εκπομπές άνθρακα (ή μείωσης της έντασης των εκπομπών ως προς το ΑΕΠ), ποσοστό των ΑΠΕ στην ηλεκτροπαραγωγή (ή στην συνολική ενεργειακή ζήτηση για την ΕΕ-28) και επέκταση της εγκατεστημένης ισχύος για τις ανεμογεννήτριες, την πυρηνική ενέργεια και τα φωτοβολταϊκά. Κατά την περίοδο 2020-2050, το σενάριο αναφοράς υποθέτει την συνεχιζόμενη βελτίωση της έντασης των εκπομπών άνθρακα ως προς ΑΕΠ σε παρόμοιο επίπεδο με την περίοδο πριν το 2020 [7] (ή ελαφρώς ενισχυμένη για τις περιοχές χωρίς φιλόδοξους κλιματικούς στόχους πριν το 2020). Ο Πίνακας 6-2 παρουσιάζει τους στόχους για τις μεγάλες οικονομίες, οι οποίες αθροιστικά αντιπροσωπεύουν το 80% των παγκόσμιων εκπομπών άνθρακα το 2005. Οι κλιματικοί στόχοι μοντελοποιούνται με την εισαγωγή των απαιτούμενων φόρων στο διοξείδιο του άνθρακα, πολιτικών εξοικονόμησης ενέργειας, προτύπων για τα καύσιμα στις μεταφορές καθώς και μέτρων διεύθυνσης των ΑΠΕ στην ηλεκτροπαραγωγή (πχ επιδοτήσεις, εγγυημένες τιμές κ.α.).

Περιοχή	Μείωση εκπομπών GHG 2005-2020	Μείωση έντασης εκπομπών 2005-2020	Μερίδιο ΑΠΕ στην ηλεκτροπαραγωγή το 2020	Εγκατεστημένη Ισχύς τεχνολογιών το 2020	Ετήσια Βελτίωση έντασης εκπομπών άνθρακα (2020-2050)
Ευρωπαϊκή Ένωση	-15.0%		20%20		3.0%
Κίνα		-45%	25%	Wind: 200 GW, Solar PV: 50 GW	3.3%
Ινδία		-25%		Wind: 20 GW, Solar PV: 10 GW	3.3%
Ιαπωνία	-1.0%			Wind: 5 GW, Solar PV: 28 GW	2.2%
ΗΠΑ	-5.0%		13%		2.5%
Ρωσία	+27%		4.5%		2.6%

Πίνακας 6-2: Υποθέσεις εισόδου για τις κλιματικές πολιτικές στο σενάριο αναφοράς

²⁰ Στην συνολική κατανάλωση ενέργειας

Το σενάριο αναφοράς του ΠΡΟΜΗΘΕΑ αντικατοπτρίζει σε μεγάλο βαθμό τις κυριότερες ενεργειακές και κλιματικές πολιτικές για την Ευρωπαϊκή Ένωση, όπως έχουν οριστεί στις Ευρωπαϊκές μελέτες για την μακροπρόθεσμη εξέλιξη του ενεργειακού συστήματος [1, 2]. Συγκεκριμένα, το σενάριο αναφοράς υποθέτει την πλήρη εφαρμογή του πακέτου κλίματος και ενέργειας για το 2020 και την επίτευξη των στόχων μείωσης των εκπομπών που καθορίζονται στην οδηγία ΣΕΔΕ (ETS) με γραμμική μείωση των δικαιωμάτων στους τομείς ETS μέχρι το 2050. Την περίοδο μετά το 2020, το σενάριο αναφοράς υποθέτει γραμμική ετήσια μείωση του ανώτατου ορίου των εκπομπών ETS (-1.74% ετησίως), περιορισμένο εξηλεκτρισμό των μεταφορών, περιορισμένη διείσδυση των τεχνολογιών CCS και σταδιακή κατάργηση της πυρηνικής ενέργειας στα κράτη μέλη της ΕΕ που έχουν υιοθετήσει αντίστοιχες πολιτικές.

6.2.2 Εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα

Στο σενάριο αναφοράς, οι παγκόσμιες εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα από την καύση ορυκτών καυσίμων²¹ προβλέπεται να αυξηθούν από τους 31.1 Gtn of CO₂-eq το 2010 σε 45.3 Gtn. το 2040 (Πίνακας 6-3), εξαιτίας της γρήγορης οικονομικής ανάπτυξης στις μεγάλες αναπτυσσόμενες οικονομίες (Κίνα, Ινδία, Βραζιλία) και του αυξανόμενου πληθυσμού, της αστικοποίησης και την άνοδο του βιοτικού επιπέδου σε άλλες αναδυόμενες περιοχές (Βόρεια Αφρική, Μέση Ανατολή, Νοτιοανατολική Ασία, Λατινική Αμερική). Στην διάρκεια της τελευταίας δεκαετίας της πρόβλεψης, οι παγκόσμιες εκπομπές προβλέπεται να μειωθούν στα επίπεδα των 42.5 Gtn το 2050, σαν αποτέλεσμα της επιβράδυνσης της σταδιακής οικονομικής ανάπτυξης, της αύξησης της ανταγωνιστικότητας των τεχνολογιών χαμηλού άνθρακα και της εντατικοποίησης των κλιματικών πολιτικών.

Με βάση το πλαίσιο αναφοράς, οι εκπομπές στην Κίνα θα αυξηθούν κατά 105% την περίοδο 2010-2040 εξαιτίας των υψηλών ρυθμών αύξησης του ΑΕΠ και της σχετικά υψηλής έντασης άνθρακα της ταχέως αυξανόμενης Κινεζικής παραγωγής (μεγάλο μερίδιο του άνθρακα στην συνολική ζήτηση ενέργειας). Η υλοποίηση του στόχου για βελτίωση της έντασης εκπομπών άνθρακα του ΑΕΠ (3.3% ετησίως) οδηγεί σε μαζικές υποκαταστάσεις στο ενεργειακό σύστημα μακριά από την καύση άνθρακα και αύξηση της διείσδυσης φυσικού αερίου, ΑΠΕ και τεχνολογιών CCS (μετά το 2035). Ο σταδιακός μετασχηματισμός του ενεργειακού συστήματος σε συνδυασμό με την επιβράδυνση της αύξησης του ΑΕΠ, την μείωση του πληθυσμού και την σχετική απο-βιομηχανοποίηση της Κινεζικής οικονομίας (μείωση της ενεργοβόρας βιομηχανικής παραγωγής στην συνολική οικονομική δραστηριότητα) οδηγούν σε μείωση των εκπομπών μετά το 2040.

Οι εκπομπές άνθρακα στις ανεπτυγμένες οικονομίες του ΟΟΣΑ προβλέπεται να μειωθούν κατά 36% την περίοδο 2010-2050 (από 11.9 σε 7.6 Gtn.). Στο σενάριο αναφοράς, το ποσοστό των οικονομιών του ΟΟΣΑ στις παγκόσμιες εκπομπές μειώνεται από 38% το 2010 σε μόλις 18% το 2050 σαν αποτέλεσμα της σχετικά χαμηλής αύξησης του ΑΕΠ και (κυρίως) των φιλόδοξων πολιτικών μετριασμού των εκπομπών άνθρακα

²¹ Ο ΠΡΟΜΗΘΕΑΣ δεν περιέχει τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα από την χρήση γης και από τις μη ενεργειακές βιομηχανικές διεργασίες

και προώθησης των ΑΠΕ. Αντίθετα, το σενάριο αναφοράς οδηγεί σε αύξηση του αθροιστικού ποσοστού της Κίνας και της Ινδίας στις παγκόσμιες εκπομπές (από 30% το 2010 σε 46% το 2050), ενώ οι λιγότερο ανεπτυγμένες περιοχές αποτελούν το 24% των παγκόσμιων εκπομπών το 2050. Τα παραπάνω σημαίνουν ότι αν η διεθνής κοινότητα θέλει να επιτύχει τον μετριασμό της κλιματικής αλλαγής, οι αναπτυσσόμενες περιοχές πρέπει να μειώσουν τις εκπομπές άνθρακα δραστικά σε επίπεδα χαμηλότερα από το σενάριο αναφοράς, καθώς το ποσοστό τους στις παγκόσμιες εκπομπές αναμένεται να αυξηθεί σημαντικά μέχρι το 2050 [86].

	2010	2020	2030	2040	2050	2010-2050
EU	3.8	3.5	3.1	2.8	2.5	128.5
NOAM	6.0	5.7	5.2	4.8	3.8	211.1
WPAC	2.1	2.1	2.0	1.7	1.3	76.8
CHN	7.8	11.8	15.0	16.0	14.2	554.5
IND	1.7	2.8	4.1	5.8	5.5	170.9
CIS	2.7	2.6	2.7	2.8	2.6	109.4
MENA	2.1	2.6	3.0	3.2	3.4	118.3
EMRG	3.2	4.0	4.9	5.6	5.9	195.9
RESTW	1.2	1.5	1.9	2.3	2.8	78.9
WORLD	31.1	37.0	42.5	45.3	42.5	1664.5

Πίνακας 6-3: Προέκταση σεναρίου αναφοράς του μοντέλου για εκπομπές CO₂ (σε Gtn CO₂)

Στο σενάριο αναφοράς, οι μέσες παγκόσμιες εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα ανά κάτοικο προβλέπεται να αυξηθούν ελαφρώς από 4.5 tn CO₂ ανά κάτοικο το 2010 σε 5.1 tn CO₂ ανά κάτοικο το 2040 πριν μειωθούν στα επίπεδα του 2010 (4.5 tn CO₂ ανά κάτοικο το 2050). Οι κατά κεφαλήν εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα προβλέπεται να μειωθούν στις ανεπτυγμένες οικονομίες κατά 45% το 2050 από τα επίπεδα του 2010. Οι κατά κεφαλήν εκπομπές άνθρακα στην Ευρώπη, φθάνουν τους 4.2 tn CO₂ ανά κάτοικο το 2050 (μικρότερες από τον παγκόσμιο μέσο όρο). Από την άλλη πλευρά, η Κίνα καταγράφει μια σημαντική αύξηση στις κατά κεφαλήν εκπομπές, οι οποίες προβλέπονται να φτάσουν τους 10.5 tn CO₂ ανά κάτοικο το 2050, εξαιτίας της ταχείας οικονομικής ανάπτυξης και της εκτεταμένης χρήσης του άνθρακα για την ικανοποίηση των αυξανόμενων απαιτήσεων ενέργειας και ηλεκτροπαραγωγής. Η μεγαλύτερη ποσοστιαία αύξηση στις κατά κεφαλήν εκπομπές άνθρακα προβλέπεται για την Ινδία (+140% μεταξύ 2010-2050), σαν αποτέλεσμα των καλύτερων συνθηκών διαβίωσης, των γρήγορων ρυθμών αύξησης του ΑΕΠ και της σταδιακής εξάλειψης της ενεργειακής φτώχειας (π.χ. πρόσβαση σε ηλεκτρική ενέργεια για όλον τον πληθυσμό).

6.2.3 Ζήτηση Ενέργειας και Δομή Ηλεκτροπαραγωγής

Το σενάριο αναφοράς προβλέπει ότι η παγκόσμια πρωτογενής κατανάλωση ενέργειας θα αυξηθεί από περίπου 13 Gtoe το 2010 σε 23 Gtoe το 2050, το οποίο αντιστοιχεί σε μια μέση ετήσια αύξηση 1.44%, η οποία είναι παρεμφερής με τις προβλέψεις της ΔΟΕ [38, 8]. Ο παγκόσμιος δείκτης ενεργειακής έντασης του ΑΕΠ (ζήτηση ενέργειας ανά μονάδα ΑΕΠ) προβλέπεται να μειωθεί κατά 2% ανά έτος

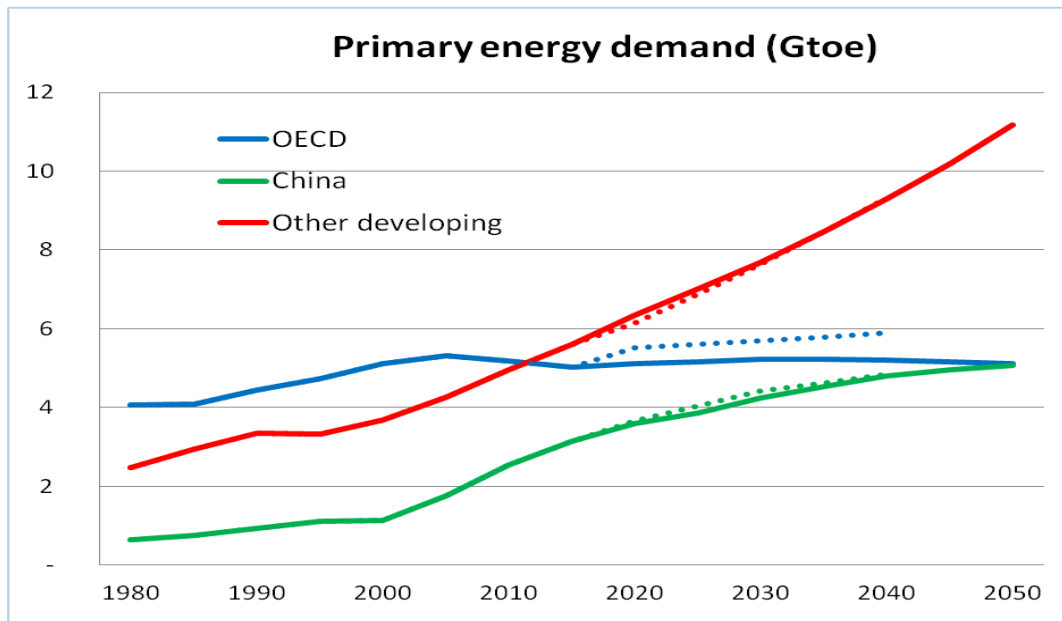
οδηγώντας σε (σχετική) από-συσχέτιση της ζήτησης ενέργειας από την αύξηση του ΑΕΠ σε όλες τις περιοχές του μοντέλου. Η βελτίωση του δείκτη ενεργειακής έντασης προβλέπεται να είναι διαφορετική ανά περιοχή και εξαρτάται από:

- Την δυνατότητα για βελτιώσεις στην απόδοση του ενεργειακού συστήματος
- Την μεταβολή της διάρθρωσης της οικονομίας
- Το επίπεδο του δείκτη ενεργειακής απόδοσης το έτος βάσης 2010
- Τις δυνατότητες υποκατάστασης προς ενεργειακά αποδοτικές τεχνολογίες

Σύμφωνα με τα παραπάνω, η Κίνα και η Ινδία προβλέπεται να έχουν μεγαλύτερη ετήσια βελτίωση της ενεργειακής έντασης του ΑΕΠ σε σύγκριση με τον παγκόσμιο μέσο όρο, εξαιτίας των σχετικά μεγάλων δυνατοτήτων για υποκαταστάσεις στο ενεργειακό σύστημα υπέρ αποδοτικών τεχνολογιών (πχ. εξηλεκτρισμός στην βιομηχανία, μείωση κατανάλωσης της μη αποδοτικής «παραδοσιακής» βιομάζας στα νοικοκυριά, κ.α.). Στη Βόρεια Αμερική, ο δείκτης ενεργειακής έντασης είναι αρκετά υψηλότερος το 2010 σε σχέση με τις υπόλοιπες οικονομίες του ΟΟΣΑ και συνεπώς το ενεργειακό σύστημα της Β. Αμερικής έχει σημαντικότερες δυνατότητες ενεργειακής εξοικονόμησης (2% προβλεπόμενη ετήσια βελτίωση) σε σχέση με τις υπόλοιπες ανεπτυγμένες οικονομίες (1.5% μείωση). Από την άλλη πλευρά, η σταδιακή μείωση των επιδοτήσεων στην κατανάλωση ενέργειας σε αρκετές χώρες στην Μέση Ανατολή και Βόρεια Αφρική [133, 134] οδηγεί σε ετήσια αύξηση της ενεργειακής απόδοσης 1.5%.

Το παρακάτω γράφημα παρουσιάζει την εξέλιξη της πρωτογενούς ζήτησης ενέργειας στο σενάριο αναφοράς σε τρεις μεγάλες περιοχές (ΟΟΣΑ, Κίνα και αναπτυσσόμενες οικονομίες). Παρατηρούμε την σταδιακή αλλαγή στην δυναμική των διαφορετικών περιοχών, με την σχετική σταθεροποίηση της ζήτησης στις αναπτυσσόμενες οικονομίες του ΟΟΣΑ (εξαιτίας των πολιτικών αύξησης της ενεργειακής απόδοσης και υποκαταστάσεων προς πιο αποδοτικά καύσιμα) και την ραγδαία αύξηση της ζήτησης ενέργειας από τις αναπτυσσόμενες οικονομίες. Παρά την σημαντική επιβράδυνση μετά το 2030, η πρωτογενής ζήτηση ενέργειας στην Κίνα προβλέπεται να φτάσει την συνολική κατανάλωση από τις αναπτυσσόμενες χώρες του ΟΟΣΑ το 2050. Οι υπόλοιπες αναπτυσσόμενες οικονομίες προβλέπεται να είναι οι κινητήριες δυνάμεις της αύξησης της παγκόσμιας ζήτησης ιδιαίτερα μετά το 2030 και συνεπώς το ποσοστό τους στην κατανάλωση ενέργειας αυξάνεται από 35% το 2005 σε 50% το 2050. Οι διακεκομμένες γραμμές παριστάνουν το σενάριο τρεχουσών πολιτικών της ΔΟΕ [38].

Παρότι τα ορυκτά καύσιμα εξακολουθούν το 2050 να αποτελούν την κύρια πηγή ενέργειας παγκοσμίως, το ποσοστό τους στην παγκόσμια πρωτογενή ζήτηση ενέργειας προβλέπεται να μειωθεί από 82% το 2010 σε 72% το 2050, εξαιτίας κυρίως των συνεχών αυξήσεων στις διεθνείς τιμές των υδρογονανθράκων, των κλιματικών πολιτικών και της μείωσης του κόστους των ΑΠΕ (ιδίως του κόστους επένδυσης).

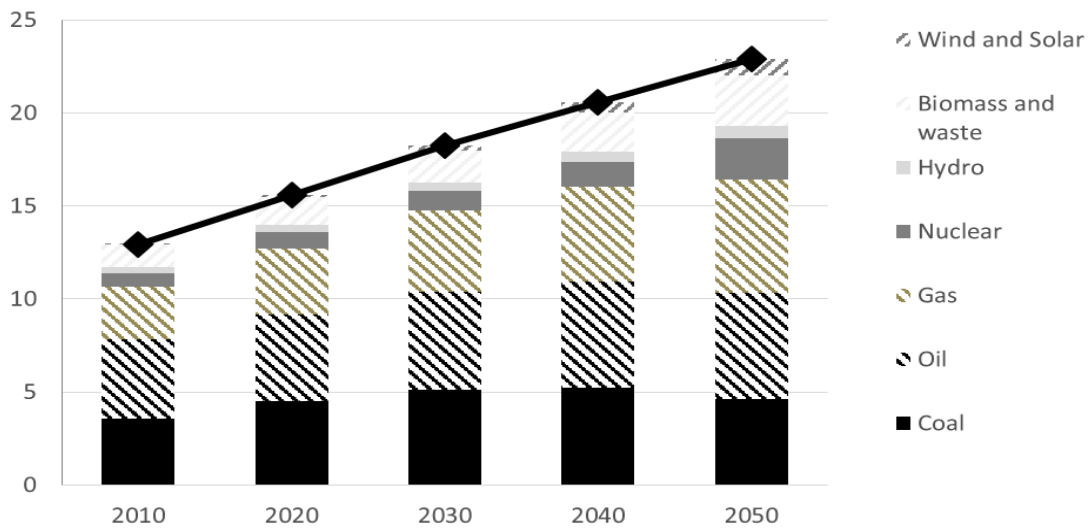


Γράφημα 6-1: Προέκταση του μοντέλου για την πρωτογενή ζήτηση ενέργειας (σε Gtoe). Οι διακεκομμένες γραμμές παριστάνουν το σενάριο της ΔΟΕ-2013

Το ποσοστό του άνθρακα προβλέπεται να αυξηθεί μέχρι το 2020 σαν αποτέλεσμα της ραγδαίας αύξησης της ζήτησης ηλεκτρισμού στην Κίνα και στην Ινδία (η οποία καλύπτεται κυρίως με τεχνολογίες άνθρακα). Στη συνέχεια όμως η υλοποίηση κλιματικών πολιτικών, η μαζική διείσδυση τεχνολογιών χαμηλού άνθρακα και η μείωση του σχετικού λόγου των τιμών φυσικού αερίου προς άνθρακα οδηγεί σε σημαντική μείωση του ποσοστού του άνθρακα στην ζήτηση ενέργειας από 28% το 2030 σε 20% το 2050. Το μερίδιο των τεχνολογιών μηδενικού άνθρακα (υδροηλεκτρική ενέργεια, πυρηνικά, βιομάζα, αιολική και ηλιακή ενέργεια) προβλέπεται να αυξηθεί σημαντικά από 17.5% το 2010 σε 28% το 2050 υποκαθιστώντας κατά ένα μέρος την καύση υδρογονανθράκων κυρίως στην και στον τομέα των μεταφορών (βιοκαύσιμα).

Παρά την σταθερή τάση για αποβιομηχανοποίηση όσο αυξάνεται το ΑΕΠ, η αρκετά μεγαλύτερη ενεργειακή ένταση ανά μονάδα προστιθέμενης αξίας που χαρακτηρίζει τις βιομηχανικές χρήσεις σημαίνει ότι το μερίδιο της βιομηχανίας στην τελική παγκόσμια ζήτηση ενέργειας θα αυξηθεί από 30% το 2010 σε 32% το 2050. Αύξηση παρατηρείται και στο ποσοστό των μεταφορών κυρίως λόγω της ραγδαίας αύξησης του στόλου των επιβατικών αυτοκινήτων στις αναπτυσσόμενες οικονομίες παράλληλα με την καλύτερευση του βιοτικού τους επιπέδου (Πίνακας 6-4).

Παγκόσμια πρωτογενής ζήτηση ενέργειας (σε Gtoe)



Γράφημα 6-2: Προέκταση του μοντέλου για την παγκόσμια ζήτηση ενέργειας (σε Gtoe)

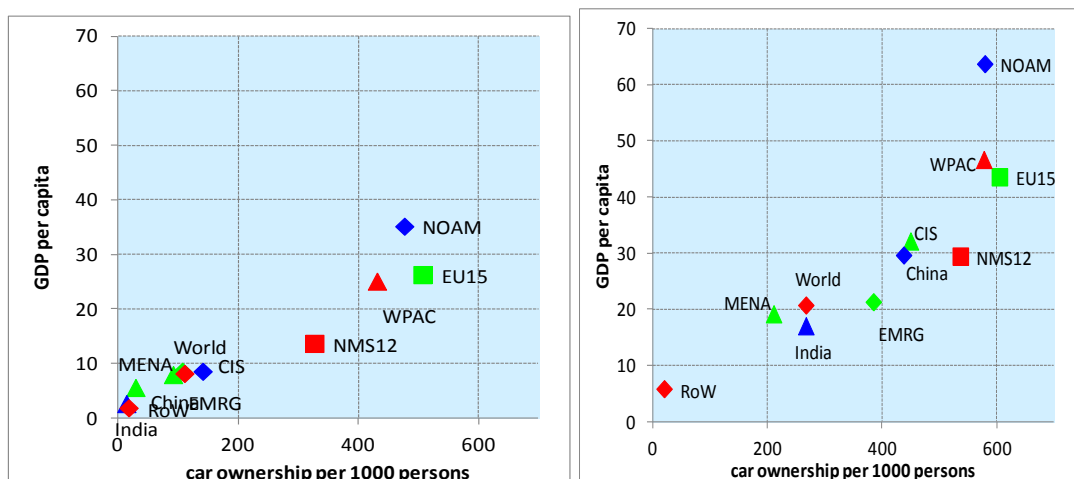
	2010	2020	2030	2050
Τελική ζήτηση ενέργειας	8403	10195	12057	15427
Ανά τομέα (%)				
Βιομηχανία	30%	32%	32%	32%
Νοικοκυριά	36%	33%	31%	30%
Μεταφορές	25%	26%	27%	27%
Μη ενεργειακές χρήσεις	9%	10%	10%	11%
Ανά καύσιμο (%)				
Άνθρακας & λιγνίτης	13%	12%	11%	8%
Πετρελαϊκά προϊόντα	40%	38%	38%	34%
Φυσικό αέριο	16%	17%	18%	18%
Ηλεκτρική ενέργεια	18%	20%	22%	28%
ΑΠΕ (βιομάζα)	13%	12%	12%	12%

Πίνακας 6-4: Προέκταση του μοντέλου στο σενάριο αναφοράς για την εξέλιξη της παγκόσμιας τελικής ζήτησης ενέργειας ανά τομέα και ανά καύσιμο την περίοδο 2010-2050 (σε Mtoe και ποσοστά)

Όσον αφορά την διάρθρωση της τελικής ενεργειακής κατανάλωσης ανά καύσιμο, το κύριο χαρακτηριστικό του σεναρίου αναφοράς είναι ο εξηλεκτρισμός της ενεργειακής ζήτησης (δηλαδή η αύξηση του ποσοστού του ηλεκτρισμού στην τελική ενεργειακή κατανάλωση), το οποίο οφείλεται σε υποκαταστάσεις στην βιομηχανία, στον σταδιακό εξηλεκτρισμό των μεταφορών και στην ταχεία διείσδυση των ηλεκτρικών συσκευών στα νοικοκυριά στις αναπτυσσόμενες περιοχές. Η μεγάλη αβεβαιότητα όσον αφορά την κατανάλωση ενέργειας στον τομέα των μεταφορών προκύπτει από την εξέλιξη του ποσοστού ιδιοκτησίας των επιβατικών αυτοκινήτων στις διάφορες περιοχές (Γράφημα 6-3). Το 2010 οι αναπτυσσόμενες περιοχές είχαν

πολύ χαμηλά ποσοστά ιδιοκτησίας αυτοκινήτων [135], με την Κίνα να έχει 45 αυτοκίνητα ανά χίλιους κατοίκους και την Ινδία μόλις 12. Οι τάσεις του ποσοστού ιδιοκτησίας παριστάνονται με σιγμοειδείς καμπύλες διείσδυσης, που προσομοιώνουν τα αποτελέσματα «απογειώσης» και «κορεσμού» τα οποία εξαρτώνται κυρίως από την εξέλιξη του κατά κεφαλήν ΑΕΠ. Εξαιτίας των φαινομένων κορεσμού, το ποσοστό ιδιοκτησίας στις αναπτυγμένες οικονομίες προβλέπεται να αυξηθεί σε περιορισμένο βαθμό από 0.5 σε περίπου 0.6 αυτοκίνητα ανά κάτοικο κατά την περίοδο 2010-2050. Από την άλλη πλευρά, η ραγδαία οικονομική ανάπτυξη, η τάση αστικοποίησης καθώς και η βελτίωση στο βιοτικό επίπεδο των αναπτυσσόμενων οικονομιών οδηγεί το μέσο ποσοστό ιδιοκτησίας από τα 63 αυτοκίνητα ανά χίλιους κατοίκους το 2010 στα 385 το 2050. Το διάγραμμα δείχνει την μεγάλη συσχέτιση μεταξύ του κατά κεφαλήν ΑΕΠ και του στόλου των αυτοκινήτων το 2010 και το 2050. Σε παγκόσμιο επίπεδο, ο στόλος των επιβατικών αυτοκινήτων προβλέπεται να αυξηθεί από 766 εκατομμύρια το 2010 σε 2.73 δισεκατομμύρια το 2050, δηλαδή μέση ετήσια αύξηση 3.2% παρά τα φαινόμενα κορεσμού στις αναπτυγμένες οικονομίες; η προβολή του ΠΡΟΜΗΘΕΑ είναι συνεπής με τις πιο σημαντικές αναλύσεις του παγκόσμιου ενεργειακού συστήματος [7, 10, 13,145].

Τα υβριδικά αυτοκίνητα αποτελούν σήμερα το 2% του στόλου στις οικονομίες του ΟΟΣΑ, διεισδύουν μαζικά μετά το 2020 και το ποσοστό τους στον παγκόσμιο στόλο επιβατικών αυτοκινήτων φτάνει το 35% το 2050. Από την άλλη πλευρά, τα plug-in υβριδικά και τα αμιγώς ηλεκτρικά οχήματα που καθιστούν αναγκαία την ανάπτυξη εκτεταμένων υποδομών επαναφόρτισης των μπαταριών εμφανίζονται μετά το 2030 και αποτυγχάνουν να έχουν μεγάλη διείσδυση μέχρι το 2050. Το μερίδιο των βιοκαυσίμων στην παγκόσμια κατανάλωση πετρελαιοειδών στις οδικές μεταφορές αυξάνεται συνεχώς και φτάνει το 10.5% το 2050. Σύμφωνα με την προβολή αναφοράς, η διείσδυση των βιοκαυσίμων είναι υψηλότερη στις περιοχές με στοχευμένες πολιτικές π.χ. στη Βόρεια και στην Λατινική Αμερική όπου το ποσοστό της κατανάλωσης βιοκαυσίμων είναι διπλάσιο από τον παγκόσμιο μέσο φτάνοντας το 20% το 2050.



Γράφημα 6-3: Διάγραμμα του ποσοστού ιδιοκτησίας επιβατικών αυτοκινήτων και του ΑΕΠ ανά κάτοικο στις περιοχές του μοντέλου το 2010 (αριστερά) και προέκταση αναφοράς το 2050 (δεξιά)

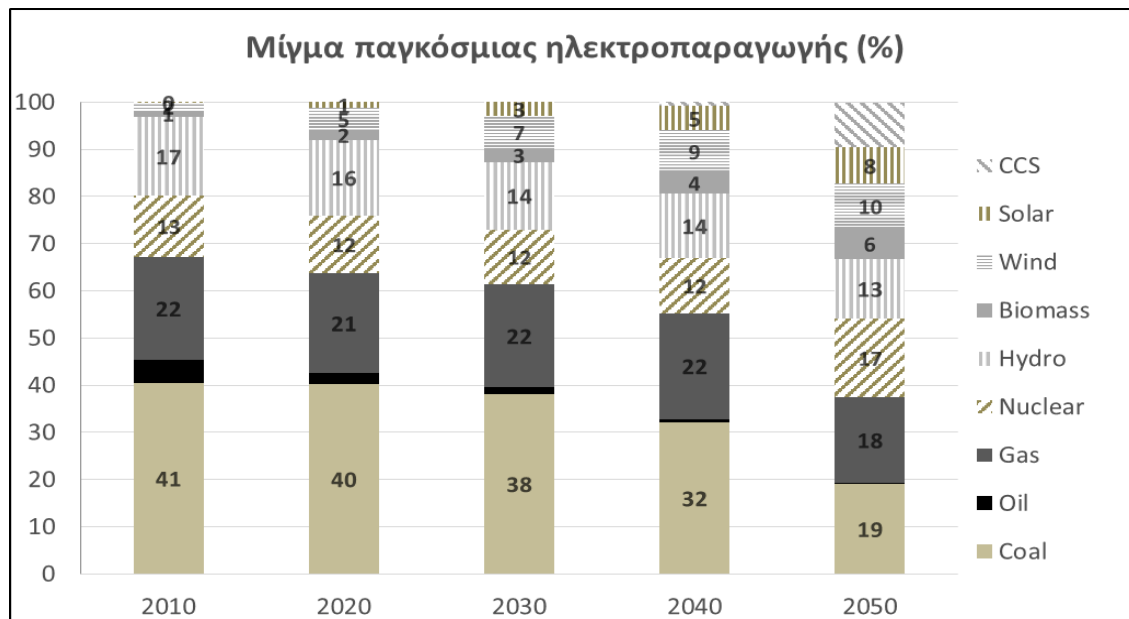
Ο συνεχής εξηλεκτρισμός της βιομηχανίας, η ραγδαία επέκταση των ηλεκτρικών συσκευών στον οικιακό τομέα και η σταδιακή διείσδυση των ηλεκτρικών αυτοκινήτων οδηγεί σε μεγαλύτερες ανάγκες για παγκόσμια ηλεκτροπαραγωγή, η οποία προβλέπεται να αυξηθεί με ετήσιο ρυθμό 2.3% την περίοδο 2010-2050 (από 21.400 TWh το 2010 σε περίπου 54.000 TWh το 2050). Ο ρυθμός αύξησης προβλέπεται να είναι μικρότερος στις ανεπτυγμένες οικονομίες εξαιτίας κυρίως των φαινομένων κορεσμού. Αντίθετα, στις αναπτυσσόμενες οικονομίες η αύξηση προβλέπεται να είναι 3.3% ετησίως την περίοδο 2010-2050, η κάλυψη της οποίας απαιτεί μεγάλης κλίμακας επέκταση της εγκατεστημένης ισχύος και υψηλές επενδύσεις σε έργα υποδομών.

Το σενάριο αναφοράς οδηγεί σε αυξημένη διείσδυση των τεχνολογιών χαμηλών και μηδενικών εκπομπών άνθρακα στο μίγμα ηλεκτροπαραγωγής, εξαιτίας της συνεχούς βελτίωσης της οικονομικής ανταγωνιστικότητάς τους μέχρι το 2050 σε σύγκριση τις συμβατικές τεχνολογίες που βασίζονται στην καύση υδρογονανθράκων (εισαγωγή φόρου άνθρακα, αυξήσεις στις διεθνείς τιμές των ορυκτών καυσίμων, μείωση κόστους κεφαλαίου των ΑΠΕ). Συνεπώς το μερίδιο των ΑΠΕ στην παγκόσμια παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας αναμένεται σχεδόν να διπλασιαστεί κατά την περίοδο προβολής (από 19% το 2005 σε 37% το 2050). Το ποσοστό τους αναμένεται να είναι ακόμη υψηλότερο στην περιοχή της ΕΕ και ανέρχεται σε 53% το 2050, εξαιτίας των φιλόδοξων πολιτικών προώθησης των ΑΠΕ και του στόχου για 20% συμμετοχή των ΑΠΕ στην ακαθάριστη τελική ζήτηση ενέργειας το 2020. Το μερίδιο των ΑΠΕ στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας προβλέπεται να φτάσει το 41% στον υπόλοιπο κόσμο (κυρίως εξαιτίας της υδροηλεκτρικής ενέργειας στην Α. Αμερική και στην Αφρική), 36% στη Βόρεια Αμερική, 35% στην περιοχή του ΟΟΣΑ Ειρηνικού και 31% στην Κίνα το 2050. Το σενάριο αναφοράς οδηγεί σε ραγδαία αύξηση των ΑΠΕ στην περιοχή της Μ. Ανατολής και Β. Αφρικής εξαιτίας της τεράστιας ηλιακής και αιολικής δυναμικότητας.

Η σχετικά περιορισμένη δυναμικότητα για νέα υδροηλεκτρικά εργοστάσια στις περισσότερες περιοχές συνδυασμένη με την ταχεία αύξηση της παγκόσμιας ζήτησης ηλεκτρισμού σημαίνει ότι το ποσοστό της υδροηλεκτρικής ενέργειας προβλέπεται να μειωθεί από το 17% το 2010 σε 13% το 2050. Από την άλλη πλευρά, η εγκατεστημένη ισχύς των ΑΠΕ διακοπτόμενης ισχύος προβλέπεται να αυξηθεί σημαντικά σε όλες τις περιοχές και το ποσοστό τους στην παγκόσμια ηλεκτροπαραγωγή θα αυξηθεί από μόλις 2% το 2010 σε 18% το 2050 (ΕΕ, Κίνα, Β. Αμερική). Η εισαγωγή των τιμών άνθρακα προκαλεί τη διείσδυση των τεχνολογιών CCS στην ηλεκτροπαραγωγή, οι οποίες μπορούν να ικανοποιήσουν το ηλεκτρικό φορτίο βάσης σε αντίθεση με τις ανεμογεννήτριες και τα φωτοβολταϊκά. Παρ' όλα αυτά, η τεχνολογική ανωριμότητα και οι ανησυχίες δημόσιας αποδοχής της υπόγειας αποθήκευσης του CO₂ συνεπάγονται ότι η μαζική ανάπτυξη του CCS μπορεί να πραγματοποιηθεί μόνο μετά το 2030. Το σενάριο αναφοράς οδηγεί σε σχετικά περιορισμένη διείσδυση των τεχνολογιών CCS στην ΕΕ (6.2% το 2050). Η διείσδυση του CCS αναμένεται να είναι υψηλότερη στη Βόρεια Αμερική (λόγω του σχετικά φθηνού αερίου), στην περιοχή του ΟΟΣΑ Ειρηνικού και στην Κίνα (σε συνδυασμό κυρίως με άνθρακα).

Η πιο σημαντική τάση στην δομή της ηλεκτροπαραγωγής είναι η μείωση του ποσοστού των ορυκτών καυσίμων (Γράφημα 6-4) από το 67% το 2010 σε 37% το 2050 (εξαιρώντας τις τεχνολογίες CCS). Αντίθετα, το φυσικό αέριο προβλέπεται να καλύπτει πάνω από 60% της ζήτησης ηλεκτρισμού στις περιοχές MENA και CIS, εξαιτίας των μεγάλων και σχετικά φτηνών κοιτασμάτων σε αυτές τις περιοχές. Το μερίδιο του άνθρακα προβλέπεται να μειωθεί ραγδαία ενώ τα περισσότερα εργοστάσια άνθρακα βρίσκονται στην Κίνα και στην Ινδία. Το παγκόσμιο ποσοστό του φυσικού αερίου διατηρείται στα επίπεδα του 22-23% εξαιτίας κυρίως των ανταγωνιστικών διεθνών τιμών και της υψηλής ενεργειακής απόδοσης των τεχνολογιών συνδυασμένου κύκλου. Περαιτέρω επέκταση της χρήσης πυρηνικής ενέργειας αναμένεται να είναι σχετικά περιορισμένη στις αναπτυγμένες οικονομίες εξαιτίας της αύξησης του κόστους επένδυσης σε νέες μονάδες παραγωγής (κυρίως μετά το ατύχημα της Φουκουσίμα) και των ανησυχιών δημόσιας αποδοχής. Σε παγκόσμιο επίπεδο, το ποσοστό της πυρηνικής ενέργειας προβλέπεται να αυξηθεί σταδιακά από 13% το 2010 σε 17% το 2050. Η περιοχή με το μεγαλύτερο ποσοστό πυρηνικής ενέργειας είναι ο Δυτικός Ειρηνικός, όπου το 29% της ζήτησης καλύπτεται από πυρηνικά το 2050 εξαιτίας των πρόσφατων πολιτικών της Ιαπωνίας για αναβίωση των πυρηνικών σταθμών μετά το 2016.

Γράφημα 6-4: Προέκταση του μοντέλου στο σενάριο αναφοράς για τα ποσοστά των τεχνολογιών στην παγκόσμια παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας την περίοδο 2010-2050



6.3 Σενάρια υψηλών-χαμηλών τιμών καυσίμων²²

Οι τιμές εισαγωγής ενέργειας στην Ευρώπη επηρεάζονται έντονα από εξελίξεις εκτός της ΕΕ: τα αποθέματα και τα κοιτάσματα των υδρογονανθράκων και οι προοπτικές εξόρυξης στην Ευρώπη είναι ιδιαίτερα χαμηλές (καθώς διαθέτει μόνο το

²² Η παρούσα ενότητα αποτελεί κομμάτι της δημοσιευμένης μελέτης [156].

3.3% των παγκόσμιων κοιτασμάτων ορυκτών καυσίμων, σύμφωνα με [116]). Επιπλέον, το σχιστολιθικό αέριο έχει περιορισμένες δυνατότητες να αναμορφώσει ριζικά τον ευρωπαϊκό ενεργειακό εφοδιασμό (όπως έχει ήδη γίνει στις ΗΠΑ), εξαιτίας των λίγων κοιτασμάτων και των περιορισμένων προοπτικών για μεγάλης κλίμακας παραγωγή, με εξαίρεση την Πολωνία, το Ηνωμένο Βασίλειο και την Ολλανδία. Ο σκοπός της παρούσας ανάλυσης είναι η ενδελεχής μελέτη εναλλακτικών υποθέσεων για τα παγκόσμια κοιτάσματα υδρογονανθράκων και η ποσοτικοποίηση της επίδρασής τους στις διεθνείς τιμές καυσίμων και στο παγκόσμιο ενεργειακό σύστημα.

6.3.1 Τιμές καυσίμων στο σενάριο αναφοράς

Ένα σημαντικό χαρακτηριστικό του PROMHΘEA είναι η ενδογενής πρόβλεψη της εξέλιξης των διεθνών τιμών των καυσίμων²³, οι οποίες εξαρτώνται από :

- Η παγκόσμια ζήτηση για πετρέλαιο, φυσικό αέριο και άνθρακα
- Η παγκόσμια παραγωγή από συμβατικά κοιτάσματα πετρελαίου και αερίου
- Τα μη συμβατικά αποθέματα υδρογονανθράκων και οι υποθέσεις για την εξόρυξη και την παραγωγή τους
- Οι προσθήκες στα βεβαιωμένα αποθέματα υδρογονανθράκων εξαιτίας των τεχνικά και οικονομικά εκμεταλλεύσιμων κοιτασμάτων
- Οι διεθνείς συνθήκες των αγορών (πχ ρόλος του ΟΠΕΚ, Οργανισμός Εξαγωγών Πετρελαιοπαραγωγών χωρών)

Όσον αφορά το πετρέλαιο, η τιμή του στο σενάριο αναφοράς προβλέπεται να αυξηθεί από 60 €/boe²⁴ το 2010 σε 89 €/boe το 2020 και σε 110 €/boe το 2050 (Γράφημα 6-5). Οι υψηλές τιμές στην περίοδο μέχρι το 2020 αντανακλούν την αποτυχία της παγκόσμιας παραγωγικής ικανότητας να αυξηθεί με τον ρυθμό της παγκόσμιας ζήτησης, η οποία τροφοδοτείται κυρίως από την ραγδαία αύξηση στις αναπτυσσόμενες οικονομίες. Η κατάσταση βελτιώνεται την περίοδο 2020-2035 κατά την διάρκεια της οποίας η παγκόσμια τιμή του πετρελαίου αυξάνεται μόλις κατά 0.55% ετησίως παρά την σταθερή οικονομική ανάπτυξη. Μετά το 2035 ο συνεχώς μειούμενος λόγος των παγκόσμιων αποθεμάτων προς την παραγωγή (RP ratio) και η σταδιακή μετάβαση από κοιτάσματα φθηνού κόστους εξόρυξης σε ακριβότερα (κυρίως βαρύ πετρέλαιο της Βενεζουέλας και πίσσες της περιοχής Alberta του Καναδά) οδηγούν σε ανοδική τάση στις τιμές του πετρελαίου. Σε αυτό το σημείο πρέπει να σημειωθεί ότι η ντετερμινιστική ανάλυση της παρούσας ενότητας δεν περιλαμβάνει τις αβέβαιες και προσωρινές επιπτώσεις πιθανών γεωπολιτικών κρίσεων στις πετρελαιοπαραγωγές περιοχές.

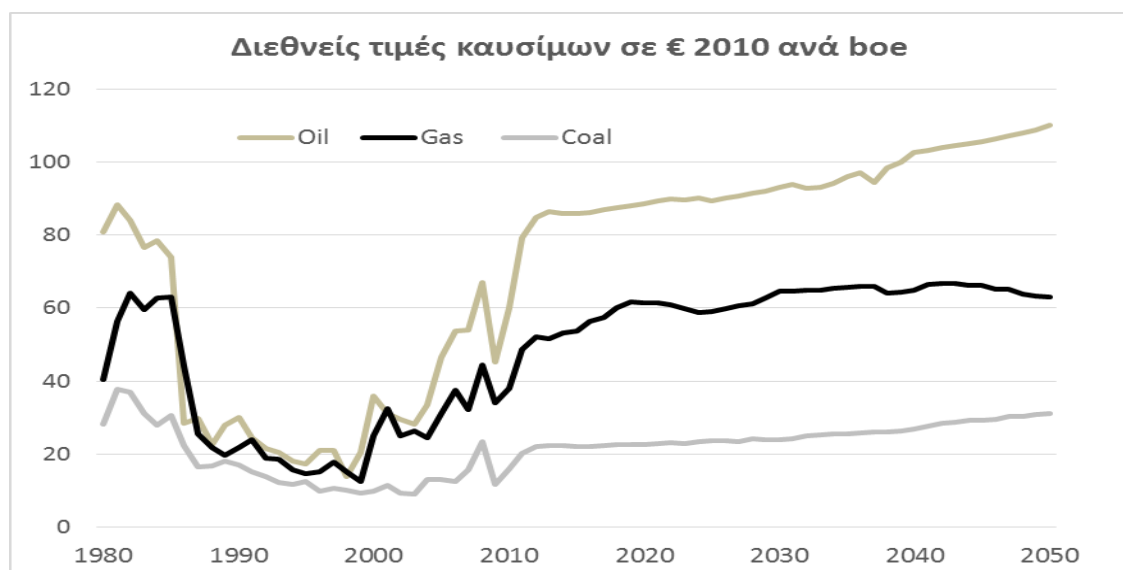
Οι βραχυπρόθεσμες προβλέψεις για την τιμή του φυσικού αερίου είναι σχετικά υψηλές σαν αποτέλεσμα της αυξανόμενης ζήτησης από την Ασία, η οποία αντισταθμίζει την μειωμένη ζήτηση για εισαγωγές από τις Η.Π.Α. εξαιτίας της εκμετάλλευσης του

²³ Η διεθνής τιμή του πετρελαίου είναι η τιμή του Brent, η τιμή του αερίου αντιπροσωπεύει τον σταθμισμένο μέσο όρο των μακροχρόνιων συμβολαίων εισαγωγής στην Ευρωπαϊκή Ένωση (από την βάση δεδομένων Platts) και των Ευρωπαϊκών spot τιμών (πχ τιμή NBP spot) και η τιμή άνθρακα είναι η μέση τιμή εισαγωγής στην Ευρωπαϊκή Ένωση (CIF ARA-6000).

²⁴ Barrel of oil equivalent (βαρέλι ισοδύναμου πετρελαίου)

σχιστολιθικού αερίου [143]. Οι εισαγωγές φυσικού αερίου στην ΕΕ γίνονται κυρίως με μακροχρόνια συμβόλαια με τιμαριθμική αναπροσαρμογή της τιμής του αερίου ως προς το πετρέλαιο. Παρότι οι τιμές των συμβολαίων είναι συνήθως υψηλότερες σε σύγκριση με τις τιμές spot αγοράς, τα μακροχρόνια συμβόλαια μειώνουν τις αβεβαιότητες των παραγωγών και των καταναλωτών τόσο για την ποσότητα όσο και για την τιμή του αερίου και παρέχουν κίνητρο για επενδύσεις στην κατασκευή αγωγών αερίου. Μακροπρόθεσμα οι τιμές εισαγωγής του αερίου σταματούν να ακολουθούν την αυξητική τάση των τιμών του πετρελαίου εξαιτίας των κοιτασμάτων μη συμβατικού φυσικού αερίου. Η αποσύνδεση της εξέλιξης των διεθνών τιμών πετρελαίου και φυσικού αερίου αποτελεί μια ρήξη με την ιστορικές τάσεις, καθώς η συσχέτιση των παγκόσμιων τιμών τους ήταν ιδιαίτερα μεγάλη την περίοδο 1990-2010 (0.84). Παρόλα αυτά, οι τιμές του αερίου σταθεροποιούνται σε ένα επίπεδο αρκετά υψηλό, ώστε να εξασφαλίζεται η βιωσιμότητα των μη συμβατικών κοιτασμάτων αερίου [115].

Η Κίνα αναμένεται να παραμείνει σημαντικός εισαγωγέας άνθρακα οδηγώντας σε υψηλά επίπεδα τις διεθνείς τιμές μέχρι το 2050. Οι τιμές άνθρακα αυξάνονται με σχετικά αργό ρυθμό κατά την περίοδο 2025-2040, λόγω του ανταγωνισμού με το αέριο, ενώ μακροπρόθεσμα βρίσκονται σε επίπεδα υψηλότερα από τα πρόσφατα υψηλά του 2008 εξαιτίας της συνεχούς αύξησης της ζήτησης στις αναπτυσσόμενες περιοχές. Ένας επιπλέον παράγοντας αύξησης της τιμής άνθρακα είναι η αύξηση του μέσου κόστους παραγωγής (κοιτάσματα με μεγαλύτερο κόστος εξόρυξης) και μεταφοράς άνθρακα (υψηλές τιμές πετρελαίου). Ο λόγος της τιμής φυσικού αερίου/άνθρακα προβλέπεται να αυξηθεί μεσοπρόθεσμα από 2.35 το 2012 σε 2.69 το 2030 εξαιτίας των άφθονων χαμηλού κόστους αποθεμάτων άνθρακα. Μακροπρόθεσμα όμως η αυξητική τάση της διεθνούς τιμής άνθρακα σε συνδυασμό με την μεγάλης κλίμακα εκμετάλλευση των κοιτασμάτων μη συμβατικού αερίου θα οδηγήσει σε μείωση του λόγου των τιμών, ο οποίος το 2050 προσεγγίζει το 2.



Γράφημα 6-5: Προεκτάσεις του μοντέλου για την εξέλιξη των διεθνών τιμών των καυσίμων στο σενάριο αναφοράς την περίοδο 2010-2050

6.3.2 Τα σενάρια υψηλών και χαμηλών διεθνών τιμών

Τα σενάρια υψηλών και χαμηλών τιμών χρησιμοποιούν τις ίδιες υποθέσεις σε σχέση με το σενάριο αναφοράς όσον αφορά τις δημογραφικές και μακρο-οικονομικές εξελίξεις και τις ενεργειακές και κλιματικές πολιτικές. Οι αλλαγές στις προβλέψεις για τις διεθνείς τιμές ενέργειας προκαλούνται αποκλειστικά από διαφορετικές υποθέσεις (σε σύγκριση με το σενάριο αναφοράς) σχετικά με τα κοιτάσματα και τις προοπτικές εξόρυξης υδρογονανθράκων και την εκμετάλλευση του μη συμβατικού αερίου.

Οι διαθέσιμες στην διεθνή βιβλιογραφία εκτιμήσεις για τα μη συμβατικά κοιτάσματα υδρογονανθράκων και οι προβλέψεις για την μελλοντική παραγωγή τους παρουσιάζουν ιδιαίτερα σημαντική απόκλιση. Το σενάριο αναφοράς χρησιμοποιεί τις υποθέσεις για τα κοιτάσματα και τα βεβαιωμένα αποθέματα από τις εκτιμήσεις των ινστιτούτων USGS [101, 102] και BGR [116] σε συνδυασμό με τις υποθέσεις της ΔΟΕ [38, 8]. Οι εκτιμήσεις για τα μη συμβατικά κοιτάσματα φυσικού αερίου είναι σύμφωνες με τις «μέσες τιμές» όπως βρέθηκαν στην διεθνή βιβλιογραφία, ειδικά στις μελέτες [108-111]. Προκειμένου να διαμορφωθούν οι εναλλακτικές προβλέψεις για τις τιμές καυσίμων, τα κοιτάσματα των υδρογονανθράκων μεταβάλλονται από το επίπεδο του σεναρίου αναφοράς ώστε να αντανakλούν το χαμηλότερο 10% εκατοστημόριο (στο σενάριο «υψηλές τιμές») και το υψηλότερο 10% («χαμηλές τιμές») των εκτιμήσεων του USGS [101, 102]. Ο συντελεστής ανάκτησης εκφράζει το τμήμα των μη συμβατικών κοιτασμάτων αερίου που μπορεί να μετατραπεί σε αποθέματα και να παραχθεί με την πάροδο του χρόνου και αναπαριστά την τεχνολογική πρόοδο της εξορυκτικής δραστηριότητας π.χ. υδραυλική ρωγμάτωση, οριζόντια γεώτρηση. Στο σενάριο χαμηλών τιμών, οι συντελεστές ανάκτησης των μη συμβατικών κοιτασμάτων φυσικού αερίου θεωρούνται υψηλότεροι σε σχέση με το σενάριο αναφοράς αντανakλώντας ραγδαίες τεχνολογικές βελτιώσεις, την μείωση του κόστους παραγωγής, λιγότερο αυστηρές περιβαλλοντικές ρυθμίσεις και αυξημένη δημόσια αποδοχή (Πίνακας 6-5).

Παραδοχές για τα 3 σενάρια (τα αποθέματα παραμένουν όπως το σενάριο αναφοράς)	Σενάριο Αναφοράς		Υψηλές τιμές	Χαμηλές τιμές
	Αποθέματα	Κοιτάσματα	Κοιτάσματα	Κοιτάσματα
Πετρέλαιο (σε Gbl)	1479	1336	898	2212
Εκ των οποίων μη συμβατικά		436	115	1000
Φυσικό αέριο (σε Gtoe)	171	540	276	1223
Εκ των οποίων μη συμβατικά		342	118	850

Πίνακας 6-5: Υποθέσεις για τα παγκόσμια κοιτάσματα πετρελαίου και φυσικού αερίου το έτος βάσης στα εναλλακτικά σενάρια

Οι αβεβαιότητες σχετικά με το μέγεθος των κοιτασμάτων υδρογονανθράκων αφορούν κυρίως την εξόρυξη μη συμβατικών κοιτασμάτων αερίου καθώς οι πολιτικές και οι τεχνολογίες που σχετίζονται με την εκμετάλλευση του είναι ακόμη αβέβαιες σε πολλές περιοχές [108], με εξαίρεση την Βόρεια Αμερική. Επίσης, οι εκτιμήσεις για τα κοιτάσματα μη συμβατικού αερίου χαρακτηρίζονται από πολύ υψηλές αποκλίσεις μεταξύ των διαθέσιμων μελετών [108-111]. Υποθέτοντας διαφορετικά επίπεδα

διαθεσιμότητας και αξιοποίησης των μη συμβατικών πηγών φυσικού αερίου, δηλαδή εναλλακτικές παραδοχές για τους συνολικούς πόρους (Original Gas in Place-OGIP) και τους συντελεστές ανάκτησης, οι τιμές του φυσικού αερίου και οι σχετικές τιμές μεταξύ των καυσίμων αλλάζουν σε μεγάλο βαθμό σε σύγκριση με το σενάριο αναφοράς.

Το σενάριο «υψηλών τιμών» υποθέτει μεγάλες καθυστερήσεις στην επέκταση της παραγωγικής ικανότητας πετρελαίου και φυσικού αερίου, με τα σχέδια να αναθεωρούνται και συνεπώς η παραγωγική ικανότητα αποτυγχάνει να ικανοποιήσει την ταχέως αυξανόμενη ζήτηση των αναπτυσσόμενων οικονομιών. Επίσης, το σενάριο θεωρεί ότι οι προοπτικές για τα οικονομικά ανακτήσιμα κοιτάσματα πετρελαίου και φυσικού αερίου είναι χαμηλότερες από τις «μέσες» προσδοκίες. Μετά το ατύχημα στον Κόλπο του Μεξικού, το μορατόριουμ (συμφωνημένη αναστολή) εξόρυξης πετρελαίου σε βαθιές θάλασσες θεωρείται ότι διατηρείται και αυτό οδηγεί σε καθυστερήσεις και σε άλλα μέρη του κόσμου, καθώς οι περιβαλλοντικές ανησυχίες αυξάνονται. Από γεωπολιτική άποψη, το πετρελαϊκό εμπόριο στο Ιράν αναμένεται να συνεχιστεί, ενώ η παραγωγή πετρελαίου στη Λιβύη αποτυγχάνει να αυξηθεί στα επίπεδα προ του πολέμου. Από την άλλη πλευρά, το σενάριο «χαμηλών τιμών» χαρακτηρίζεται από θετικές προσδοκίες για τη διαθεσιμότητα των συμβατικών και μη συμβατικών κοιτασμάτων πετρελαίου και αερίου. Αυτό το σενάριο αντικατοπτρίζει τις αυξημένες δραστηριότητες εξερεύνησης και εκμετάλλευσης πετρελαίου και φυσικού αερίου σε βραχυπρόθεσμη και μεσοπρόθεσμη βάση σε διάφορες περιοχές του κόσμου, σε συνδυασμό με την γρήγορη βελτίωση της γνώσης και των τεχνολογιών που συνδέονται με την εξόρυξη των μη συμβατικών κοιτασμάτων αερίου (υδραυλική ρωγμάτωση και οριζόντια γεώτρηση).

Οι επιπτώσεις της αλλαγής των υποθέσεων στο σενάριο «υψηλών τιμών» είναι μεγαλύτερες για τις τιμές του φυσικού αερίου σε σύγκριση με τις τιμές του πετρελαίου και του άνθρακα. Το σενάριο «υψηλών τιμών» αποκλίνει σημαντικά από το σενάριο αναφοράς με αυξήσεις της τάξης του 40% για το φυσικό αέριο, 27% για τον άνθρακα και το 22% για το πετρέλαιο το 2050 (Πίνακας 6-6). Ο πιο σημαντικός λόγος για την υψηλότερη απόκλιση των τιμών του φυσικού αερίου είναι η μεγαλύτερη αβεβαιότητα σχετικά με τα παγκόσμια κοιτάσματα του αερίου σε σύγκριση με τα κοιτάσματα πετρελαίου και ειδικά όσον αφορά τους πόρους του μη συμβατικού φυσικού αερίου που χαρακτηρίζονται από ιδιαίτερα μεγάλη αβεβαιότητα. Επομένως, η χρησιμοποίηση χαμηλότερων/υψηλότερων εκτιμήσεων για τα μη συμβατικά κοιτάσματα αερίου οδηγεί σε μεγάλες μεταβολές στα επίπεδα των διεθνών τιμών του φυσικού αερίου.

Οι μεταβολές στις τιμές του πετρελαίου είναι σχετικά περιορισμένες, εξαιτίας της χαμηλότερης αβεβαιότητας που περιβάλλει τα κοιτάσματα του πετρελαίου (σε σχέση με τους πόρους φυσικού αερίου), καθώς:

- η ποσότητα των βεβαιωμένων αποθεμάτων πετρελαίου είναι μεγαλύτερη σε σχέση με τους τεχνικά και οικονομικά απολήψιμους πόρους οι οποίοι χαρακτηρίζονται από εγγενή αβεβαιότητα

- η έρευνα και η εξερεύνηση στις περισσότερες περιοχές του κόσμου έχει αναπτυχθεί σε πολύ μεγαλύτερο βαθμό σε σύγκριση με το φυσικό αέριο.

(σε € 2010 ανά βαρέλι)	2010	2015	2020	2030	2040	2050
Πετρέλαιο						
Σενάριο Αναφοράς	60.0	86.0	88.5	93.1	102.6	110.1
Υψηλές τιμές (% διαφορά)		1%	5%	12%	16%	22%
Χαμηλές τιμές (% διαφορά)		-5%	-8%	-14%	-17%	-20%
Φυσικό αέριο						
Σενάριο Αναφοράς	37.9	53.8	61.5	64.5	64.7	63.0
Υψηλές τιμές (% διαφορά)		2%	10%	28%	33%	40%
Χαμηλές τιμές (% διαφορά)		-12%	-28%	-28%	-28%	-32%
Άνθρακας						
Σενάριο Αναφοράς	16.0	22.0	22.6	24.0	26.9	31.2
Υψηλές τιμές (% διαφορά)		0%	3%	15%	23%	27%
Χαμηλές τιμές (% διαφορά)		-13%	-22%	-24%	-24%	-28%

Πίνακας 6-6: Προεκτάσεις του μοντέλου για τις διεθνείς τιμές υδρογονανθράκων στα σενάρια υψηλών και χαμηλών τιμών την περίοδο 2010-2050

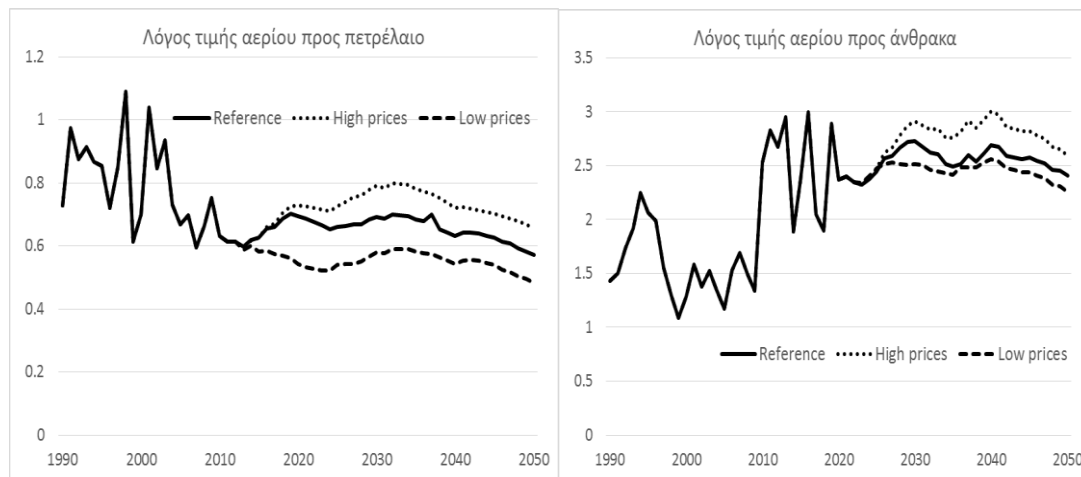
Καθώς οι επενδύσεις που απαιτούνται στον τομέα της εξόρυξης ορυκτών καυσίμων έχουν μεγάλο αρχικό κόστος και είναι αρκετά χρονοβόρες (από την φάση της ανακάλυψης των κοιτασμάτων μέχρι την φάση έναρξης της εμπορικής παραγωγής), σημαντικές αλλαγές σε σύγκριση με το σενάριο αναφοράς είναι πιθανότερο να συμβούν μετά το 2020. Από την άλλη πλευρά, όταν υπάρχει δέσμευση από τα διαφορετικά μέρη (εταιρείες εξόρυξης, δημόσια αποδοχή) και η βασική νομοθεσία έχει αποσαφηνιστεί, η εκμετάλλευση του μη συμβατικού αερίου μπορεί να πραγματοποιηθεί σε σύντομο διάστημα, όπως ήδη έχει καταδειχθεί στις ΗΠΑ όπου η παραγωγή αναπτύχθηκε σε διάρκεια λίγων ετών [143]. Έτσι, στο σενάριο «χαμηλών τιμών», η τιμή του φυσικού αερίου προβλέπεται να μειωθεί κατά 30% σε σύγκριση με το σενάριο αναφοράς σχετικά σύντομα (2020). Παρ' όλα αυτά, οι προβλεπόμενες τιμές διατηρούνται στο επίπεδο των 43 €/2010/boe, το οποίο εξασφαλίζει την οικονομική βιωσιμότητα των περισσότερων έργων εξόρυξης μη συμβατικού φυσικού αερίου (για το κόστος εξόρυξης αερίου ανά κατηγορία και περιοχή χρησιμοποιήθηκε η μελέτη [115]). Η μεγάλης κλίμακας εκμετάλλευση του σχιστολιθικού αερίου αναμένεται να αρχίσει νωρίς και σε πολλές διαφορετικές περιοχές του κόσμου, οδηγώντας σε αύξηση της ασφάλειας ενεργειακού εφοδιασμού στους περισσότερους χώρες εισαγωγείς ορυκτών καυσίμων και σε ευρύτερη γεωγραφική διαφοροποίηση των εισαγόμενων πηγών ενέργειας.

Η διεθνής τιμή του άνθρακα εξαρτάται από την παγκόσμια τιμή του πετρελαίου, όπως συνήθως παρατηρείται στις διεθνείς αγορές (η συσχέτισή τους ήταν 0.87 στην περίοδο 1990-2010). Επιπλέον, η διεθνής τιμή του άνθρακα επηρεάζεται έντονα από τις κινήσεις των τιμών του φυσικού αερίου, καθώς τα δύο καύσιμα ανταγωνίζονται για

την ικανοποίηση των απαιτήσεων ηλεκτροπαραγωγής, καθώς σε περίπτωση που η τιμή του αερίου αυξηθεί τότε οι τεχνολογίες άνθρακα υποκαθιστούν το φυσικό αέριο στην ηλεκτροπαραγωγή και συνεπώς η παγκόσμια ζήτηση άνθρακα αυξάνεται ασκώντας ανοδική επίδραση στις διεθνείς τιμές του άνθρακα.

Το Γράφημα 6-6 παρουσιάζει την εξέλιξη του λόγου των διεθνών τιμών αερίου προς πετρέλαιο και αέριο προς άνθρακα στα τρία εναλλακτικά σενάρια. Ο λόγος της τιμής του φυσικού αερίου προς την τιμή του άνθρακα είναι υψηλότερος στο σενάριο «υψηλών τιμών» και χαμηλότερος στο σενάριο «χαμηλών τιμών» σε σύγκριση με το σενάριο αναφοράς, καθώς οι τιμές του φυσικού αερίου επηρεάζονται περισσότερο από τις εναλλακτικές υποθέσεις των σεναρίων για τα κοιτάσματα των υδρογονανθράκων. Ως αποτέλεσμα της σημαντικά υψηλότερης αβεβαιότητας η οποία χαρακτηρίζει τις εκτιμήσεις για τα κοιτάσματα φυσικού αερίου σε σχέση με τα κοιτάσματα πετρελαίου, ο λόγος των διεθνών τιμών του φυσικού αερίου προς πετρέλαιο αναμένεται να αυξηθεί στο σενάριο «υψηλών τιμών» και να μειωθεί στο σενάριο «χαμηλών τιμών» σε σύγκριση με το σενάριο αναφοράς ιδιαίτερα βραχυπρόθεσμα (2020).

Γράφημα 6-6: Δείκτες τιμών φυσικού αερίου προς πετρέλαιο και φυσικού αερίου προς άνθρακα στα εναλλακτικά σενάρια (με βάση τις προεκτάσεις του μοντέλου για εναλλακτικά σενάρια)



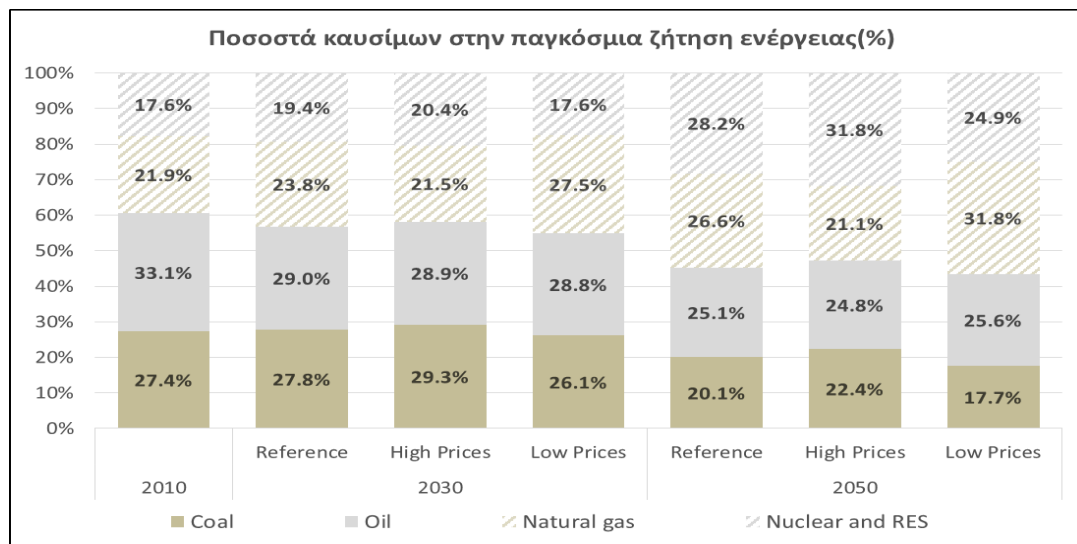
6.3.3 Οι επιπτώσεις των διεθνών τιμών στο ενεργειακό σύστημα

Στο σενάριο «υψηλών τιμών», οι αυξημένες διεθνείς τιμές των υδρογονανθράκων οδηγούν σε υψηλότερο κόστος ενέργειας για τους τελικούς καταναλωτές, που οδηγεί σε μείωση της παγκόσμιας ζήτησης ενέργειας σε σύγκριση με το σενάριο αναφοράς (1.2% μείωση το 2030 και 3% το 2050). Αντίθετα, στο σενάριο «χαμηλών τιμών», η παγκόσμια κατανάλωση ενέργειας αυξάνεται κατά 2.7% το 2050. Εκτός από μεταβολές στην συνολική ζήτηση ενέργειας, οι μεταβολές στις σχετικές τιμές των καυσίμων συνεπάγονται δομικές αλλαγές στο παγκόσμιο ενεργειακό μίγμα και εκτεταμένες υποκαταστάσεις μεταξύ των ενεργειακών μορφών και καυσίμων.

Στο σενάριο «χαμηλών τιμών», η μεγαλύτερη ποσοστιαία μείωση της τιμής του φυσικού αερίου (σε σύγκριση με το πετρέλαιο και τον άνθρακα) οδηγεί σε σημαντική

αύξηση της παγκόσμιας κατανάλωσης αερίου κατά 23.5% το 2050 σε σχέση με το σενάριο αναφοράς. Συνεπώς, σε αυτό το σενάριο το ποσοστό του φυσικού αερίου στην παγκόσμια ενεργειακή κατανάλωση αυξάνεται κατά 5.2 ποσοστιαίες μονάδες το 2050 (από 26.6% σε 31.8%). Η παγκόσμια ζήτηση αερίου προβλέπεται να ξεπεράσει την κατανάλωση πετρελαίου και άνθρακα μέχρι το 2040 και έτσι το 2050 το φυσικό αέριο είναι το πιο σημαντικό καύσιμο στο παγκόσμιο ενεργειακό μίγμα (Γράφημα 6-7). Αντίθετα, το σενάριο «υψηλών τιμών» οδηγεί σε μείωση του μεριδίου του αερίου από το σενάριο αναφοράς (κατά 5.5 ποσοστιαίες μονάδες το 2050) εξαιτίας της μεγαλύτερης αύξησης της διεθνούς τιμής που οδηγεί σε υποκαταστάσεις υπέρ των άλλων ορυκτών καυσίμων (το μερίδιο του άνθρακα αυξάνεται κατά 2.3% το 2050) και των ενεργειακών μορφών χαμηλού άνθρακα (+3.5%). Συνεπώς, το 2050 οι ΑΠΕ και η πυρηνική ενέργεια αντιπροσωπεύουν σχεδόν το 1/3 της παγκόσμιας ενεργειακής κατανάλωσης, ενώ το μερίδιό τους στο σενάριο χαμηλών τιμών είναι μόλις 25%. Από την άλλη πλευρά, το πετρέλαιο και το φυσικό αέριο δεν ανταγωνίζονται σε μεγάλο βαθμό (δεδομένου ότι η ζήτηση πετρελαίου είναι συγκεντρωμένη στον τομέα των μεταφορών) και συνεπώς το ποσοστό του πετρελαίου παραμένει σχετικά σταθερό σε όλα τα σενάρια που εξετάστηκαν.

Στο σενάριο «υψηλών τιμών», οι μεταβολές της συνολικής ζήτησης ενέργειας και οι υποκαταστάσεις στο ενεργειακό μίγμα οδηγούν σε μείωση των παγκόσμιων εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα κατά 1.1% το 2030 και κατά 5.6% το 2050. Η μείωση των εκπομπών είναι μεγαλύτερη σε ποσοστιαία κλίμακα σε σχέση με την ελάττωση της ζήτησης ενέργειας, σαν αποτέλεσμα της μεγαλύτερης διείσδυσης ενεργειακών μορφών με μηδενικό αποτύπωμα άνθρακα (αιολική, ηλιακή, βιομάζα και πυρηνική ενέργεια). Αντίθετα στο «σενάριο χαμηλών τιμών», η ανταγωνιστικότητα των ΑΠΕ σε σύγκριση με τα ορυκτά καύσιμα μειώνεται και συνεπώς οι παγκόσμιες εκπομπές άνθρακα αυξάνονται κατά 5.2% το 2050 σε σχέση με το σενάριο αναφοράς.



Γράφημα 6-7: Προεκτάσεις του μοντέλου για τα ποσοστά των καυσίμων στην παγκόσμια ζήτηση ενέργειας στα εναλλακτικά σενάρια (περίοδος 2010-2050)

6.4 Σενάριο μονομερούς μείωσης εκπομπών από την ΕΕ

6.4.1 Σχεδιασμός του σεναρίου

Η ΕΕ ηγείται της παγκόσμιας προσπάθειας για τον μετριασμό της κλιματικής αλλαγής, καθώς έχει ήδη υιοθετήσει συγκεκριμένους στόχους μείωσης των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου και διείσδυσης των ΑΠΕ στο ενεργειακό σύστημα για το 2020, εφαρμόζει μια σειρά πολιτικών για την ενέργεια και το κλίμα (συμπεριλαμβανομένης της δημιουργίας του Συστήματος Εμπορίας Δικαιωμάτων Εκπομπής-ΣΕΔΕ) και έχει επιβεβαιώσει το μακροπρόθεσμο στόχο της για μείωση των αερίων του θερμοκηπίου κατά τουλάχιστον 80% το 2050 σε σχέση με το 1990 [8]. Πιο πρόσφατα η Ευρωπαϊκή Επιτροπή εξέδωσε τους στόχους για τις κλιματικές πολιτικές για το 2030 και ενέκρινε το «πλαίσιο των πολιτικών για το κλίμα και την ενέργεια» [144], η οποία ποσοτικοποιεί τους βασικούς στόχους της ΕΕ όσον αφορά την μείωση των εκπομπών άνθρακα, την βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης (εξοικονόμηση ενέργειας) και την ανάπτυξη των ΑΠΕ, την ασφάλεια του ενεργειακού εφοδιασμού και την παράλληλη στήριξη της οικονομικής ανάπτυξης, της απασχόλησης και της ανταγωνιστικότητας μέσω μιας οικονομικά αποδοτικής «συστημικής» προσέγγισης.

Οι περισσότερες χώρες του κόσμου έχουν επίσημα δεσμευτεί να αναλάβουν δράση για να μειώσουν τις επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής [3]. Ωστόσο, παρά τις προσπάθειες των χωρών για περιορισμό των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου, δεν υπάρχει γενική, φιλόδοξη και δεσμευτική διεθνής συμφωνία για το κλίμα, η οποία να διασφαλίζει ότι η παγκόσμια κοινότητα είναι σε σωστό δρόμο για την επίτευξη του στόχου του περιορισμού της αύξησης της παγκόσμιας θερμοκρασίας στα επίπεδα των 2°C μέχρι το 2100 σε σύγκριση με τα προ-βιομηχανικά επίπεδα, όπως εκτιμάται στην έκθεση των Ηνωμένων Εθνών, *Gap Report* [145]. Δεδομένου του διεθνούς πλαισίου των κλιματικών πολιτικών, είναι χρήσιμο να μελετηθούν οι ενεργειακές και οικονομικές επιπτώσεις μιας φιλόδοξης μονομερούς δράσης της ΕΕ για δραστική μείωση των εκπομπών CO₂ σε συμφωνία με τους στόχους για το 2030 [144] και τον οδικό χάρτη 2050 [8]. Πιο συγκεκριμένα το σενάριο “GHG-40-80” βασίζεται στο κεντρικό σενάριο του πλαισίου πολιτικών για το 2030 [144] και επομένως πετυχαίνει μείωση 40% στις εκπομπές άνθρακα το 2030 και 80% το 2050 (σε σχέση με τα επίπεδα του 1990) χωρίς επιπρόσθετους δεσμευτικούς στόχους για την βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης και την διείσδυση των ΑΠΕ. Ο στόχος του σεναρίου είναι η ποσοτικοποίηση της οικονομικά βέλτιστης κατανομής της μείωσης των εκπομπών, που επιτυγχάνεται με την εξίσωση του οριακού κόστους μείωσης των εκπομπών άνθρακα σε όλους τους κλάδους της οικονομίας. Η ανεξάρτηση του ενεργειακού συστήματος της Ευρώπης από τα ορυκτά καύσιμα οφείλεται κυρίως στην αυξημένη τιμή του άνθρακα (carbon value) στους τομείς που καλύπτονται από το ΣΕΔΕ καθώς και στους υπόλοιπους ενεργειακούς κλάδους (μεταφορές, νοικοκυριά κλπ.). Άλλες κλιματικές πολιτικές που εισάγονται στο σενάριο αφορούν τα αυστηρότερα πρότυπα εκπομπών CO₂ για τα επιβατικά αυτοκίνητα μετά το 2030, η επέκταση του δικτύου υποδομών επαναφόρτισης μπαταριών, τα μέτρα βελτίωσης της ενεργειακής απόδοσης, η εντατικοποίηση των

πολιτικών προώθησης των ΑΠΕ σε σύγκριση με το σενάριο αναφοράς, σε συνδυασμό με επενδύσεις στην βελτίωση του δικτύου μεταφοράς και διανομής ηλεκτρισμού.

6.4.2 Επιπτώσεις στο ενεργειακό σύστημα της Ευρωπαϊκής Ένωσης

Το σενάριο αναφοράς προβλέπει μείωση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα στην ΕΕ κατά 28% το 2030 και 42% το 2050 σε σχέση με τα επίπεδα του 1990. Αυτό σημαίνει ότι οι στόχοι της ΕΕ για το 2030 [144] δεν ικανοποιούνται παρά την ισχυρή αποσύνδεση της ενεργειακής κατανάλωσης και των εκπομπών άνθρακα από την οικονομική ανάπτυξη. Στο σενάριο “GHG-40-80”, ο κύριος παράγοντας που οδηγεί σε μείωση των εκπομπών σε σχέση με το σενάριο αναφοράς είναι ο αυξημένος φόρος στο διοξείδιο του άνθρακα (Πίνακας 6-7), ο οποίος φτάνει στα 268 € 2010/τόνο εκπεμπόμενου διοξειδίου το 2050 (στο σενάριο αναφοράς ο φόρος είναι 90 € 2010/τόνο το 2050). Το σενάριο αναφοράς οδηγεί σε αυξημένη διείσδυση των ΑΠΕ στην παραγωγή ηλεκτρισμού στην Ευρωπαϊκή Ένωση, εξαιτίας της φορολόγησης των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα (που αυξάνει το κόστος καύσης ορυκτών καυσίμων) και της πιο γρήγορης τεχνολογικής προόδου και μείωσης του κόστους των ΑΠΕ. Το ποσοστό των ΑΠΕ στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας προβλέπεται να αυξηθεί από 25% το 2010 σε 46% το 2030 και σε 53% το 2050 στο σενάριο αναφοράς. Στο σενάριο “GHG-40-80” το μερίδιο των ΑΠΕ αυξάνεται ακόμα περισσότερο και φτάνει στο 59% το 2050. Το μερίδιο των ΑΠΕ στην πρωτογενή ζήτηση ενέργειας προβλέπεται να αυξηθεί από 26% στο σενάριο αναφοράς σε 38% το 2050 εξαιτίας των ισχυρότερων κλιματικών πολιτικών. Η βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης αποτελεί μια από τις σημαντικότερες επιλογές για την μείωση των εκπομπών άνθρακα, αφού η ενεργειακή εξοικονόμηση σημαίνει εξ’ ορισμού λιγότερες εκπομπές άνθρακα τόσο στους τομείς της τελικής ενεργειακής κατανάλωσης όσο και στην παραγωγή ηλεκτρισμού (εξαιτίας της χαμηλότερης ζήτησης). Στις περισσότερες περιπτώσεις, τα μέτρα ενεργειακής εξοικονόμησης σημαίνουν υψηλές επενδύσεις στην αρχή της περιόδου (π.χ. για τη μόνωση των κτιρίων, αγορά πιο αποδοτικού ενεργειακού εξοπλισμού και επιβατικών αυτοκινήτων, κ.α.) και εξοικονόμηση χρημάτων για μια παρατεταμένη χρονική περίοδο.

Στο σενάριο αναφοράς παρατηρείται μια ισχυρή τάση αποσύνδεσης της ζήτησης ενέργειας από την αύξηση του ΑΕΠ σαν αποτέλεσμα των αυξήσεων στις τιμές της ενέργειας, των πολιτικών εξοικονόμησης, της διείσδυσης ενεργειακά αποδοτικών τεχνολογιών (πχ ΑΠΕ, φυσικό αέριο κ.α.) και της αυτόνομης βελτίωσης της ενεργειακής απόδοσης σε όλους τους τομείς [114]. Σαν αποτέλεσμα των παραπάνω, ο δείκτης ενεργειακής έντασης του ΑΕΠ στην ΕΕ προβλέπεται να μειωθεί κατά 45% στο σενάριο αναφοράς την περίοδο 2010-2050. Οι ισχυρότερες κλιματικές πολιτικές, οι αυξήσεις στο κόστος της ενέργειας σε σχέση με το σενάριο αναφοράς και οι πολιτικές εξοικονόμησης στο σενάριο “GHG-40-80” οδηγούν σε περαιτέρω μείωση της ενέργειας ανά μονάδα ΑΕΠ (η ενεργειακή ένταση μειώνεται κατά 61.4% την περίοδο 2010-2050).

Το ποσοστό της ζήτησης που καλύπτεται από ηλεκτρισμό προβλέπεται να αυξηθεί καθώς η δομή της ζήτησης αλλάζει με την αυξημένη διείσδυση των ηλεκτρικών συσκευών στα νοικοκυριά και στις βιομηχανικές χρήσεις (υποκαθιστούν τα ορυκτά

καύσιμα). Η ηλεκτρική ενέργεια χαρακτηρίζεται από μεγάλη ενεργειακή απόδοση και μηδενικές εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα στο σημείο της τελικής χρήσης. Επιπλέον, ο εξηλεκτρισμός των μεταφορών θεωρείται ένα από τα πιο σημαντικά στοιχεία της Ευρωπαϊκής στρατηγικής για μετάβαση σε μια οικονομία χαμηλού άνθρακα [8]. Η διείσδυση των ηλεκτρικών αυτοκινήτων στις οδικές μεταφορές εξαρτάται από την βελτίωση των τεχνικών-οικονομικών χαρακτηριστικών των ηλεκτρικών μπαταριών, την ανάπτυξη των υποδομών επαναφόρτισης των μπαταριών και την υιοθέτηση των ηλεκτρικών οχημάτων από τους καταναλωτές. Ο εξηλεκτρισμός των μεταφορών είναι μια μακρά διαδικασία, η οποία απαιτεί σταθερούς κανονισμούς, ασφαλές περιβάλλον για επενδύσεις και συνεχή ανάπτυξη των υποδομών, έτσι ώστε να παρέχουν θετικές προσδοκίες στους καταναλωτές και στους παρόχους της τεχνολογίας. Στο σενάριο αναφοράς, η διείσδυση των ηλεκτρικών και των plug-in αυτοκινήτων είναι σχετικά περιορισμένη, αφού το αθροιστικό ποσοστό τους στον στόλο οχημάτων προβλέπεται να φτάσει το 3% το 2030 και το 17% το 2050. Στο σενάριο χαμηλών εκπομπών την περίοδο μετά το 2030 προβλέπεται αρκετά μεγαλύτερη διείσδυση των ηλεκτρικών αυτοκινήτων, τα οποία αποτελούν τα 2/3 του Ευρωπαϊκού στόλου επιβατικών αυτοκινήτων το 2050, ενώ το ποσοστό των συμβατικών αυτοκινήτων είναι μόλις 20%.

Πίνακας 6-7: Ενεργειακοί και κλιματικοί δείκτες για το 2030 και το 2050 (όπως προκύπτουν από τις προεκτάσεις του μοντέλου για τα σενάρια που εξετάστηκαν)

	2030		2050	
	Reference	GHG-40-80	Reference	GHG-40-80
Φόρος άνθρακα (€ 2010/tn)	42	53	90	268
Δείκτης CO ₂ από το 1990	72	60	58	21
Μερίδιο ΑΠΕ στην πρωτογενή ζήτηση ενέργειας	20%	25%	26%	38%
Μερίδιο ΑΠΕ στην παραγωγή ηλεκτρισμού	46%	48%	53%	59%
Μερίδιο CCS στην παραγωγή ηλεκτρισμού	0.1%	0.2%	6.1%	16.2%
Μερίδιο plug-in υβριδικών	2.6%	4.8%	12.5%	36.4%
Μερίδιο ηλεκτρικών αυτοκινήτων	0.2%	1.7%	4.3%	29.6%
Ενεργειακή ένταση του ΑΕΠ (δείκτης 2010=100)	71.3	64.4	55.2	38.6

6.4.3 Επιπτώσεις στην δομή της ηλεκτροπαραγωγής στην Ευρώπη

Οι μεγαλύτερες μειώσεις στις εκπομπές άνθρακα στο σενάριο “GHG-40-80” επιτυγχάνονται στον τομέα της ηλεκτροπαραγωγής (μείωση 93% την περίοδο 1990-2050). Οι σχεδόν μηδενικές εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα στην ηλεκτροπαραγωγή επιτρέπουν στην ηλεκτρική ενέργεια να υποκαταστήσει τα ορυκτά καύσιμα σε άλλους τομείς τελικής ενεργειακής κατανάλωσης, οι οποίοι είναι αρκετά άκαμπτοι στις

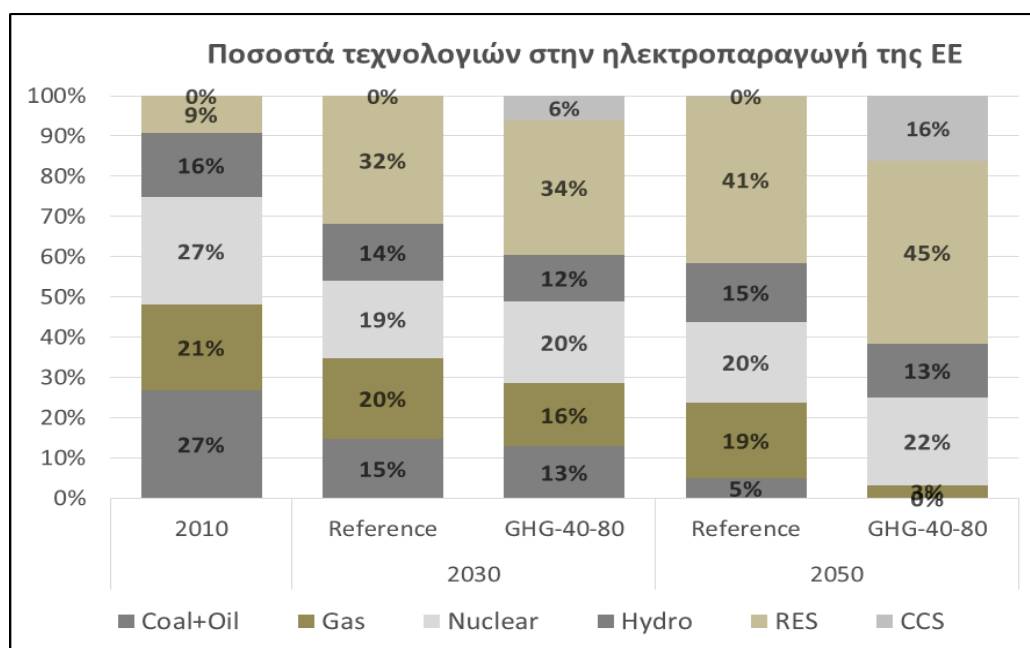
υποκαταστάσεις και οι επιλογές χαμηλού άνθρακα είναι περιορισμένες συγκριτικά με την ηλεκτροπαραγωγή. Η ανάλυση επιβεβαιώνει ότι ο εξηλεκτρισμός της τελικής ζήτησης ενέργειας σε συνδυασμό με την απεξάρτηση της ηλεκτροπαραγωγής από τους υδρογονάνθρακες είναι μια αποδοτική οικονομικά στρατηγική για την μείωση των εκπομπών άνθρακα στο πλαίσιο φιλόδοξων κλιματικών πολιτικών.

Το Γράφημα 6-8 παρουσιάζει τα ποσοστά των κυριότερων τεχνολογιών στην συνολική παραγωγή ηλεκτρισμού στην ΕΕ. Η πιο ραγδαία αναπτυσσόμενη τεχνολογία είναι οι ανεμογεννήτριες αφού το ποσοστό της αιολικής ενέργειας αναμένεται να αυξηθεί από 5% το 2010 σε 25% το 2050 στο σενάριο αναφοράς και σε 28% στο σενάριο χαμηλών εκπομπών “GHG-40-80”. Η παραγωγή ηλεκτρισμού από ηλιακή ενέργεια επίσης προβλέπεται να αυξηθεί σημαντικά και το ποσοστό της στην συνολική ηλεκτροπαραγωγή αυξάνεται από 1% το 2011 σε 8.5% το 2050 στο σενάριο αναφοράς και σε 10% στο σενάριο χαμηλών εκπομπών. Η μεγάλης κλίμακας επέκταση των ΑΠΕ με διακοπτόμενη/μεταβλητή ισχύ απαιτεί μεγάλες ποσότητες ευέλικτης παραγωγής (συνήθως φυσικό αέριο συνδυασμένου κύκλου), προκειμένου να ανταποκριθεί στις αυξημένες απαιτήσεις ευελιξίας και εφεδρείας, καθώς και τεχνολογίες αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας. Επιπλέον, επενδύσεις απαιτούνται στα δίκτυα μεταφοράς και διανομής ηλεκτρισμού. Τα κόστη ενσωμάτωσης των ΑΠΕ στο ηλεκτρικό καθώς και το σχετικά περιορισμένο δυναμικό των ΑΠΕ μεταβλητής ισχύος είναι ο κύριος λόγος της επιβράδυνσης της αύξησης του μεριδίου των ΑΠΕ στο “GHG-40-80” μετά το 2030.

Το ποσοστό της βιομάζας προβλέπεται να αυξηθεί από το 4% το 2010 στο 7.5% το 2050 στο σενάριο αναφοράς και κοντά στο 8.5% στο σενάριο χαμηλών εκπομπών “GHG-40-80”. Από την άλλη πλευρά, το περιορισμένο διαθέσιμο δυναμικό για την περαιτέρω επέκταση της υδροηλεκτρικής ισχύος σε συνδυασμό με την αύξηση της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας οδηγούν σε σταδιακή μείωση του μεριδίου της υδροηλεκτρικής ενέργειας από 16% το 2010 σε 14% το 2030 και 12% το 2050. Η πυρηνική ενέργεια δεν εκπέμπει διοξείδιο του άνθρακα και μπορεί να καλύψει με οικονομικά αποδοτικό τρόπο το φορτίο βάσης. Ωστόσο το κόστος και η αποδοχή από την κοινή γνώμη έχουν επηρεαστεί αρνητικά τα τελευταία χρόνια εξαιτίας του πυρηνικού δυστυχήματος στην Φουκουσίμα το 2011 [146]. Αρκετά από τα κράτη μέλη της ΕΕ έχουν αποκλείσει την πυρηνική ενέργεια από το ενεργειακό τους μίγμα και άλλα ξεκινάνε να θέτουν εκτός λειτουργίας τα πυρηνικά τους εργοστάσια (Ηνωμένο Βασίλειο, Γερμανία, Βέλγιο) ενώ μια σειρά από πυρηνικά εργοστάσια στις ανατολικές χώρες της ΕΕ αμφισβητούνται σήμερα κυρίως εξαιτίας του αυξημένου κεφαλαιουχικού κόστους. Επομένως το ποσοστό της πυρηνικής ενέργειας στο σενάριο αναφοράς αναμένεται να μειωθεί από 27% το 2010 σε 20% το 2030 και 21% το 2050. Ακόμα και στο σενάριο χαμηλών εκπομπών, η επέκταση των πυρηνικών εργοστασίων αναμένεται να είναι σχετικά περιορισμένη και άρα το ποσοστό της προβλέπεται να αυξηθεί κατά μόλις 1 εκατοστιαία μονάδα το 2050 σε σύγκριση με το σενάριο αναφοράς.

Οι τεχνολογίες δέσμευσης και αποθήκευσης διοξειδίου του άνθρακα (CCS) μπορούν να δεσμεύσουν μέχρι το 95-99% των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα από τα εργοστάσια ηλεκτροπαραγωγής που χρησιμοποιούν ορυκτά καύσιμα και μπορούν

να ικανοποιήσουν τόσο το φορτίο βάσης όσο και το μέσο φορτίο της καμπύλης διάρκειας φορτίου. Το σενάριο χαμηλών εκπομπών “GHG-40-80” οδηγεί σε αυξημένη ανάπτυξη των τεχνολογιών CCS, οι οποίες υποκαθιστούν τις συμβατικές τεχνολογίες καύσης υδρογονανθράκων. Το μοντέλο προβλέπει ότι το ποσοστό των τεχνολογιών CCS στην ηλεκτροπαραγωγή της ΕΕ αυξάνεται από 6.3% στο σενάριο αναφοράς σε 16.2% στο σενάριο χαμηλών εκπομπών άνθρακα, με την τεχνολογία φυσικού αερίου συνδυασμένου κύκλου σε συνδυασμό με CCS να αντιπροσωπεύει το 9.5%.



Γράφημα 6-8: Προεκτάσεις του μοντέλου για τα μερίδια καυσίμων στην ηλεκτροπαραγωγή στην Ευρώπη στα σενάρια που εξετάστηκαν (περίοδος 2010-2050)

6.4.4 Διαρροή άνθρακα σε περιοχές εκτός ΕΕ

Η βέλτιστη πολιτική μείωσης των εκπομπών άνθρακα σε παγκόσμια κλίμακα (με το ελάχιστο κόστος) συνεπάγεται την εκμετάλλευση των φθηνότερων επιλογών μείωσης των εκπομπών σε όλες τις χώρες και κλάδους και συνεπώς έναν ενιαίο παγκόσμιο φόρο στο διοξείδιο του άνθρακα [147]. Από την άλλη πλευρά, η υλοποίηση πολιτικών διαφορετικής φιλοδοξίας στις περιοχές αυξάνουν το συνολικό κόστος μείωσης των εκπομπών άνθρακα [7] και μειώνουν την αποτελεσματικότητα των μέτρων, εξαιτίας της διαρροής άνθρακα [147, 148], η οποία ορίζεται από τις εκθέσεις του IPCC ως το «τμήμα των μειώσεων των εκπομπών στις χώρες με ισχυρές κλιματικές πολιτικές το οποίο αντισταθμίζεται από την αύξηση των εκπομπών στις χώρες χωρίς πολιτικές μείωσης των εκπομπών» [2]. Η Ευρωπαϊκή Ένωση είναι η περιοχή που έχει υιοθετήσει τις πιο φιλόδοξες κλιματικές πολιτικές και η διαρροή άνθρακα (ειδικά όσο αφορά τις ενεργοβόρες βιομηχανίες) έχει ήδη εγείρει σοβαρές ανησυχίες [149].

Υπάρχουν δυο «κανάλια» που οδηγούν σε διαρροή άνθρακα: η μετεγκατάσταση των ενεργοβόρων βιομηχανιών μακριά από την ΕΕ εξαιτίας του επιπλέον κόστους παραγωγής λόγω των κλιματικών πολιτικών (κάνάλι ανταγωνιστικότητας) και το

ενεργειακό κανάλι [147], σύμφωνα με το οποίο όταν μια περιοχή υιοθετεί αυστηρές πολιτικές μείωσης των εκπομπών άνθρακα, τότε η παγκόσμια ζήτηση για ορυκτά καύσιμα μειώνεται και συνεπώς οι διεθνείς τιμές των καυσίμων τείνουν επίσης να μειωθούν σε σύγκριση με το σενάριο αναφοράς. Σύμφωνα με την διεθνή βιβλιογραφία, η συμβολή του ενεργειακού καναλιού στην διαρροή άνθρακα εξαρτάται από:

- Το μέγεθος των οικονομιών που συμμετέχουν στις φιλόδοξες κλιματικές πολιτικές
- Την ένταση άνθρακα σαν ποσοστό του ΑΕΠ αυτών των χωρών
- Τις δυνατότητες υποκατάστασης καυσίμων στο ενεργειακό μίγμα, καθώς την διάρθρωση της οικονομικής δραστηριότητας

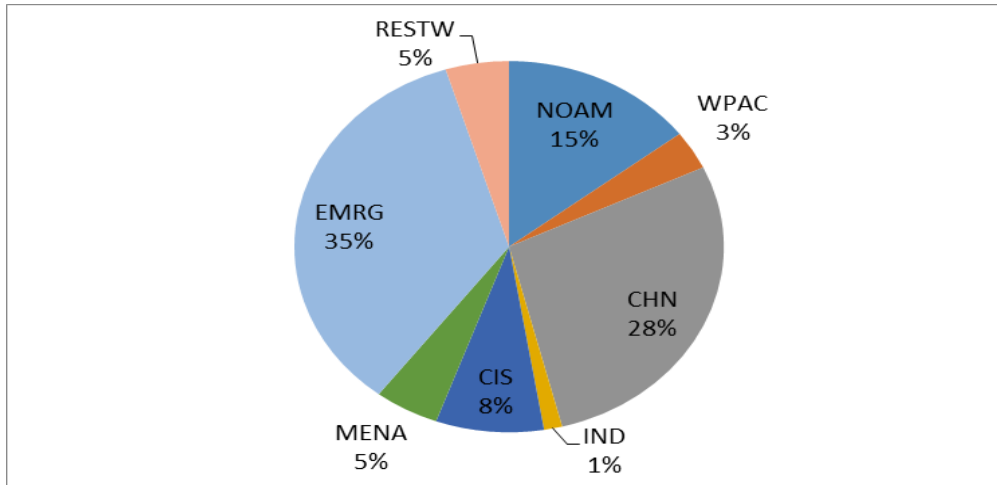
Είναι προφανές ότι λόγω του περιορισμένου μεγέθους της Ευρώπης στο παγκόσμιο ενεργειακό σύστημα, η υλοποίηση μονομερών φιλόδοξων πολιτικών δεν μπορεί να επιλύσει το παγκόσμιο περιβαλλοντικό πρόβλημα. Παράλληλα, οι κλιματικές πολιτικές της Ευρώπης θα έχουν ένα σχετικά μικρό αντίκτυπο στην εξάντληση των ενεργειακών πόρων. Το μοντέλο επιβεβαιώνει ότι η μονομερής κλιματική δράση της ΕΕ θα οδηγήσει σε περιορισμένη μείωση των διεθνών τιμών των καυσίμων (Πίνακας 6-8). Μέχρι το 2030, η μείωση των εκπομπών στην Ευρώπη προβλέπεται να έχει ελάχιστη επίδραση στις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα εκτός ΕΕ. Το 2050, η μείωση των εκπομπών άνθρακα στην ΕΕ είναι μεγαλύτερη σε σύγκριση με το 2030 εξαιτίας της συνεχώς αυξανόμενης αυστηρότητας των κλιματικών πολιτικών, η οποία οδηγεί σε μειώσεις των παγκόσμιων τιμών κατά περισσότερο από 5% σε σύγκριση με το σενάριο αναφοράς. Σε αθροιστικούς όρους κατά την διάρκεια της περιόδου 2010 με 2050, οι εκπομπές άνθρακα στην Ευρωπαϊκή Ένωση προβλέπεται να μειωθούν κατά 26.3 Gtn. στο σενάριο “GHG-40-80” σε σύγκριση με το σενάριο αναφοράς, ενώ οι ρύποι εκτός ΕΕ προβλέπεται να αυξηθούν κατά 5.5 Gtn.; συνεπώς το ποσοστό διαρροής άνθρακα είναι 21.2% την περίοδο 2010-2050, το οποίο είναι κοντά στο άνω όριο της διεθνούς βιβλιογραφίας (5-25%) [147, 148, 150]. Το σχετικά υψηλό ποσοστό διαρροής άνθρακα που προβλέπεται από τον ΠΡΟΜΗΘΕΑ εξηγείται από την ενδογενή αναπαράσταση με σχετικά μεγάλη ακρίβεια των διεθνών τιμών στο μοντέλο και την μεγάλη ευαισθησία των παγκόσμιων τιμών σε διακυμάνσεις της ζήτησης υδρογονανθράκων.

% απόκλιση από το σενάριο αναφοράς	2020	2030	2040	2050
Διεθνής τιμή πετρελαίου	0.0%	-1.3%	-4.9%	-6.7%
Διεθνής τιμή φυσικού αερίου	0.0%	-0.7%	-4.6%	-5.1%
Διεθνής τιμή άνθρακα	-0.2%	-1.2%	-5.5%	-5.6%
Εκπομπές άνθρακα ΕΕ	-1.3%	-16.5%	-43.5%	-64.0%
Εκπομπές άνθρακα εκτός ΕΕ	0.0%	0.1%	0.7%	1.1%

Πίνακας 6-8: Αποτελέσματα του μοντέλου για τις διεθνείς τιμές καυσίμων (ποσοστιαίες αποκλίσεις του σεναρίου δράσης της ΕΕ από το σενάριο αναφοράς)

Το Γράφημα 6-9 παρουσιάζει το ποσοστό των περιοχών που αναπαρίστανται στον ΠΡΟΜΗΘΕΑ στη διαρροή άνθρακα και στην συνολική αύξηση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα σε σύγκριση με το σενάριο αναφοράς στις περιοχές εκτός ΕΕ. Το γράφημα δείχνει την μεγάλη σημασία του μεγέθους της χώρας, καθώς οι περιοχές

με την μεγαλύτερη αύξηση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα είναι η Κίνα (1.6 Gtn.) και οι αναδυόμενες (EMRG) οικονομίες (1.9 Gtn.) οι οποίες στο σενάριο αναφοράς εκπέμπουν την μεγαλύτερη ποσότητα διοξειδίου του άνθρακα και έχουν υψηλή ένταση άνθρακα ανά μονάδα οικονομικής δραστηριότητας. Αύξηση των εκπομπών άνθρακα προβλέπεται επίσης για την Βόρεια Αμερική (0.8 Gtn) και την περιοχή CIS (0.5 Gtn).



Γράφημα 6-9: Αποτελέσματα του μοντέλου για τα ποσοστά των διαφόρων περιοχών στην διαρροή άνθρακα εξαιτίας της μονομερούς κλιματικής δράσης της ΕΕ.

6.5 Σενάριο παγκόσμιας προσπάθειας μετριασμού της κλιματικής αλλαγής

6.5.1 Σχεδιασμός του σεναρίου

Η αποτελεσματική αντιμετώπιση της κλιματικής αλλαγής προϋποθέτει την επίτευξη δεσμευτικής συμφωνίας μείωσης των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου σε παγκόσμιο επίπεδο ώστε η αύξηση της μέσης παγκόσμιας θερμοκρασίας να παραμείνει μικρότερη από 2°C σε σύγκριση με τα προ-βιομηχανικά επίπεδα. Από οικονομική άποψη, η εκμετάλλευση της φθηνότερης επιλογής μείωσης των εκπομπών σε όλους τους κλάδους και τις χώρες με βάση το οριακό τους κόστος είναι η βέλτιστη οικονομικά πολιτική (ελαχιστοποίηση συνολικού κόστους μείωσης εκπομπών άνθρακα) [7]. Από την άλλη πλευρά, η υπογραφή και η υλοποίηση μιας παγκόσμιας δεσμευτικής και φιλόδοξης συμφωνίας μετριασμού των εκπομπών καθίσταται ιδιαίτερα δύσκολη, εξαιτίας των σημαντικών διαφορών μεταξύ των χωρών όσον αφορά: i) τις εκπομπές άνθρακα στο σενάριο αναφοράς, ii) τις δυνατότητες μείωσης τους, iii) τις προτεραιότητες των χωρών (πχ οικονομική ανάπτυξη, εκβιομηχάνιση, ενεργειακή ασφάλεια κλπ.) και iv) τις διαφορετικές οικονομικές, κοινωνικές και περιβαλλοντικές συνθήκες της κάθε περιοχής [138]. Συνεπώς, προκειμένου να υλοποιηθεί ένα διεθνές παγκόσμιο σχέδιο μείωσης των εκπομπών πρέπει να εξασφαλιστεί τόσο η οικονομική του αποτελεσματικότητα όσο και η ισότιμη συμμετοχή των χωρών, η οποία ενδέχεται να έχει σημαντικές συνέπειες για την κατανομή του κόστους μείωσης των εκπομπών άνθρακα μεταξύ των συμμετεχόντων. Οι Metz et al [151] ανέπτυξαν μια τυπολογία των

βασικών αρχών στις οποίες πρέπει να στηρίζεται ο καταμερισμός της μείωσης των εκπομπών. Οι αρχές αυτές είναι:

- i) **Ισότητα:** ίσα δικαιώματα στην χρήση της παγκόσμιας ατμόσφαιρας
- ii) **Υπευθυνότητα:** όσο μεγαλύτερη είναι η συνεισφορά στο πρόβλημα της κλιματικής αλλαγής (περισσότερες αθροιστικές εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα) τόσο μεγαλύτερο είναι το μερίδιο ευθύνης της χώρας
- iii) **Ικανότητα:** όσο μεγαλύτερος είναι ο πλούτος μίας χώρας τόσο μεγαλύτερο πρέπει να είναι το μερίδιο της στην προσπάθεια μείωσης των εκπομπών.

Σύμφωνα με τις παραπάνω αρχές, εναλλακτικοί κανόνες επιμερισμού των δικαιωμάτων εκπομπών έχουν αναλυθεί στην διεθνή βιβλιογραφία, οι σημαντικότεροι από τους οποίους είναι το *Contraction & Convergence* (ίσες εκπομπές ανά κάτοικο στις χώρες) και το *Soft Landing -Multi-Stage* [152]. Στην παρούσα ενότητα, θα εξεταστεί ένα σενάριο μείωσης των παγκόσμιων εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα με στόχο οι ατμοσφαιρικές συγκεντρώσεις αερίων του θερμοκηπίου να φτάσουν στα επίπεδα των 450 ppm μέχρι το 2100 [2]. Ο στόχος των 450 ppm είναι κλιματικός στόχος-ορόσημο [140] με βαρύνουσα σημασία για τις διεθνείς διαπραγματεύσεις για το κλίμα καθώς σύμφωνα με το IPCC η υλοποίηση αυτού του στόχου οδηγεί σε πιθανότητα περιορισμού της αύξησης της παγκόσμιας θερμοκρασίας μεγαλύτερη από 50% το 2100. Το σενάριο που αναπτύχθηκε με τον ΠΡΟΜΗΘΕΑ υποθέτει ότι η παγκόσμια συντονισμένη προσπάθεια μείωσης των εκπομπών ξεκινάει άμεσα. Έχει αποδειχθεί ότι οι αθροιστικές εκπομπές αποτελούν μια καλή προσέγγιση για τον καθορισμό της αύξησης της θερμοκρασίας [153]. Έτσι, ο στόχος που εισέρχεται στο μοντέλο αφορά τις παγκόσμιες αθροιστικές εκπομπές CO₂, οι οποίες σύμφωνα με [7] δεν πρέπει να ξεπερνάνε τους 1300 Gtn CO₂ την περίοδο 2000-2050, την στιγμή που στο σενάριο αναφοράς οι εκπομπές ανέρχονταν σε 1923 Gtn CO₂. Οι εκπομπές στο σενάριο 450 μειώνονται ήδη από το 2020 αναπαριστώντας μια αντιστροφή των τάσεων του παρελθόντος και του σεναρίου αναφοράς και το 2050 ανέρχονται στα επίπεδα των 15.5 Gtn CO₂ (στο σενάριο αναφοράς είναι 42 Gtn). Την περίοδο 2020-2050, οι εκπομπές άνθρακα μειώνονται με μέσο ετήσιο ρυθμό 2.7%. Συνεπώς, οι παγκόσμιες εκπομπές CO₂ προβλέπεται να μειωθούν κατά 50% το 2050 σε σχέση με το 2010, ενώ η μείωση από τα επίπεδα του 1990 ανέρχεται σε 29%.

6.5.2 Επιπτώσεις στο παγκόσμιο ενεργειακό σύστημα

Προκειμένου να εξασφαλισθεί το ελάχιστο κόστος και η μεγαλύτερη αποτελεσματικότητα των πολιτικών μείωσης των εκπομπών άνθρακα, το σενάριο υποθέτει την εκμετάλλευση των φθηνότερων επιλογών μείωσης του CO₂ και συνεπώς έναν ενιαίο παγκόσμιο φόρο άνθρακα. Η επίτευξη του στόχου μείωσης των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου οδηγεί σε αύξηση του μέσου παγκόσμιου φόρου άνθρακα στα επίπεδα των 103 €/2010/ tn CO₂ το 2030 και στα 368 €/2010/ tn CO₂ το 2050 (από 48 € στο σενάριο αναφοράς). Η επιβολή της υψηλής τιμής άνθρακα (*carbon value*) οδηγεί σε μείωση των παγκόσμιων εκπομπών κατά 63% το 2050 σε σχέση με το σενάριο αναφοράς, εξαιτίας:

- Μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης: ο δείκτης ενεργειακής έντασης προς ΑΕΠ μειώνεται κατά 20% το 2050 σε σύγκριση με το σενάριο αναφοράς (Πίνακας 6-9)
- Αύξηση του ποσοστού των ΑΠΕ στην πρωτογενή κατανάλωση ενέργειας από 18% στο σενάριο αναφοράς σε 31% στο σενάριο χαμηλών εκπομπών άνθρακα το 2050
- Αύξηση του ποσοστού των τεχνολογιών χαμηλού και μηδενικού άνθρακα στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας: Στο σενάριο 450, οι τεχνολογίες ΑΠΕ και CCS αντιπροσωπεύουν το 79% της συνολικής παγκόσμιας ηλεκτροπαραγωγής το 2050, ενώ το ποσοστό τους στο σενάριο αναφοράς είναι 46%.
- Διείσδυση των ηλεκτρικών αυτοκινήτων. Η μείωση του κόστους σε συνδυασμό με την παροχή αξιόπιστης υποδομής για την επαναφόρτιση των μπαταριών οδηγεί σε μεγάλη κλίμακα ανάπτυξη των οχημάτων που χρησιμοποιούν ηλεκτρισμό, τα οποία αντιπροσωπεύουν το 61% του παγκόσμιου στόλου αυτοκινήτων το 2050.
- Υποκατάσταση των ορυκτών καυσίμων από ηλεκτρική ενέργεια στην βιομηχανία και στα νοικοκυριά με το ποσοστό του ηλεκτρισμού στην τελική ζήτηση ενέργειας να αυξάνεται από 31.5% στο σενάριο αναφοράς σε 45% στο σενάριο 450 το 2050.

Η φιλόδοξη προσπάθεια μείωσης των παγκόσμιων εκπομπών οδηγεί σε μείωση της πρωτογενούς ζήτησης υδρογονανθράκων σε σύγκριση με το σενάριο αναφοράς; Το 2050, η μείωση της κατανάλωσης πετρελαίου και άνθρακα προβλέπεται να είναι 47%. Η χαμηλότερη παγκόσμια ζήτηση για ορυκτά καύσιμα οδηγεί σε μείωση των διεθνών τιμών τους σύμφωνα με το μοντέλο, η οποία το 2050 προβλέπεται να είναι 54% για το πετρέλαιο, 47% για το φυσικό αέριο και 37% για τον άνθρακα σε σύγκριση με το σενάριο αναφοράς (οι μειώσεις στις διεθνείς τιμές είναι σύμφωνες με τον οδικό χάρτη 2050 για την ενέργεια στην ΕΕ [8]). Η αντίδραση των σημαντικότερων παραγωγών καυσίμων ώστε να διατηρήσουν τις διεθνείς τιμές σε υψηλά επίπεδα μέσω περιορισμών στην παραγωγή και συμπεριφοράς καρτέλ (π.χ. ΟΠΕΚ), δεν μπορεί να αποκλειστεί τουλάχιστον σε βραχυπρόθεσμο ορίζοντα. Ωστόσο, μακροπρόθεσμα η ικανότητα των εξαγωγέων ενέργειας να ασκήσουν ολιγοπωλιακή ισχύ στην παγκόσμια αγορά είναι αμφίβολη σε ένα πλαίσιο φιλόδοξων παγκόσμιων πολιτικών για την κλιματική αλλαγή.

Όσον αφορά τις τεχνολογίες ηλεκτροπαραγωγής, η κύρια τάση είναι η ραγδαία μείωση του ποσοστού των ορυκτών καυσίμων χωρίς CCS από 67% το 2010 σε 37% το 2050 στο σενάριο αναφοράς και σε μόλις 3% στο 450. Η μείωση αυτή αντισταθμίζεται από την αύξηση της ηλεκτροπαραγωγής μέσω ΑΠΕ (οι οποίες καλύπτουν το 53% της παγκόσμιας ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας στο σενάριο 450 το 2050) και από την εκτεταμένη διείσδυση των τεχνολογιών CCS (31% το 2050). Επιπλέον, μετά το 2040 το σενάριο χαμηλών εκπομπών άνθρακα οδηγεί σε σταδιακή ανάπτυξη της τεχνολογίας CCS με αεριοποίηση βιομάζας (σε συμφωνία με [7, 10]), η οποία καλύπτει το 5% της παγκόσμιας ηλεκτροπαραγωγής το 2050. Σε αρκετές περιοχές του κόσμου, το ποσοστό των ΑΠΕ διακοπτόμενης ισχύος προβλέπεται να αυξηθεί πάνω από 30% (πχ ΕΕ, Β. Αφρική). Αντίθετα, το ποσοστό της πυρηνικής ενέργειας προβλέπεται να αυξηθεί μόλις 1 ποσοστιαία μονάδα το 2050, καθώς οι ανησυχίες δημόσιας αποδοχής και τα μεγάλα κεφαλαιουχικά κόστη επένδυσης δεν μεταβάλλονται στο πλαίσιο του σεναρίου 450.

Πίνακας 6-9: Κυριότερες επιπτώσεις του σεναρίου 450 στο παγκόσμιο ενεργειακό σύστημα σε σύγκριση με το σενάριο αναφοράς (όπως ποσοτικοποιήθηκαν με το μοντέλο)

Παγκόσμιο επίπεδο	2030		2050	
	Αναφορά	450	Αναφορά	450
Φόρος άνθρακα (€ 2010/tn)	11	103	48	368
Δείκτης CO ₂ από το 1990	196	116	196	71.4
Μερίδιο ΑΠΕ στην πρωτογενή ζήτηση ενέργειας (%)	14	20	18	31
Μερίδιο ΑΠΕ στην παραγωγή ηλεκτρισμού (%)	27	47	36	53
Μερίδιο CCS στην παραγωγή ηλεκτρισμού (%)	0.0	18	9.5	31
Μερίδιο ηλεκτρισμού στην τελική ζήτηση ενέργειας (%)	25	27	32	45
Μερίδιο plug-in υβριδικών (%)	1.4	1.6	8.4	25.4
Μερίδιο ηλεκτρικών αυτοκινήτων (%)	0.1	0.1	2.2	35.8
Ενεργειακή ένταση του ΑΕΠ (δείκτης 2010=100)	66.2	55.6	51.0	40.7
Μεταβολές σε σχέση με το σενάριο αναφοράς (σε %)				
	2020	2030	2040	2050
Παγκόσμιες Εκπομπές CO ₂	-6.0	-40.8	-53.8	-63.4
Διεθνής τιμή πετρελαίου	-0.2	-6.5	-32.9	-53.7
Διεθνής τιμή φυσικού αερίου	-0.2	-9.7	-28.6	-46.7
Διεθνής τιμή άνθρακα	-4.5	-27.0	-30.2	-37.1

6.5.3 Ανάλυση αποσύνθεσης και κόστος μείωσης εκπομπών ανά περιοχή

Η επιβολή του ενιαίου παγκόσμιου φόρου οδηγεί σε διαφορετικά ποσοστά μείωσης των εκπομπών ανά περιοχή, τα οποία εξαρτώνται από την δομή του ενεργειακού και οικονομικού συστήματος, από την διαθεσιμότητα επιλογών χαμηλού άνθρακα και από την αυστηρότητα των κλιματικών πολιτικών στο σενάριο αναφοράς. Αυτό είναι εμφανές στο Γράφημα 6-10, που δείχνει ότι οι μειώσεις των αθροιστικών εκπομπών CO₂ στις αναπτυγμένες οικονομίες προβλέπεται να είναι χαμηλότερες σε σχέση με τις αναπτυσσόμενες οικονομίες. Οι κυριότεροι λόγοι είναι:

- Οι μικρότερες τιμές ενέργειας στις αναπτυσσόμενες οικονομίες που σημαίνει μεγαλύτερη σχετική αύξηση των τιμών με την επιβολή ενιαίου φόρου άνθρακα.
- Χαμηλότερες σε ένταση κλιματικές πολιτικές στις αναπτυσσόμενες οικονομίες στο σενάριο αναφοράς
- Οι αναπτυσσόμενες χώρες χαρακτηρίζονται από υψηλές δυνατότητες για χαμηλού κόστους υποκαταστάσεις (πχ εξοικονόμηση ενέργειας, υποκατάσταση πετρελαίου στην ηλεκτροπαραγωγή, μείωση κατανάλωσης άνθρακα στα νοικοκυριά).

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα του μοντέλου, οι αναπτυσσόμενες περιοχές ευθύνονται για το 81% της μείωσης των παγκόσμιων εκπομπών με την Κίνα και την Ινδία να αντιπροσωπεύουν το 52% της παγκόσμιας μείωσης των εκπομπών σε σύγκριση με το σενάριο αναφοράς. Αυτό καταδεικνύει την μεγάλη σημασία των αναπτυσσόμενων χωρών για την παγκόσμια προσπάθεια μετριασμού της κλιματικής αλλαγής προς τον στόχο σταθεροποίησης της αύξησης της μέσης παγκόσμιας θερμοκρασίας στους 2°C.

Ένα χρήσιμο εργαλείο για την ανάλυση των παραγόντων που οδηγούν σε μείωση των εκπομπών CO₂ είναι η ταυτότητα Kaya [154]. Στην παρούσα ενότητα χρησιμοποιούμε μια διευρυμένη εκδοχή της ταυτότητας Kaya, που μας δίνει τη δυνατότητα να αποσυνθέσουμε τις εκπομπές άνθρακα σε δομικούς παράγοντες που συμβολίζουν την ενεργειακή ένταση του ΑΕΠ, το ποσοστό των ορυκτών καυσίμων στην ενεργειακή ζήτηση και την ένταση άνθρακα του μίγματος των ορυκτών καυσίμων. Η αποσύνθεση (*decomposition*) είναι ένας υπολογισμός με βάση τα αποτελέσματα του μοντέλου ΠΡΟΜΗΘΕΑΣ και πραγματοποιείται με τον ακόλουθο τύπο:

$$CO_2 = \left(\frac{Primary\ Energy}{GDP} \right) \times \left(\frac{Fossil\ Fuels}{Primary\ Energy} \right) \times \left(\frac{CO_2}{Fossil\ Fuels} \right) \times GDP \quad (1)$$

Για να συγκριθεί το σενάριο μετριασμού 450 με το σενάριο αναφοράς, οι όροι της παραπάνω εξίσωσης μετατρέπονται σε γραμμική έκφραση-Index decomposition [43] που περιλαμβάνει ρυθμούς μεταβολής (εξίσωση 2).

$$dln(CO_2) = dln\left(\frac{PE}{GDP}\right) + dln\left(\frac{FF}{PE}\right) + dln\left(\frac{CO_2}{FF}\right) + dln(GDP) \quad (2)$$

Τα τέσσερα συστατικά του δεξιού μέρους της εξίσωσης ερμηνεύονται ως εξής:

1. Η μείωση του δείκτη της πρωτογενούς κατανάλωσης ενέργειας προς την οικονομική δραστηριότητα (ΑΕΠ) αντιστοιχεί σε εξοικονόμηση ενέργειας
2. Η μείωση του ποσοστού των ορυκτών καυσίμων στην συνολική πρωτογενή ενέργεια μεταφράζεται ως αύξηση της διείσδυσης των πηγών ενέργειας μηδενικού άνθρακα (ΑΠΕ και πυρηνική ενέργεια) στο ενεργειακό μείγμα.
3. Η μείωση της αναλογίας των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα ως προς την κατανάλωση ορυκτών καυσίμων αντιστοιχεί σε υποκαταστάσεις στο μείγμα ορυκτών καυσίμων (π.χ. διείσδυση φυσικού αερίου, τεχνολογίες CCS)
4. Μια μεταβολή του ΑΕΠ επηρεάζει άμεσα τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα, τόσο στους τομείς της ζήτησης όσο και στους τομείς της προσφοράς ενέργειας

Γενικά, υπάρχουν δυο κύριες μέθοδοι για την αποσύνθεση των μεταβολών στις εκπομπές άνθρακα. Οι εξισώσεις (1) και (2) αναπαριστούν το index decomposition που χρησιμοποιείται στην παρούσα ανάλυση για την εξέταση των μεταβολών σε σχέση με το σενάριο αναφοράς. Επιπλέον, συχνά χρησιμοποιείται η αθροιστική μέθοδος LMDI-1 (additive log mean Divisia index), η οποία έχει μερικά πλεονεκτήματα σε σχέση με άλλες μεθόδους αποσύνθεσης καθώς δίνει τέλεια αποσύνθεση (μηδενικό σφάλμα), μπορεί να διαχειριστεί μηδενικές και αρνητικές τιμές των εκπομπών και η διατύπωσή της είναι σχετικά απλή (δεν εξαρτάται από το πλήθος επεξηγηματικών παραγόντων). Η τεχνική

καθορίζει την συνεισφορά κάθε παράγοντα στις μεταβολές των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα μεταξύ των σεναρίων που εξετάζονται με βάση το σενάριο αναφοράς. Ακολουθώντας το [157] η αποσύνθεση των εκπομπών LMDI-1 ορίζεται ως το άθροισμα των αποτελεσμάτων της αύξησης του ΑΕΠ (ΔGDP), της μεταβολής στην ενεργειακή ένταση του ΑΕΠ (ΔEI) και της μεταβολής στην ένταση άνθρακα της ενέργειας (ΔCI).

$$\Delta CO_2 = \Delta GDP + \Delta EI + \Delta CI \quad (3)$$

όπου η συνεισφορά κάθε παράγοντα F (GDP , EI ή CI) στις μεταβολές των εκπομπών από το σενάριο χ στο σενάριο y καθορίζεται ως:

$$\Delta F = \frac{CO_{2y} - CO_{2x}}{\ln CO_{2y} - \ln CO_{2x}} * \ln \left(\frac{F_y}{F_x} \right) \quad (4)$$

Ένα πρόβλημα της μεθόδου που παρουσιάστηκε έγκειται στο ότι δεν μπορεί να διαχειριστεί αρνητικές εκπομπές που προκύπτουν από εκτεταμένη διείδυση των τεχνολογιών βιομάζας με CCS. Στα εξεταζόμενα σενάρια με τον ΠΡΟΜΗΘΕΑ κάτι τέτοιο δεν συμβαίνει τουλάχιστον μέχρι το 2050, αλλά η μελέτη [157] έδειξε ότι αυτό είναι ένα υπαρκτό ενδεχόμενο στα αποτελέσματα αρκετών μοντέλων ενέργειας-οικονομίας για την περίοδο μετά το 2050 σε σενάριο φιλόδοξης κλιματικής δράσης. Ωστόσο, υπάρχει μια αναλυτική μεθοδολογία για την διαχείριση αρνητικών τιμών [157]: από την στιγμή που ο παράγοντας που αλλάζει πρόσημο από θετικό σε αρνητικό είναι η ένταση άνθρακα της ενέργειας, ορίζεται ενδιάμεσο σημείο τέτοιο (mid) ώστε $CI_{mid} = 0$ και $GDP_{mid}, EI_{mid} > 0$. Ύστερα διαχωρίζω το διάστημα σε 2 μέρη: από το αρχικό σημείο του σεναρίου αναφοράς (GDP_x, EI_x, CI_x) ως το ενδιάμεσο σημείο ($GDP_{mid}, EI_{mid}, CI_{mid}$) και από το ενδιάμεσο ως το τελικό σημείο του σεναρίου (GDP_y, EI_y, CI_y). Συνεπώς η συνεισφορά κάθε επεξηγηματικού παράγοντα F (ΔEI , ενεργειακή ένταση ΔEI , ένταση άνθρακα) σε μια αλλαγή στις εκπομπές από το σενάριο χ στο σενάριο y δίνεται:

$$\Delta F = \lim_{CI^- \rightarrow 0} \frac{CO_{2y} - CO_{2mid}^-}{\ln CO_{2y} - \ln CO_{2mid}^-} * \ln \left(\frac{F_y}{F_{mid}^-} \right) + \lim_{CI^+ \rightarrow 0} \frac{CO_{2mid}^+ - CO_{2x}}{\ln CO_{2mid}^+ - \ln CO_{2x}} * \ln \left(\frac{F_{mid}^+}{F_x} \right) \quad (5)$$

Επιλύοντας τα όρια, υπολογίζεται η συνεισφορά του κάθε παράγοντα και άρα: $\Delta GDP = 0 + 0 = 0$, $\Delta EI = 0 + 0 = 0$ και $\Delta CI = CO_{2y} - CO_{2x}$ που σημαίνει ότι η ένταση άνθρακα της τελικής ζήτησης ενέργειας ευθύνεται για το 100% της μεταβολής των εκπομπών από το σενάριο χ στο σενάριο y όταν οι εκπομπές γίνονται αρνητικές.

Από την στιγμή που ο ΠΡΟΜΗΘΕΑΣ είναι μοντέλο μερικής ισορροπίας, δηλαδή η οικονομική δραστηριότητα είναι εξωγενής και δεν αλλάζουν στα σενάρια, η σημασία του τέταρτου παράγοντα στο σενάριο 450 (σε σύγκριση με το σενάριο αναφοράς) είναι μηδενική. Κάθε περιοχή πετυχαίνει τον στόχο του σεναρίου 450 με διαφορετικό συνδυασμό των τριών συστατικών (εξίσωση 2). Στις περισσότερες χώρες, ο κύριος παράγοντας μείωσης των εκπομπών από το σενάριο αναφοράς είναι η μείωση της έντασης άνθρακα του μίγματος ορυκτών καυσίμων, εξαιτίας της υποκατάστασης του άνθρακα από το φυσικό αέριο και της μεγάλης κλίμακας ανάπτυξη των τεχνολογιών CCS συμπεριλαμβανομένης της «αεριοποίησης βιομάζας με CCS», η οποία οδηγεί σε αφαίρεση άνθρακα από την ατμόσφαιρα [60]. Η επέκταση των τεχνολογιών μηδενικού

άνθρακα (ΑΠΕ και πυρηνική ενέργεια) ευθύνεται για το 33% της παγκόσμιας μείωσης των εκπομπών άνθρακα αθροιστικά μέχρι το 2050. Το ποσοστό αυτό είναι υψηλότερο σε περιοχές με ήδη αποφασισμένες πολιτικές προώθησης των ΑΠΕ (πχ Ευρωπαϊκή Ένωση) και σε περιοχές με μεγάλες δυνατότητες επέκτασης της εγκατεστημένης ισχύος ΑΠΕ. Ο ρόλος της αύξησης της ενεργειακής απόδοσης είναι σημαντικός για την επίτευξη του στόχου του μετριασμού της κλιματικής αλλαγής ειδικά σε περιοχές με αυξημένη ένταση ενέργειας προς ΑΕΠ στο σενάριο αναφοράς (Ινδία, Κίνα, Βόρεια Αφρική). Η ανάλυση επιβεβαιώνει ότι όσο αυξάνεται η ένταση των κλιματικών πολιτικών (μεγαλύτερα carbon values) τόσο μεγαλύτερη σημασία αποκτά η μείωση της έντασης άνθρακα (εκπομπές CO₂ προς ζήτηση ενέργειας) σε σύγκριση με την ενεργειακή εξοικονόμηση. Μια αναλυτική εξέταση του θέματος σε εναλλακτικά σενάρια κλιματικής πολιτικής με την χρήση πολλαπλών μοντέλων ενεργειακής και οικονομικής ανάλυσης περιέχεται στην μελέτη [157].

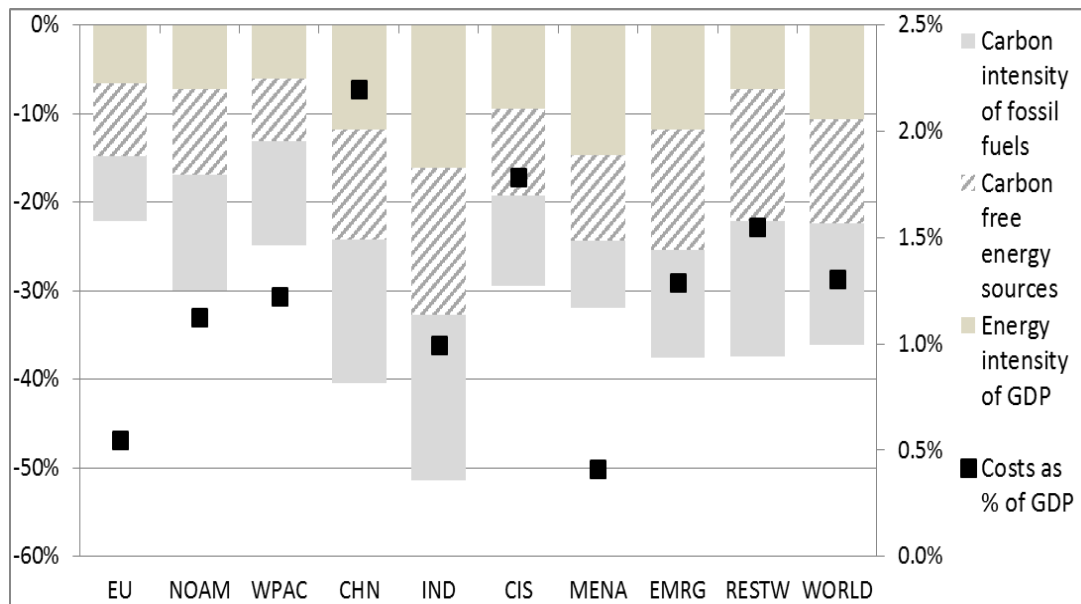
Η επιβολή του αυξημένου φόρου άνθρακα και η υλοποίηση κλιματικών πολιτικών συνεπάγεται επιπλέον κόστος για το ενεργειακό σύστημα (σε σύγκριση με το σενάριο αναφοράς) εξαιτίας του αυξημένου κόστους της καύσης ορυκτών καυσίμων και των υποκαταστάσεων στο ενεργειακό μίγμα υπέρ των πιο ακριβών τεχνολογιών χαμηλού άνθρακα. Το συνολικό κόστος του σεναρίου 450 εξαρτάται πρωταρχικά από την προσπάθεια μείωσης των εκπομπών CO₂ σε κάθε περιοχή. Αυτός είναι ο κυριότερος λόγος για τον οποίον το κόστος είναι σχετικά χαμηλό στις περιοχές με μικρότερη μείωση εκπομπών (ΕΕ, Βόρεια Αμερική, Ιαπωνία). Για παράδειγμα, στην περιοχή της Ευρώπης το επιπλέον αθροιστικό κόστος του σεναρίου 450 υπολογίστηκε σε μόλις 0.5% του ΑΕΠ την περίοδο 2010-2050. Από την άλλη πλευρά, οι μεγάλης κλίμακας υποκαταστάσεις στο ενεργειακό μίγμα και οι εκτεταμένες επενδύσεις σε εξοικονόμηση ενέργειας και ανάπτυξη των ΑΠΕ στις αναπτυσσόμενες οικονομίες οδηγούν σε αύξηση του συνολικού κόστους του ενεργειακού συστήματος σαν ποσοστό του ΑΕΠ κατά 2.2 ποσοστιαίες μονάδες στην Κίνα, κατά 1.8 στην περιοχή CIS και κατά 1.3-1.5 μονάδες στις υπόλοιπες αναπτυσσόμενες χώρες. Εξαιρεση αποτελεί η περιοχή MENA στην οποία το αθροιστικό κόστος μείωσης των εκπομπών σαν ποσοστό του ΑΕΠ είναι μόλις 0.4%, εξαιτίας της εκμετάλλευσης της σχετικά φθηνής δυναμικότητας της ηλιακής και της αιολικής ενέργειας. Επιγραμματικά, οι κυριότεροι παράγοντες που καθορίζουν το κόστος της κλιματικής πολιτικής ανά περιοχή είναι:

- η μείωση των εκπομπών άνθρακα σε σύγκριση με το σενάριο αναφοράς
- ο δείκτης έντασης άνθρακα ανά μονάδα ΑΕΠ
- η δομή των οικονομιών (πχ μερίδιο των ενεργοβόρων βιομηχανιών στο ΑΕΠ)
- οι διαθέσιμες δυνατότητες για χαμηλού κόστους επενδύσεις σε εξοικονόμηση ενέργειας και ανάπτυξη των ΑΠΕ.

Πρόσφατες αναλύσεις βασισμένες σε παγκόσμια μοντέλα ενέργειας-οικονομίας [7, 155] έδειξαν ότι, ελλείψει συγκεκριμένων μηχανισμών επιμερισμού των βαρών από τις κλιματικές πολιτικές, η κατανομή της παγκόσμιας προσπάθειας μείωσης των εκπομπών (μετρούμενη σε μείωση του ΑΕΠ ή κόστος του ενεργειακού συστήματος)

είναι άνισα κατανομημένη μεταξύ των περιοχών. Οι μηχανισμοί επιμερισμού των βαρών είναι προγράμματα στα οποία, για παράδειγμα, οι χώρες με μείωση των εκπομπών μικρότερη του παγκόσμιου μέσου όρου (πχ αναπτυγμένες οικονομίες) αποζημιώνουν άλλες χώρες με μεγαλύτερη προσπάθεια ή εναλλακτικά, οι μειώσεις των εκπομπών κατανέμονται στις περιοχές με βάση την ιστορική τους ευθύνη (αθροιστικές εκπομπές ανά κάτοικο) και την οικονομική τους κατάσταση (ΑΕΠ ανά κάτοικο). Στην παρούσα ανάλυση, ο PROMHΘΕΑΣ δεν εξετάζει κανένα μηχανισμό κατανομής βαρών και το κόστος μετριασμού της κλιματικής αλλαγής διαφέρει μεταξύ των περιοχών, καθώς ο σκοπός της ανάλυσης είναι η ποσοτικοποίηση του κόστους μετριασμού της κλιματικής αλλαγής σε ένα οικονομικά αποδοτικό σενάριο, στο οποίο δηλαδή το οριακό κόστος μείωσης εκπομπών εξισώνεται σε όλες τις περιοχές και κλάδους.

Το κόστος του σεναρίου είναι σχετικά μικρό για τους κύριους εισαγωγείς ενέργειας (π.χ. ΕΕ, Δυτικός Ειρηνικός, Ινδία) εξαιτίας της μείωσης των διεθνών τιμών εισαγωγής πετρελαίου, άνθρακα και φυσικού αερίου που προκαλείται από την υλοποίηση κλιματικών πολιτικών σε παγκόσμιο επίπεδο και την επακόλουθη μείωση της παγκόσμια ζήτησης υδρογονανθράκων. Η ανάλυση με τον PROMHΘΕΑ μπορεί να συμπληρωθεί με την ανάλυση γενικής ισορροπίας (πχ με το μοντέλο GEM-E3 [113, 52]) ώστε να παρέχει επιπλέον εκτιμήσεις για το κόστος μετριασμού κλιματικής αλλαγής λαμβάνοντας υπόψη τις συνέπειες πολιτικών σε όλους τους κλάδους της οικονομίας, τις αυξημένες επενδύσεις για τον μετασχηματισμό του συστήματος, την μείωση του διαθέσιμου εισοδήματος, το διεθνές εμπόριο και συνολικά την μεταβολή του ΑΕΠ.



Γράφημα 6-10: Ανάλυση αποσύνθεσης μεταβολών στις εκπομπές στο σενάριο 450 σε σύγκριση με το σενάριο αναφοράς όπως προέκυψαν από το μοντέλο- αθροιστική μείωση εκπομπών (αριστερός άξονας) και κόστος σεναρίου 450 σαν ποσοστό του ΑΕΠ (δεξιός άξονας) 2010-2050

6.6 Σενάριο αβεβαιότητας για τις κλιματικές πολιτικές

Η παρούσα ενότητα περιέχει την προσπάθεια μοντελοποίησης της λήψης αποφάσεων υπό το καθεστώς αβεβαιότητας με το μοντέλο PROMHΘΕΑ. Συγκεκριμένα, πραγματοποιήθηκε εκτεταμένη ανάλυση όσον αφορά την επιλογή της βέλτιστης στρατηγικής για την μείωση των εκπομπών άνθρακα αν υποθεθεί αβεβαιότητα για τις κλιματικές πολιτικές. Το βασικό πρόβλημα που αντιμετωπίζουν οι φορείς χάραξης κλιματικής πολιτικής είναι η απόφαση για το βέλτιστο επίπεδο και τον χρόνο της μείωσης των εκπομπών άνθρακα και των επενδύσεων για προσαρμογή στην κλιματική αλλαγή. Αυτό επιδρά άμεσα στις βραχυπρόθεσμες επενδυτικές αποφάσεις του ενεργειακού τομέα εξαιτίας των μεγάλων σε διάρκεια χρόνων κατασκευής και ζωής των ενεργειακών επενδύσεων. Στην ανάλυση με τον PROMHΘΕΑ, επικεντρώνομαι στις πολιτικές μείωσης των παγκόσμιων εκπομπών άνθρακα που συνδέονται στενά με το ενεργειακό σύστημα. Συγκεκριμένα αναλύω τις επιδράσεις της αβεβαιότητας στον σχεδιασμό βέλτιστης κλιματικής πολιτικής και προτείνω ένα πλαίσιο αποφάσεων που συνδυάζει 2 κριτήρια για την στοχαστική βελτιστοποίηση (αναμενόμενη τιμή και κριτήριο MiniMax). Η βασική ερώτηση είναι: πώς μπορεί να καθοριστεί μια ενδιάμεση κλιματική στρατηγική πριν γίνουν γνωστές οι μακροπρόθεσμες κλιματικές πολιτικές με βεβαιότητα; Η προσπάθεια έγκειται στον καθορισμό στρατηγικής που αντισταθμίζει τους κινδύνους (hedging strategy) απέναντι σε όλες τις πιθανές κλιματικές πολιτικές, οι οποίες μοντελοποιούνται σαν διαφορετικοί περιορισμοί στις παγκόσμιες εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα αθροιστικά για την περίοδο 2000-2050. Στην ανάλυση γίνεται χρήση τόσο κλασσικού πλαισίου απόφασης με ρίσκο (για ένα σύνολο σεναρίων που το καθένα έχει μια πιθανότητα πραγματοποίησης), όσο και του κριτηρίου MiniMax Regret για να καθορίσω την βέλτιστη στρατηγική αντιστάθμισης κινδύνου υπό αβεβαιότητα.

Στα προβλήματα λήψης απόφασης με αβεβαιότητα, χρειάζεται να διαχωριστεί ο αποφασίζοντας από τις πιθανές «καταστάσεις της φύσης», που οδηγούν στην τελική κατάσταση των αβέβαιων παραμέτρων επιλύοντας την αβεβαιότητα στο μέλλον. Ο αποφασίζων έχει να επιλέξει μεταξύ βραχυπρόθεσμων δράσεων (πριν αρθεί η αβεβαιότητα) και μακροπρόθεσμων στρατηγικών με βάση την βελτιστοποίηση της χρησιμότητάς του ή την ελαχιστοποίηση του κόστους. Σε ντετερμινιστικό περιβάλλον η συνάρτηση χρησιμότητας ορίζει τις προτιμήσεις του κάθε αποφασίζοντα σχετικά με τις εναλλακτικές επιλογές. Σε καθεστώς αβεβαιότητας, η συνάρτηση χρησιμότητας εφαρμόζεται επί των διαφορετικών «καταστάσεων της φύσης αφού επιλυθεί η αβεβαιότητα. Με βάση την χρησιμότητα την οποία ο αποφασίζων έχει αναθέσει σε κάθε ενδεχόμενο, προκύπτει η συνολική χρησιμότητα υπό αβεβαιότητα, η οποία εξαρτάται επίσης και από την συνάρτηση πιθανότητας που χρησιμοποιείται για τα εναλλακτικά ενδεχόμενα (στην περίπτωση διακριτών ενδεχομένων το άθροισμα των πιθανοτήτων που ανατίθενται πρέπει να είναι ίσο με την μονάδα). Κάθε αποτέλεσμα είναι συνάρτηση των επιλογών του αποφασίζοντα σε συνδυασμό με την κατάσταση που επέλεξε η φύση.

Θεωρητικά, ορίζω ως $U(x)$ την αναμενόμενη συνάρτηση χρησιμότητας επί των ενεργειών του αποφασίζοντα von Neumann-Morgenstern (v.N-M). Η ανάλυση θεωρεί ότι είτε οι πιθανότητες των διαφόρων «καταστάσεων της φύσης» είναι αντικειμενικά

γνωστές είτε όλοι οι συμμετέχοντες στην αγορά συμφωνούν για τις πιθανότητες τους. Επιπλέον ορίζω ως απλή λοταρία το σύνολο $E = (d_1, \dots, d_n, \dots, d_N; p_1, \dots, p_n, \dots, p_N)$ με πιθανότητες $p_n \geq 0$ για όλα τα ενδεχόμενα n και d_n είναι το κόστος (ή αντίστοιχα το κέρδος) του κάθε ενδεχομένου με $\sum_n p_n = 1$ όπου p_n είναι η πιθανότητα εμφάνισης του ενδεχομένου n . Υποθέτω ότι \mathcal{T} είναι το σύνολο των απλών λοταριών που ορίζεται επί του συνόλου των ενδεχομένων και ότι ο αποφασίζων λαμβάνει ορθολογικές αποφάσεις που ικανοποιούν τις παρακάτω ιδιότητες:

- Πληρότητα, δηλαδή για κάθε ενδεχόμενο x, y ισχύει $x \succeq y$ ή $x \succ y$ ή $x \sim y$
- Μεταβατικότητα, για κάθε x, y, z ισχύει αν $x \succeq y$ και $y \succeq z$ τότε και $x \succeq z$
- Μονοτονικότητα, δηλαδή αν $x \geq y$ τότε $x \succeq y$
- Συνέχεια, δηλαδή για κάθε απλή λοταρία η σχέση προτιμήσεων \succeq στον χώρο των απλών λοταριών \mathcal{T} είναι συνεχής δηλαδή αν $E \leq M \leq N$ τότε υπάρχει πιθανότητα $p \in [0,1]$ τέτοια ώστε τέτοιο ώστε $pE + (1-p)N \sim M$. Η σημαντικότερη συνέπεια του αξιώματος της συνέχειας είναι: αν y προτιμάται αυστηρά έναντι της z και x είναι ένα bundle κατανάλωσης το οποίο είναι αρκετά κοντά στο y τότε το x πρέπει να προτιμάται αυστηρά έναντι του z και άρα για μικρές αλλαγές στις πιθανότητες δεν αλλάζει η ταξινόμηση μεταξύ δύο λοταριών.

Στο πλαίσιο της αβεβαιότητας, η χρησιμότητα εφαρμόζεται επί του τελικού ενδεχομένου που προκύπτει τόσο από τις ενέργειες του αποφασίζοντα όσο και την τελική κατάσταση της φύσης και συνεπώς ο αποφασίζων χρησιμοποιεί την συνάρτηση χρησιμότητας επί τελικών ενδεχομένων. Αν ισχύουν τα παραπάνω μπορεί να οριστεί η συνάρτηση αναμενόμενης χρησιμότητας von Neumann-Morgenstern (v.N-M) σαν $U: \mathcal{T} \rightarrow \mathbb{R}$ αν υπάρχουν αριθμοί (w_1, \dots, w_N) στα N τελικά ενδεχόμενα τέτοια ώστε για κάθε απλή λοταρία να ισχύει: $U(L) = u_1 p_1 + \dots + u_N p_N$. Η συνάρτηση χρησιμότητας δε μπορεί να είναι διαφορετική για κάθε δράση του αποφασίζοντα για την ίδια κατάσταση της φύσης και άρα ο αποφασίζων αναθέτει χρησιμότητα δεδομένου ότι καταλήγει με την άρση της αβεβαιότητας στο ίδιο αποτέλεσμα. Στην ανάλυση, τα αποτελέσματα του μοντέλου που είναι συνδυασμός βραχυπρόθεσμων αποφάσεων και καταστάσεων της φύσης αποτιμώνται σε συνολικό κόστος του ενεργειακού συστήματος και υποθέτω ότι η συνάρτηση χρησιμότητας είναι η ίδια σε όλα τα εναλλακτικά ενδεχόμενα. Υπάρχουν διάφορες συμπεριφορές για την αντιμετώπιση της αβεβαιότητας: (α) ο αποφασίζων είναι επιρρεπής στον κίνδυνο και οι επιλογές του οδηγούν σε ελαχιστοποίηση κόστους με παράλληλη αύξηση του ρίσκου, (β) ουδέτερος προς τον κίνδυνο, δηλαδή επιδιώκει μόνο την ελαχιστοποίηση του κόστους ανεξαρτήτως της μεταβλητότητας και (γ) ο αποφασίζων αποστρέφεται τον κίνδυνο και προσπαθεί να μειώσει την διακύμανση των αποτελεσμάτων των δράσεων του. Γενικά όπως έχουμε ήδη αναλύσει, ο αποφασίζων τείνει να επιλέξει τις επενδύσεις με τη μικρότερη μεταβλητότητα (δηλαδή η συνάρτηση χρησιμότητας είναι κοίλη και προσομοιώνει συμπεριφορά αποστροφής στον κίνδυνο).

Κατά την εξέταση των αβεβαιοτήτων χρειάζεται να προχωρήσω πέρα από την ανάλυση Monte Carlo επειδή: (1) η ανάλυση αυτή δεν επιτρέπει την ποσοτικοποίηση της πιθανότητας της τιμής εισόδου, (2) η παραγωγή πολλών αντιφατικών σεναρίων δεν οδηγεί σε σαφή συμπεράσματα για βραχυπρόθεσμες πολιτικές και (3) το κόστος της αβεβαιότητας παραμένει άγνωστο. Από την άλλη, υπάρχει ξεκάθαρη σύγκρουση μεταξύ της πολυπλοκότητας επίλυσης και υπολογιστικής ευστάθειας των μοντέλων μεγάλης κλίμακας και της λειτουργίας αυτών των μοντέλων με ένα πλήρως στοχαστικό τρόπο. Η προτεινόμενη ανάλυση προτείνει την χρησιμοποίηση του PROMHΘEA σε ένα στοχαστικό πλαίσιο δυο σταδίων, κατά το οποίο αποφασίζεται μια βέλτιστη πολιτική hedging μέχρι το 2030 θεωρώντας ότι η αβεβαιότητα για το μέγεθος της κλιματικής πολιτικής επιλύεται το 2030. Εξαιτίας της μεγάλης υπολογιστικής πολυπλοκότητας του στοχαστικού προβλήματος δυο σταδίων, οι πιθανές καταστάσεις της κλιματικής πολιτικής μετά το 2030 είναι δυο:

- (1) **Σενάριο αναφοράς:** στο οποίο οι παγκόσμιες αθροιστικές εκπομπές την περίοδο 2000-2050 έχουν μέσο όρο 1900 Gtn CO₂
- (2) **Σενάριο 450 ppm:** στο οποίο με βάση τις μελέτες [7, 10,60], επιβάλλεται ο στόχος περιορισμού των αθροιστικών παγκόσμιων εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα στα επίπεδα των 1300 Gtn την περίοδο 2000-2050.

Η πιο σημαντική μεταβολή που εισήχθη στο μοντέλο αφορά την ενσωμάτωση ενός μηχανισμού ενδογενοποίησης της παγκόσμιας τιμής άνθρακα έτσι ώστε να επιτυγχάνεται ακριβώς ο στόχος στις αθροιστικές εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα την περίοδο 2000-2050, αλλά και με την εισαγωγή ενδιάμεσων στόχων. Αυτό απαιτεί μεταβολές στον κώδικα του PROMHΘEA με την εισαγωγή διαδικασίας με βάση την αριθμητική μέθοδο *regula falsi*, η οποία συγκλίνει πάντοτε και με ταχύτερο ρυθμό σε σύγκριση με άλλες αριθμητικές μεθόδους επίλυσης συστημάτων εξισώσεων και κάνει χρήση ουσιαστικά της έννοιας της ελαστικότητας. Ο αλγόριθμος απαιτεί συνάρτηση $f(x)$ και 2 σημεία α, β για τα οποία $f(\alpha) > 0$ και $f(\beta) < 0$, δηλαδή $f(\alpha)f(\beta) < 0$. Αν η συνάρτηση $f(x)$ είναι συνεχής στο διάστημα $[\alpha, \beta]$ με $f(\alpha)f(\beta) < 0$, τότε ο αλγόριθμος θα συγκλίνει τελικά σε μια μοναδική λύση χρησιμοποιώντας την ελαστικότητα μεταξύ μιας μεταβολής της τιμής του α και του β και των αντίστοιχων $f(\alpha)$ και $f(\beta)$. Συνεπώς, με αυτόν τον μηχανισμό το μοντέλο μπορεί να παρέχει την δεσμευμένη ή κατά συνθήκη πιθανότητα για ενδογενείς μεταβλητές δεδομένης της επίτευξης συγκεκριμένων κλιματικών στόχων, π.χ. ποια η πιθανότητα η διεθνής τιμή του πετρελαίου να είναι υψηλότερη από 100\$/βαρέλι το 2050 δεδομένης της επίτευξης του κλιματικού στόχου των 450 ppm; Πως μεταβάλλεται αυτή η πιθανότητα από το σενάριο αναφοράς στο σενάριο 450 ppm; Από την στιγμή που δεν υπάρχει καμία αξιόπιστη πληροφορία για την πιθανότητα των μελλοντικών κλιματικών πολιτικών, χρησιμοποιώ ίσες πιθανότητες 50% για τα δυο εναλλακτικά ενδεχόμενα το 2030. Το μοντέλο υπολογίζει την στρατηγική αντιστάθμισης με βάση την ελαχιστοποίηση του κόστους των 2 περιόδων, πριν και μετά την αποκάλυψη της κλιματικής πολιτικής 2010-2030 (κόστος αντιστάθμισης-hedging) και 2030-2050 (κόστος recourse). Το μέτρο κόστους που χρησιμοποιείται είναι το συνολικό κόστος του παγκόσμιου ενεργειακού συστήματος

(με προεξοφλητικό επιτόκιο 4% που αντικατοπτρίζει την διαχρονική προτίμηση της κοινωνίας). Γενικά, η μαθηματική διατύπωση [216] της στοχαστικής βελτιστοποίησης δυο σταδίων είναι:

$$\text{Minimize } Z = \sum_w C_{t,w} * X_{t,w} * p_{t,w} \quad (6)$$

$$\text{Subject to: } A_{t,w} * X_{t,w} \geq b_{t,w} \quad \text{for } t \in T \text{ and } w \in W \quad (7)$$

$$e_{t,w} * X_{t,w} \leq k_w \quad (8)$$

Όπου t είναι η χρονική περίοδος, T το σύνολο των περιόδων, t^* το έτος 2030 όπου αποκαλύπτεται η αβεβαιότητα και w είναι οι πιθανές καταστάσεις των πολιτικών (σύνολο W), Για κάθε περίοδο t πριν το χρονικό σημείο t^* το $W(t)$ έχει ένα μοναδικό στοιχείο, ενώ για $t > t^*$ το $W(t)$ έχει πολλαπλά στοιχεία (συγκεκριμένα στο παράδειγμα 2). Η μεταβλητή $X_{t,w}$ αντιπροσωπεύει το διάνυσμα στηλών των μεταβλητών απόφασης την περίοδο t για το σενάριο w , ενώ το $C_{t,w}$ είναι το διάνυσμα κόστους την περίοδο t για το σενάριο w και $p_{t,w}$ είναι η πιθανότητα πραγματοποίησης ενός σεναρίου (ίση με 50% για καθένα από τα 2 σενάρια στο παράδειγμά μας). Ισχύει ότι:

$$\sum_w p_{t,w} = 1 \quad (9)$$

Τέλος, $A_{t,w}$ είναι ο πίνακας τεχνικών και οικονομικών περιορισμών-εξισώσεων του ΠΡΟΜΗΘΕΑ, ενώ ο τελευταίος περιορισμός αντιπροσωπεύει τον περιορισμό στις αθροιστικές παγκόσμιες εκπομπές άνθρακα. Οι επενδύσεις που πραγματοποιούνται στην στρατηγική αντιστάθμισης δείχνουν τις αποφάσεις που λαμβάνονται υπό αβεβαιότητα, ενώ οι αποφάσεις που καθυστερούν για την περίοδο μετά το 2030 δείχνουν εκείνες που είναι βέλτιστο να περιμένουν μέχρι την επίλυση της αβεβαιότητας -στρατηγική *wait and see* [217]. Η πιο ενδιαφέρουσα και ρεαλιστική ανάλυση συμβαίνει όταν ο στόχος k_w στις αθροιστικές εκπομπές άνθρακα είναι αβέβαιος και θα γίνει γνωστός το έτος t^* (2030). Πριν το 2030 όλες οι αποφάσεις λαμβάνονται υπό αβεβαιότητα, ενώ μετά το 2030 οι αποφάσεις λαμβάνονται με τέλεια γνώση για τον στόχο στις εκπομπές άνθρακα. Έτσι, θα ήταν βολικό να αποσυνθέσω το διάνυσμα $X_{t,w}$ των αποφάσεων σε X_1 (2010-2030) και X_2 (2030-2050). Στην ανάλυση, η παράμετρος k_w μπορεί να πάρει μόλις δυο διακριτές τιμές που αντιστοιχούν σε 2 εναλλακτικούς κλιματικούς στόχους, δηλαδή σενάριο αναφοράς και σενάριο 450 ppm. Κατά την διάρκεια των προσομοιώσεων, έγινε σαφές ότι ο στόχος των 1300 Gtn για την περίοδο 2000-2050 ήταν ιδιαίτερα περιοριστικός και σε περιπτώσεις με περιορισμένη κλιματική δράση μέχρι το 2030 το μοντέλο ήταν αδύνατο να τον ικανοποιήσει ή οδηγούνταν σε πολύ υψηλή τιμή άνθρακα και άρα υψηλό κόστος. Συνεπώς, ο στόχος στο σενάριο 450 ppm χαλάρωσε λίγο από τους 1300 Gtn στους 1400 Gtn για την περίοδο 2000-2050 (σε παγκόσμιο επίπεδο).

Η παρούσα ανάλυση επεκτείνει παρόμοιες αναλύσεις με ενεργειακά μοντέλα μεγάλης κλίμακας [77, 81, 212], αλλά το μοντέλο δεν μπορεί να βελτιστοποιήσει την

αντικειμενική του συνάρτηση (δηλαδή ελαχιστοποίηση του κόστους του παγκόσμιου ενεργειακού συστήματος) και συνεπώς η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε είναι η εξής:

- (1) Ακολουθήθηκε το παραπάνω συνολικό πλαίσιο με 2 χρονικές περιόδους
- (2) Εκτελέστηκαν δύο εναλλακτικά σενάρια με πλήρη πληροφόρηση (βέλτιστα), δηλαδή ένα σενάριο αναφοράς και ένα σενάριο 450 ppm
- (3) Εκτελέστηκαν πέντε εναλλακτικά σενάρια με διαφοροποιημένες διακριτές κλιματικές πολιτικές για την περίοδο 2010-2030 και 2030-2050
- (4) Ποσοτικοποιήθηκε το κόστος του παγκόσμιου ενεργειακού συστήματος στο σύνολο των εξεταζόμενων σεναρίων (περίοδος 2010-2050)

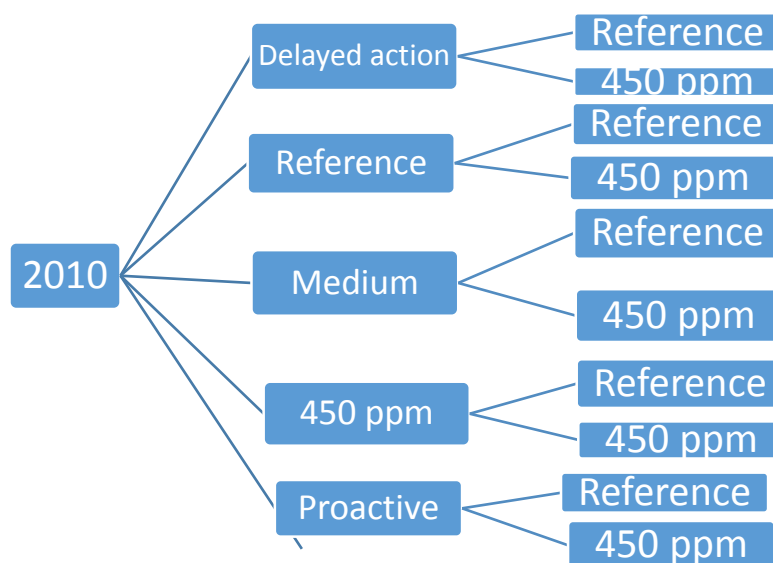
Το κόστος του κάθε σεναρίου υπολογίζεται με τρέξιμο του PROMHΘEA και λαμβάνει υπόψη όλα τα στοιχεία κόστους, όπως επενδύσεις στην ηλεκτροπαραγωγή και στις υποδομές, σταθερά και μεταβλητά κόστη λειτουργίας των ενεργειακών τεχνολογιών, τιμές ενέργειας για τους τελικούς καταναλωτές κ.α.). Ένα χρήσιμο μέτρο κόστους αποτελεί και η μέση τιμή της τέλει πληροφόρησης EVPI, η οποία υπολογίζεται ως εξής:

$$EVPI = COST_h - \sum_{i=1}^k p_i * COST_{pfi} \quad (10)$$

Όπου $COST_h$ είναι το κόστος που υπολογίζεται από την στοχαστική διαδικασία (Γράφημα 6-11), p_i η πιθανότητα που δίνεται σε κάθε ενδεχόμενο (σύνολο k) και $COST_{pfi}$ το κόστος του αντίστοιχου σεναρίου με τέλεια πληροφόρηση. Ο δείκτης παρουσιάζει την διαφορά στο κόστος μεταξύ των σεναρίων στα οποία δεν υπάρχει αβεβαιότητα και οι αποφάσεις λαμβάνονται με τέλεια πληροφόρηση σε σύγκριση με τα σενάρια στα οποία υπάρχει αβεβαιότητα για τον κλιματικό στόχο που θα αποφασιστεί το 2030. Για να υπολογίσω τον δείκτη πρώτα τρέχω τα σενάρια με τέλεια πληροφόρηση όπου το μοντέλο βελτιστοποιεί το κόστος γνωρίζοντας με 100% βεβαιότητα τις μελλοντικές κλιματικές πολιτικές ppm. Η τιμή του EVPI πρέπει να είναι μη αρνητική καθώς ο σταθμισμένος μέσος του αναμενόμενου κόστους με πλήρη πληροφόρηση είναι μικρότερος από το κόστος της στοχαστικής διαδικασίας στην οποία η αβεβαιότητα για τις πολιτικές επιλύεται το 2030. Αρχικά εκτελώ τα δυο σενάρια με τέλεια πληροφόρηση για μελλοντικές κλιματικές πολιτικές, δηλαδή ένα σενάριο αναφοράς και ένα σενάριο περιορισμού της κλιματικής αλλαγής (και τα δυο πετυχαίνουν τους ντετερμινιστικούς στόχους στις παγκόσμιες αθροιστικές εκπομπές άνθρακα των 1900 Gtp και 1400 Gtp αντίστοιχα). Ο παρακάτω πίνακας παρουσιάζει την βέλτιστη κατανομή των παγκόσμιων εκπομπών στις 2 χρονικές περιόδους που εξετάζονται.

	Reference scenario	450 scenario	%difference from Reference
2000-2030	1050	960	-8.6%
2030-2050	850	440	-48.2%
2000-2050	1900	1400	-26.3%

Πίνακας 6-10: Κατανομή των παγκόσμιων αθροιστικών εκπομπών ανά χρονική περίοδο στα σενάρια τέλει πληροφόρησης (σε Gtp εκπομπών CO₂)



Γράφημα 6-11: Σχηματικό διάγραμμα της διαδικασίας σχεδίασης σεναρίων που ακολουθήθηκε

Για να εξετάσω το κόστος της αβεβαιότητας για τις μελλοντικές κλιματικές πολιτικές χρειάζεται να κατασκευάσω έναν αριθμό διακριτών σεναρίων που αντιπροσωπεύουν εναλλακτικές υποθέσεις για την ένταση των κλιματικών πολιτικών πριν το 2030 και συνεπώς διαφοροποιημένες ανάγκες για προσπάθεια μείωσης εκπομπών CO₂ μετά το 2030. Συνοπτικά, επελέγησαν πέντε σενάρια για την περίοδο πριν το 2030 με κριτήριο την διαφοροποίηση κατανομής των παγκόσμιων εκπομπών, ως εξής (Πίνακας 6-11):

- i. Το σενάριο καθυστέρησης στις πολιτικές, με εκπομπές 1100 Gtn μέχρι το 2030
- ii. Το σενάριο αναφοράς, με εκπομπές 1050 Gtn μέχρι το 2030
- iii. Το μεσαίο σενάριο, με εκπομπές 1000 Gtn την περίοδο 2000-2050
- iv. Το βέλτιστο σενάριο 450, με εκπομπές 960 Gtn την περίοδο 2000-2050
- v. Το προνοητικό/προληπτικό σενάριο, με εκπομπές 850 Gtn την περίοδο 2000-2050

	Climate Policies		Cumulative CO ₂ emissions (in Gtn)		
	2000-2030	2030-2050	2000-2030	2030-2050	2000-2050
1	Reference scenario	Reference	1050	850	1900
		450 ppm		1400	1400
2	450 ppm scenario	Reference	960	940	1900
		450 ppm		440	1400
3	Delayed action	Reference	1100	800	1900
		450 ppm		300	1400
4	Medium scenario	Reference	1000	900	1900
		450 ppm		400	1400
5	Proactive scenario	Reference	850	1050	1900
		450 ppm		1400	1400

Πίνακας 6-11: Κατανομή των παγκόσμιων αθροιστικών εκπομπών ανά χρονική περίοδο στα σενάρια ατελούς πληροφόρησης (σε Gtn) με βάση τις εναλλακτικές υποθέσεις

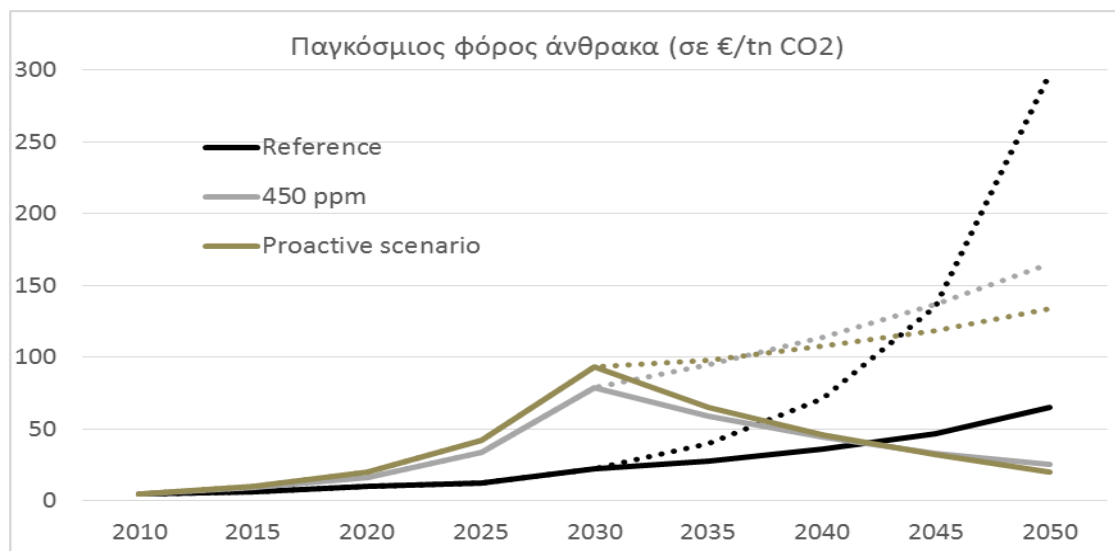
Για κάθε σενάριο κλιματικής πολιτικής την περίοδο 2000-2030, υπάρχουν 2 εναλλακτικές πολιτικές μετά το 2030 όταν ο παγκόσμιος στόχος γίνει γνωστός. Όπως είναι λογικό, τα σενάρια με υψηλές παγκόσμιες εκπομπές άνθρακα την περίοδο μέχρι το 2030 θα απαιτούν ιδιαίτερα χαμηλές εκπομπές την περίοδο μετά το 2030. Από πρακτική άποψη, το μοντέλο PROMHΘΕΑΣ έτρεξε για 5 εναλλακτικά σενάρια με διαφοροποιημένες κλιματικές πολιτικές την περίοδο πριν το 2030. Από το κάθε σενάριο προκύπτουν δυο τελικές περιπτώσεις που εξαρτώνται από την τιμή που θα λάβει ο περιορισμός στις παγκόσμιες αθροιστικές εκπομπές. Σε κάθε πείραμα, το μοντέλο ικανοποιεί δυο στόχους για τις παγκόσμιες εκπομπές (περίοδοι 2000-2030 και 2030-2050) με μοναδικό εργαλείο τον παγκόσμιο φόρο στο διοξείδιο του άνθρακα, ο οποίος λαμβάνει τις κατάλληλες τιμές ώστε να επιτυγχάνονται οι ντετερμινιστικοί στόχοι εκπομπών του Πίνακα 6-11. Άρα ο παγκόσμιος φόρος άνθρακα εξαρτάται από την κατανομή των εκπομπών την περίοδο πριν και μετά το 2030 και η μέση του τιμή (η οποία προκύπτει από τα 2048 πειράματα) λαμβάνει τις τιμές του Πίνακα 6-12. Γενικά, η παγκόσμια τιμή του άνθρακα το 2050 είναι υψηλότερη στα σενάρια με πολιτική 450 ppm από τα αντίστοιχα με πολιτική αναφοράς. Κατά την πρώτη περίοδο, το proactive σενάριο οδηγεί στην υψηλότερη κατά μέσο όρο τιμή άνθρακα (93 €/tn CO₂ το 2030), εξαιτίας της μεγαλύτερης φιλοδοξίας για μείωση των παγκόσμιων εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα; Από την άλλη πλευρά, το σενάριο καθυστέρησης έχει την μικρότερη τιμή άνθρακα εξαιτίας της χαμηλής του κλιματικής φιλοδοξίας.

	Climate Policies		Global carbon price	
	2000-2030	2030-2050	2030	2050
1	Reference scenario	Reference	22	65
		450 ppm		297
2	450 ppm scenario	Reference	79	25
		450 ppm		165
3	Delayed action	Reference	12	98
		450 ppm		512
4	Medium scenario	Reference	36	45
		450 ppm		152
5	Proactive scenario	Reference	93	20
		450 ppm		134

Πίνακας 6-12: Μέσος Παγκόσμιος φόρος άνθρακα στα 10 εναλλακτικά σενάρια/ενδεχόμενα όπως προέκυψε από την ανάλυση με το μοντέλο PROMHΘΕΑΣ (σε €/tn CO₂)

Η κατάσταση μεταβάλλεται μετά το 2030 δηλαδή την περίοδο κατά την οποία η αβεβαιότητα για τις κλιματικές πολιτικές έχει επιλυθεί. Σε γενικές γραμμές, τα σενάρια με χαμηλού μεγέθους κλιματικές πολιτικές την περίοδο πριν το 2030 (σενάριο αναφοράς και καθυστέρησης) οδηγούν σε ιδιαίτερα υψηλές τιμές διοξειδίου άνθρακα μετά το 2030, ιδιαίτερα στις περιπτώσεις στις οποίες η κλιματική πολιτική μετά το 2030 είναι ο περιορισμός της κλιματικής αλλαγής στα 450 ppm. Αυτό είναι ιδιαίτερα εμφανές στο Γράφημα 6-12, όπου διακρίνονται οι διαφορετικές κλιματικές πολιτικές

πριν το 2030 στα σενάρια αναφοράς και 450 ppm. Μετά το 2030, όπου η αβεβαιότητα για τον στόχο στις παγκόσμιες αθροιστικές εκπομπές CO₂ επιλύεται, η παγκόσμια τιμή άνθρακα αυξάνεται αλματωδώς στο σενάριο αναφοράς; Το 2050 ο φόρος άνθρακα έχει τουλάχιστον διπλάσια τιμή σε σύγκριση με τα σενάρια με τα «προνοητικά» σενάρια. Στα τελευταία, παρατηρώ ότι αν η κλιματική πολιτική που αποκαλυφθεί το 2030 είναι η πολιτική αναφοράς τότε η παγκόσμια τιμή άνθρακα μειώνεται μετά το 2030 σε ιδιαίτερα χαμηλά επίπεδα. Από την άλλη πλευρά, αν η πολιτική την περίοδο μετά το 2030 είναι η απ-ανθρακοποίηση, τότε ο παγκόσμιος φόρος άνθρακα πλησιάζει στα επίπεδα των 135-165 €/tn CO₂ το οποίο είναι σε συμφωνία με τα αποτελέσματα της ενότητα 7.6. Αντίθετα, αν οι πολιτικές πριν το 2030 είναι χαμηλής φιλοδοξίας, τότε για να ικανοποιηθεί ο περιορισμός στις αθροιστικές εκπομπές χρειάζονται ιδιαίτερα υψηλές τιμές άνθρακα (297 €/tn CO₂ για το σενάριο αναφοράς και 512 €/tn CO₂ για το σενάριο καθυστέρησης).



Γράφημα 6-12: Εξέλιξη της παγκόσμιας τιμής άνθρακα στα σενάρια

Το μέτρο κόστους που χρησιμοποιώ στην παρούσα ανάλυση είναι το συνολικό κόστος του παγκόσμιου ενεργειακού συστήματος εκφρασμένο σαν ποσοστό του παγκόσμιου ΑΕΠ. Το 2010 το κόστος αυτό ισούται με 8.1% του παγκόσμιου ΑΕΠ με το ποσοστό αυτό γενικά να είναι υψηλότερο στις αναπτυγμένες οικονομίες του ΟΟΣΑ, καθώς εισάγουν το μεγάλο μέρος της ενέργειας που χρειάζονται, οι τιμές καυσίμων είναι σχετικά υψηλές (εξαιτίας της υψηλής φορολογίας-ειδικά στις μεταφορές) και πραγματοποιούν επενδύσεις υψηλής έντασης κεφαλαίου, π.χ. υποδομές φυσικού αερίου, εργοστάσια ΑΠΕ και πυρηνικής ενέργειας. Την περίοδο 2010-2030 το κόστος του ενεργειακού συστήματος αυξάνεται σαν ποσοστό του ΑΕΠ ανεξάρτητα από τις κλιματικές πολιτικές που εφαρμόζονται στα εναλλακτικά σενάρια. Οι κύριες αιτίες είναι η σημαντική αύξηση των διεθνών τιμών του πετρελαίου, του φυσικού αερίου και του άνθρακα την περίοδο 2010-2030 σε συνδυασμό με τις επενδύσεις για την ανανέωση των υποδομών και των εργοστασίων ηλεκτροπαραγωγής που πλησιάζουν στο τέλος της διάρκειας ζωής τους (κυρίως στις οικονομίες του ΟΟΣΑ) και για τις εκτεταμένες σε

μέγεθος επενδύσεις στις αναπτυσσόμενες χώρες για την παροχή ενέργειας και ηλεκτρισμού στα νοικοκυριά και στις επιχειρήσεις. Συνεπώς, το ενεργειακό κόστος αυξάνεται μέχρι το 2030 σε σύγκριση με τα επίπεδα του 2010 σε όλα τα σενάρια που αναλύθηκαν; Η αύξηση είναι μεγαλύτερη στα σενάρια με φιλόδοξες κλιματικές πολιτικές, π.χ. στο προνοητικό σενάριο το κόστος αυξήθηκε σε 10.7% του παγκόσμιου ΑΕΠ το 2030 εξαιτίας της εισαγωγής υψηλού φόρου άνθρακα που οδηγεί σε αύξηση των τελικών τιμών των υδρογονανθράκων σε όλους τους ενεργειακούς τομείς και της διεύθυνσης καθαρών ενεργειακών τεχνολογιών οι οποίες έχουν υψηλότερο κόστος από τις αντίστοιχες συμβατικές επιλογές με ορυκτά καύσιμα. Από την άλλη πλευρά, παρατηρώ (Πίνακας 6-13) ότι το κόστος της περιόδου 2030-2050 εξαρτάται από δυο βασικούς παράγοντες:

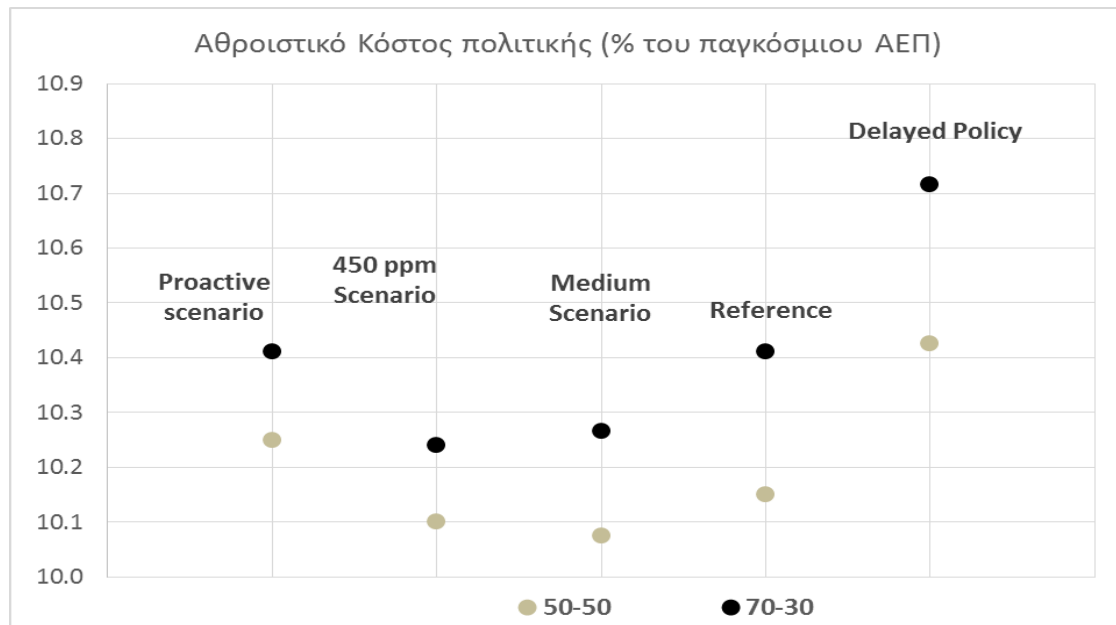
- Από την φιλοδοξία της κλιματικής πολιτικής που αποκαλύπτεται μετά το 2030, με την πολιτική περιορισμού της κλιματικής αλλαγής να οδηγεί σε υψηλότερα κόστη για το παγκόσμιο ενεργειακό σύστημα σε σύγκριση με την πολιτική αναφοράς
- Από την πολιτική που ακολουθήθηκε πριν το 2030, καθώς αν αυτή η πολιτική είναι συμβατή με τον στόχο στις παγκόσμιες εκπομπές που αποκαλύπτεται μετά το 2030, τότε το κόστος είναι χαμηλότερο από την αντίθετη περίπτωση. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί το σενάριο καθυστέρησης στο οποίο αν η πολιτική είναι 450 ppm τότε το κόστος για την περίοδο 2030-2050 αυξάνεται περισσότερο από 25% σε σχέση με τα σενάρια που υιοθετούν φιλόδοξες πολιτικές πριν το 2030.

	Climate Policies		Cost as % GDP		Total cost
	2000-2030	2030-2050	2010-2030	2030-2050	2010-2050
1	Reference	Reference	9.3	9.7	9.5
		450 ppm		12.3	10.8
2	450 ppm	Reference	10.3	9.2	9.8
		450 ppm		10.6	10.5
3	Delayed action	Reference	8.9	10.5	9.7
		450 ppm		13.4	11.2
4	Medium scenario	Reference	10.1	9.1	9.6
		450 ppm		11.0	10.6
5	Proactive scenario	Reference	10.7	9.0	9.9
		450 ppm		10.6	10.7

Πίνακας 6-13: Κόστος του παγκόσμιου ενεργειακού συστήματος (σαν % του παγκόσμιου ΑΕΠ) με βάση τα αποτελέσματα του μοντέλου για τα εναλλακτικά σενάρια που μελετήθηκαν

Από την στιγμή που έχει υπολογιστεί το συνολικό κόστος κάθε ενδεχομένου για την περίοδο 2010-2050, τότε μπορώ να υπολογίσω το κόστος κάθε σεναρίου δράσης πριν το 2030 υποθέτοντας αρχικά ίσες πιθανότητες πραγματοποίησης των 2 διακριτών ενδεχομένων μετά το 2030. Το Γράφημα 6-13 παρουσιάζει το συνολικό κόστος των πέντε εναλλακτικών σεναρίων κλιματικής δράσης πριν το 2030 όταν οι πιθανότητες

μεταξύ των στόχων (αναφοράς και 450 ppm) είναι 50%-50% και όταν ο περιορισμός της κλιματικής αλλαγής έχει πιθανότητα πραγματοποίησης 70%.



Γράφημα 6-13: Αθροιστικό κόστος των 5 εναλλακτικών σεναρίων (σε % του παγκόσμιου ΑΕΠ) με βάση τα αποτελέσματα του μοντέλου για την περίοδο 2010-2050

Το delayed action σενάριο χαρακτηρίζεται από τα μεγαλύτερα κόστη (σαν % του ΑΕΠ) ανεξάρτητα από τις υποκειμενικές πιθανότητες που αναθέτω στα δυο ενδεχόμενα μετά το 2030. Αυτό συμβαίνει εξαιτίας της ιδιαίτερα μεγάλης προσπάθειας για περιορισμό των παγκόσμιων εκπομπών άνθρακα την περίοδο μετά το 2030 που χρειάζεται να καταβληθεί όταν η πολιτική που αποκαλύπτεται είναι το 450 ppm. Αυτή οδηγεί σε ριζικό μετασχηματισμό του παγκόσμιου ενεργειακού συστήματος σε μικρό χρονικό διάστημα με ραγδαία ανάπτυξη τεχνολογιών χαμηλού άνθρακα σε όλους τους τομείς του παγκόσμιου ενεργειακού συστήματος (π.χ. τεχνολογίες ΑΠΕ και CCS για ηλεκτροπαραγωγή, ηλεκτρικά αυτοκίνητα, τεχνολογίες υψηλής ενεργειακής απόδοσης και σημαντικές επενδύσεις για ενεργειακή αναβάθμιση κατοικιών με θερμική μόνωση). Αν ακολουθηθούν οι κλιματικές πολιτικές αναφοράς, τότε το κόστος (σταθμισμένο με πιθανότητες) είναι χαμηλότερο κατά 0.3% του παγκόσμιου ΑΕΠ σε σχέση με το σενάριο καθυστέρησης. Από την άλλη, το proactive σενάριο επίσης αντιμετωπίζει υψηλά κόστη καθώς οδηγεί σε υψηλό φόρο άνθρακα την περίοδο πριν το 2030 και συνεπώς αυξάνει το κόστος του ενεργειακού συστήματος σε μια περίοδο που αρκετές τεχνολογίες χαμηλού ή μηδενικού άνθρακα έχουν ακόμα σχετικά υψηλό κόστος και δεν έχουν φτάσει σε τεχνική και οικονομική ωριμότητα. Το proactive σενάριο έχει ιδιαίτερα υψηλά κόστη στις περιπτώσεις στις οποίες μετά το 2030 δεν ακολουθείται η πολιτική μετριασμού της κλιματικής αλλαγής σε παγκόσμιο επίπεδο.

Όπως είναι φανερό από το Γράφημα 6-13, οι βραχυπρόθεσμες στρατηγικές που έχουν το χαμηλότερο συνολικό κόστος είναι οι «450 ppm» και «Medium». Συγκεκριμένα

όταν τα 2 εναλλακτικά ενδεχόμενα έχουν ίσες πιθανότητες πραγματοποίησης, το συνολικό κόστος των βραχυπρόθεσμων στρατηγικών «450 ppm» και «Medium» είναι 10.1% σαν ποσοστό του παγκόσμιου ΑΕΠ (αθροιστικά την περίοδο 2010-2050) δηλαδή 0.2-0.3% χαμηλότερο σε σύγκριση με τα υπόλοιπα σενάρια. Επιπλέον, είναι φανερό ότι όταν η πιθανότητα να αποκαλυφθεί το 2030 η πολιτική μετριασμού της κλιματικής αλλαγής αυξάνεται σε 70%, οι βραχυπρόθεσμες στρατηγικές που είναι πιο φιλόδοξες επωφελοούνται σχετικά με τις στρατηγικές καθυστέρησης και συνεπώς η βέλτιστη βραχυπρόθεσμη στρατηγική είναι η «450 ppm».

Η αναμενόμενη αξία της τέλει πληροφόρησης (δείκτης EVPI) υπολογίζεται με βάση την εξίσωση (10) σαν διαφορά του μέσου συνολικού κόστους των εναλλακτικών στρατηγικών από το κόστος των βέλτιστων σεναρίων 450 ppm και Reference για την περίοδο 2010-2050 (σταθμισμένο με βάση τις πιθανότητες πραγματοποίησης τους). Το συνολικό κόστος του ενεργειακού συστήματος υπό την παρουσία αβεβαιότητας για τις κλιματικές πολιτικές υπολογίζεται με βάση τα κόστη των στρατηγικών του Πίνακα 6-13 σε 10.2% του παγκόσμιου ΑΕΠ (για ισοπίθανα ενδεχόμενα). Από την άλλη, αν ξέρω εκ των προτέρων τις πολιτικές μετά το 2030 σχεδιάζω την βέλτιστη βραχυπρόθεσμη στρατηγική (δηλαδή αν ξέρω ότι το 2030 θα αποκαλυφθεί η πολιτική μετριασμού της κλιματικής αλλαγής τότε ακολουθώ την στρατηγική 450 ppm την περίοδο 2010-2050). Συνεπώς το κόστος αν δεν υπάρχει αβεβαιότητα υπολογίζεται:

$$COST_d = \sum_{i=1}^k p_i * COST_{pfi} = 50\% * 9.5 + 50\% * 10.5 = 9.98 \text{ και άρα}$$

$EVPI = COST_h - COST_d = 0.225\%$ του παγκόσμιου ΑΕΠ, δηλαδή περίπου 4.5 τρις € '10 (χρησιμοποιώντας προεξοφλητικό επιτόκιο 4%). Η μελέτη [216] κατέδειξε την ιδιαίτερα μεγάλη σημασία των υποθέσεων σχετικά με την διαθεσιμότητα καθαρών ενεργειακών τεχνολογιών για την ποσοτικοποίηση του EVPI, καθώς ο δείκτης λαμβάνει χαμηλότερες τιμές στις περιπτώσεις όπου υπάρχουν πολλές διαθέσιμες τεχνολογίες μείωσης των εκπομπών καθώς το σύστημα έχει μεγαλύτερη ικανότητα να αντιδράσει σε μεταβολές της κλιματικής πολιτικής, Από την άλλη πλευρά, αν η πιθανότητα για πολιτική 450 ppm αυξηθεί σε 70% μετά το 2030, τότε ο EVPI είναι ακόμα υψηλότερος και προσεγγίζει την τιμή των 4.8 τρις € '10 αθροιστικά την περίοδο 2010-2050.

Η αναμενόμενη αξία της τέλει πληροφόρησης (EVPI) είναι χρήσιμος δείκτης καθώς επιτρέπει την σύγκριση βέλτιστων σεναρίων με τα αντίστοιχα υπό αβεβαιότητα. Τα αποτελέσματα του PROMHΘEA δείχνουν ότι το επιπλέον κόστος της αβεβαιότητας για τις κλιματικές πολιτικές μετά το 2030 είναι ιδιαίτερα σημαντικό, αλλά μπορεί να μειωθεί με επενδύσεις σε ένα εύρος τεχνολογιών χαμηλού άνθρακα. Ο λόγος για το υψηλό κόστος της αβεβαιότητας είναι η σημαντική απόκλιση μεταξύ βραχυπρόθεσμων στρατηγικών στο βέλτιστο σενάριο σε σύγκριση με τη στρατηγική αντιστάθμισης κινδύνου υπό αβεβαιότητα. Οι επενδύσεις στις καθарές τεχνολογίες σε υψηλότερα επίπεδα από το σενάριο αναφοράς είναι σημαντικές για την αντιστάθμιση των μελλοντικών κινδύνων και την μείωση του κόστους αβεβαιότητας. Αντίθετα αν οι πολιτικές δεν είναι φιλόδοξες μέχρι το 2030, τότε υπάρχει ο κίνδυνος για ανάγκη ριζικού μετασχηματισμού του παγκόσμιου ενεργειακού συστήματος σε πολύ σύντομο

χρονικό διάστημα και άρα με μεγάλο κόστος. Η ανάλυση αποδεικνύει ότι η βέλτιστη στρατηγική βραχυπρόθεσμα βρίσκεται κοντά στην βέλτιστη πολιτική 450 ppm ιδιαίτερα αν θεωρώ ότι οι πιθανότητες για υιοθέτηση πολιτικών περιορισμού της κλιματικής αλλαγής μετά το 2030 είναι υψηλότερες από 50%.

Χρειάζεται να είμαστε προσεκτικοί ως προς τα αποτελέσματα της παρούσας ανάλυσης, η οποία προφανώς εξαρτάται από την δομή και την παραμετροποίηση του μοντέλου και από τις υποκειμενικές πιθανότητες που δίνονται για τις πιθανές πολιτικές μετά το 2030. Η ανάλυση δεν επιδιώκει να παρουσιάσει την βελτιστοποίηση πολιτικής καθώς αυτό έχει ιδιαίτερα μεγάλη υπολογιστική πολυπλοκότητα για το συγκεκριμένο μοντελικό πλαίσιο, αλλά επιδιώκει την ανάλυση διακριτών πιθανών κλιματικών στρατηγικών με την παρουσία αβεβαιότητας για τις μελλοντικές κλιματικές πολιτικές σε παγκόσμιο επίπεδο. Εξαιτίας της μορφής επίλυσης του προβλήματος, συμπεραίνω ότι η βέλτιστη στρατηγική (με δεδομένες τις πιθανότητες) για αντιστάθμιση κινδύνων βρίσκεται ανάμεσα στις κλιματικές πολιτικές «Medium» και «450 ppm». Προφανώς η ενσωμάτωση άλλων πολιτικών μετά το 2030 (περισσότερο ή λιγότερο φιλόδοξες από 450 ppm) ή η μεταβολή των υποκειμενικών πιθανοτήτων για τις «καταστάσεις του κόσμου» μετά το 2030 οδηγεί σε διαφοροποιημένες στρατηγικές αντιστάθμισης των κινδύνων. Στην ανάλυση, αρχικά χρησιμοποιήσα ίσες πιθανότητες για τα διαφορετικά ενδεχόμενα -γνωστό και ως κριτήριο Laplace [218]- το ισοδύναμο διακριτής ανάλυσης μιας συνεχούς ομοιόμορφης κατανομής. Επιπλέον, ποσοτικοποιήθηκε το κόστος όταν η πιθανότητα φιλόδοξων πολιτικών μετριασμού της κλιματικής αλλαγής είναι 70. Με βάση την ανάλυση με τον PROMHΘEA, το σενάριο «Medium», το οποίο αποδείχθηκε ότι παρέχει καλύτερη στρατηγική αντιστάθμισης κινδύνων από το σενάριο αναφοράς, οδηγεί σε αύξηση των επενδύσεων στην ηλεκτροπαραγωγή κατά 25% (αθροιστικά την περίοδο 2010-2035), κυρίως σε Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας και τεχνολογίες CCS.

Η υπόθεση ουδετερότητας απέναντι στον κίνδυνο δεν αντιπροσωπεύει επαρκώς την αβεβαιότητα καθώς ο κίνδυνος μεγάλου κόστους έχει μεγάλη σημασία. Χρησιμοποιώντας μια συνάρτηση αποστροφής κινδύνου, οι βέλτιστες βραχυπρόθεσμες στρατηγικές ενδέχεται να είναι διαφορετικές κυρίως με την αύξηση των επενδύσεων σε ενεργειακή αποδοτικότητα και σε τεχνολογίες χαμηλού άνθρακα. Ο μικρός αριθμός καταστάσεων μετά το 2030 περιορίζει την εξερεύνηση αλληλεπιδράσεων μεταξύ των αβεβαιοτήτων για τεχνολογίες. Η ανάλυση παρουσιάζει μια αρχική ταξινόμηση για εναλλακτικές στρατηγικές οι οποίες επιλέχθηκαν έτσι ώστε να έχουν συνάφεια με το τωρινό τοπίο κλιματικής πολιτικής. Η ανάλυση απέδειξε ότι η αβεβαιότητα για τις κλιματικές πολιτικές οδηγεί σε διαφορετικές βραχυπρόθεσμες στρατηγικές σε σχέση με τα σενάρια τέλει πληροφόρησης. Συνεπώς είναι σημαντικό οι στρατηγικές για το ενεργειακό σύστημα να λαμβάνουν υπόψη τις αβεβαιότητες για τις μακροχρόνιες κλιματικές πολιτικές καθώς το επιπλέον κόστος ενδέχεται να είναι αρκετά υψηλό. Επιπλέον οι επιπτώσεις εναλλακτικών στρατηγικών και επενδύσεων πρέπει να κατανοηθούν σε ένα ευρύτερο συστημικό πλαίσιο.

Κεφάλαιο 7

7. Αποτελέσματα στοχαστικής ανάλυσης

7.1 Σκοπός της ανάλυσης

Στις περισσότερες περιπτώσεις, όπως αναλύθηκε σε προηγούμενα κεφάλαια, οι αναλύσεις για την εξέλιξη του παγκόσμιου συστήματος ενέργεια-οικονομία-περιβάλλον βασίζονται σε προβολές με την χρήση ντετερμινιστικών μοντέλων με βάση εναλλακτικά σενάρια και ανάλυση ευαισθησίας. Αυτό το είδος ανάλυσης προσφέρει ένα πολύτιμο μέσο για την διερεύνηση εναλλακτικών δυνατοτήτων με ένα διάφανο και σαφή τρόπο, ο οποίος είναι ιδιαίτερα χρήσιμος για την υποστήριξη πολιτικών και την εξερεύνηση των επιπτώσεών τους. Ωστόσο, δεν παρέχει καμία ποσοτική ένδειξη για το πόσο πιθανές μπορούν να είναι τέτοιες εξελίξεις. Οι πληροφορίες αυτές (για τις πιθανότητες εναλλακτικών εξελίξεων και τη συσχέτισή μεταξύ τους) έχουν συχνά σημαντική σημασία για την αξιολόγηση επενδύσεων και πολιτικών και προσθέτουν μια επιπλέον διάσταση στην ντετερμινιστική ανάλυση. Τα στοχαστικά μοντέλα είναι τα κατάλληλα εργαλεία για την παροχή αυτού του είδους των πληροφοριών.

Το στοχαστικό μοντέλο PROMHΘΕΑΣ έχει χρησιμοποιηθεί για την υποστήριξη αρκετών εφαρμογών, συμπεριλαμβανομένης της γενικής ανάλυσης αβεβαιότητας για την εξέλιξη του ενεργειακού συστήματος, της εξέτασης επενδύσεων σε Έρευνα και Ανάπτυξη για ενεργειακές τεχνολογίες και την στοχαστική ανάλυση αβεβαιότητας επενδυτικών στρατηγικών στον ενεργειακό τομέα [127, 11]. Οι από-κοινού κατανομές (joint distributions) των ενεργειακών και κλιματικών μεταβλητών, που αποτελούν την έξοδο του μοντέλου, αποθηκεύονται σε μια μεγάλη βάση δεδομένων που χρησιμοποιεί το E-VIEWS και δίνει τη δυνατότητα εκτέλεσης περαιτέρω στατιστικής ανάλυσης σύμφωνα με τις απαιτήσεις του χρήστη του μοντέλου ή του φορέα χάραξης πολιτικής.

Ο σκοπός του Κεφαλαίου 7 είναι να παρουσιάσει και να περιγράψει εκτενώς μια ολοκληρωμένη ανάλυση αβεβαιότητας για την εξέλιξη του παγκόσμιου ενεργειακού συστήματος την περίοδο 2010-2050 με την χρήση του στοχαστικού, η οποία είναι χρήσιμη για την αξιολόγηση και διερεύνηση εναλλακτικών πολιτικών. Στο πλαίσιο αυτό, το στοχαστικό σενάριο αναφοράς, που αναπτύχθηκε με τον PROMHΘΕΑ, περιλαμβάνει 2048 πειράματα Monte Carlo, τα οποία όπως δείχθηκε στο κεφάλαιο 4 αποτελούν μια ικανοποιητική προσομοίωση για την αναπαράσταση της εγγενούς μελλοντικής αβεβαιότητας. Ο κύριος σκοπός της ανάλυσης αβεβαιότητας είναι να:

- Παρέχει αξιολογήσεις για το εύρος τιμών των πιο σημαντικών αποτελεσμάτων (ενδογενών μεταβλητών) δίνοντας έτσι ποσοτικοποιημένες ενδείξεις για την μεταβλητότητά τους (πχ μέση τιμή, διακύμανση, ασυμμετρία της κατανομής

πιθανοτήτων, συντελεστής συσχέτισης μεταξύ τους). Αντίθετα με τις περισσότερες αναλύσεις αβεβαιότητας, οι εκτιμήσεις του PROMHΘEA χαρακτηρίζονται από έναν βαθμό αυστηρότητας καθώς παρέχουν συγκεκριμένες πιθανότητες που συνδέονται με τις μεταβλητές (π.χ. συγκεκριμένα εκατοστημόρια).

- Παρουσιάζει εκτιμήσεις για την πιθανοτική ανάλυση των βασικών παραδοχών στις οποίες στηρίζονται τα εναλλακτικά σενάρια.
- Τα στοχαστικά αποτελέσματα του PROMHΘEA μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως στρατηγικά και αναλυτικά σημαντικές πληροφορίες σχετικά με τους κινδύνους για μεταβλητές που ενσωματώνονται στο μοντέλο (π.χ. αξιολόγηση των κλιματικών κινδύνων, ανάλυση κινδύνου για επενδύσεις σε τεχνολογίες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και αξιολόγηση της ενεργειακής ασφάλειας εφοδιασμού).

Σκοπός της παρούσας ενότητας είναι να παρέχει ένα δείγμα των στοχαστικών αποτελεσμάτων του σεναρίου αναφοράς σε ποσοτικούς όρους. Το κεφάλαιο 7 παρουσιάζει τα πιο σημαντικά μακροοικονομικά αποτελέσματα, την εξέλιξη των κυριότερων τομέων του παγκόσμιου ενεργειακού συστήματος, τις επιπτώσεις για τις παγκόσμιες εκπομπές και συγκεντρώσεις διοξειδίου του άνθρακα και στοχαστικές προβολές των διεθνών τιμών πετρελαίου, φυσικού αερίου και άνθρακα. Επιπλέον, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του στοχαστικού μοντέλου σε σενάρια στα οποία διαφοροποιούνται συγκεκριμένες υποθέσεις του σεναρίου αναφοράς. Συγκεκριμένα εξετάζεται ένα σενάριο με αισιόδοξες υποθέσεις όσον αφορά την εκμετάλλευση των παγκόσμιων κοιτασμάτων του μη συμβατικού φυσικού αερίου και ένα σενάριο με φιλόδοξες κλιματικές πολιτικές σε συμφωνία με τον παγκόσμιο στόχο περιορισμού των συγκεντρώσεων αερίων το θερμοκηπίου στα επίπεδα των 450 ppm. Τα αποτελέσματα των σεναρίων παρουσιάζονται σαν αποκλίσεις από την προβολή αναφοράς, η οποία αποτελεί την βάση σύγκρισης για τα σενάρια με εναλλακτικές υποθέσεις και πολιτικές. Σύμφωνα με [75], η κατασκευή στοχαστικών σεναρίων βασίζεται σε διαφοροποιημένες (πιθανοτικές) υποθέσεις και πολιτικές από το σενάριο αναφοράς και στη συνέχεια σύγκριση των κατανομών πιθανότητας που προκύπτουν για τις ενδογενείς μεταβλητές του μοντέλου και των επιπτώσεων τους με το στοχαστικό σενάριο αναφοράς.

7.2 Εξωγενείς μεταβλητές

Αυτή η ενότητα παρουσιάζει την ανάλυση αβεβαιότητας για τις πιο σημαντικές μεταβλητές που επηρεάζουν την εξέλιξη του παγκόσμιου ενεργειακού συστήματος, όπως ο πληθυσμός και η οικονομική δραστηριότητα. Οι μεταβλητές είναι εξωγενείς και οι κατανομές πιθανοτήτων τους αναπτύσσονται με βάση εξειδικευμένες έρευνες. Σε αυτό το σημείο είναι χρήσιμο να εισάγουμε τον Πίνακα 7-1 ο οποίος παρουσιάζει τις κύριες στοχαστικές παραμέτρους εισόδου και ενδογενείς μεταβλητές οι οποίες χρησιμοποιούνται στο στοχαστικό μοντέλο.

Αβέβαιες Παράμετροι μοντέλου	Ενδογενείς μεταβλητές
Ελαστικότητες τιμής	Πρωτογενής ζήτηση ενέργειας ανά καύσιμο
Ελαστικότητες εισοδήματος της ζήτησης ενέργειας ανά τομέα	Τελική ζήτηση ενέργειας ανά καύσιμο και ανά τομέα
Σταθερές τάσεις εξισώσεων ζήτησης	Ζήτηση ηλεκτρισμού ανά τομέα
Κλιματικές και ενεργειακές πολιτικές	Μίγμα τεχνολογιών ηλεκτροπαραγωγής
Κοιτάσματα υδρογονανθράκων	Παραγωγή υδρογονανθράκων
Εξέλιξη του πληθυσμού ανά περιοχή	Κόστος των ενεργειακών τεχνολογιών/ κόστος του ενεργειακού συστήματος
Εξέλιξη του ΑΕΠ μέχρι το 2050	Διείσδυση των μη συμβατικών αυτοκινήτων στον στόλο των επιβατικών
Ελαστικότητες καθορισμού των τιμών ενέργειας	Εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα ανά τομέα, καύσιμο και περιοχή
Δυναμικότητα ανά τεχνολογία ΑΠΕ και περιοχή	Ατμοσφαιρικές συγκεντρώσεις άνθρακα
Ελαστικότητες εκμάθησης για τις ενεργειακές τεχνολογίες	Διεθνείς τιμές πετρελαίου, φυσικού αερίου και άνθρακα

Πίνακας 7-1: Ταξινόμηση των σημαντικότερων ενδογενών μεταβλητών και παραμέτρων εισόδου (στοχαστικές) που χρησιμοποιούνται στο στοχαστικό μοντέλο

Ο παγκόσμιος πληθυσμός προβλέπεται να αυξηθεί μέχρι το 2050, αλλά είναι εξαιρετικά απίθανο να παρατηρηθεί υψηλότερος μέσος ετήσιος ρυθμός ανάπτυξης κατά την περίοδο 2010-2050 σε σύγκριση με τα ιστορικά δεδομένα (1970-2010) σε όλες τις περιοχές του μοντέλου. Ο μέσος ετήσιος ρυθμός αύξησης του παγκόσμιου πληθυσμού για την περίοδο 2010-2030 προβλέπεται να είναι 1.02% ετησίως, ενώ για το χρονικό διάστημα 2030-2050 μόλις 0.49%. Παράλληλα υπάρχει μια γενική τάση για συνεχή μείωση στα ποσοστά γονιμότητας στις αναπτυσσόμενες περιοχές παράλληλα με την βελτίωση του βιοτικού επιπέδου, η οποία μόνο μερικώς αντισταθμίζεται από την αύξηση του προσδόκιμου ζωής στις φτωχότερες χώρες (π.χ. Υποσαχάρια Αφρική). Επιπλέον, το μοντέλο εκτιμάει ότι η πιθανότητα ο μέσος ρυθμός αύξησης του παγκόσμιου πληθυσμού να ξεπεράσει τη μισή τιμή του ιστορικού (1970-2010) είναι μόλις 35%, ενώ η πιθανότητα είναι ακόμα χαμηλότερη για περιοχές όπως η Κίνα, η Ινδία, οι αναδυόμενες οικονομίες και η CIS. Οι πολιτικές της Κίνας για τον έλεγχο των γεννήσεων μετά το 1990, παρά τις πιθανές μελλοντικές χαλαρώσεις, οδηγούν σε

πιθανότητα 72% μείωσης του πληθυσμού μετά το 2030. Μέχρι το 2050, η στοχαστική ανάλυση δείχνει ότι η Ινδία, παρά την σημαντική επιβράδυνση που αντιμετωπίζει, έχει πιθανότητα 98% να είναι πιο πυκνοκατοικημένη χώρα στον κόσμο ξεπερνώντας την Κίνα (η πιθανότητα ενός τέτοιου γεγονότος το 2030 εκτιμάται σε 45%).

Η οικονομική δραστηριότητα στον ΠΡΟΜΗΘΕΑ μετρείται σε σταθερές ισοτιμίες αγοραστικής δύναμης σε δολάρια του 2005 (purchasing power parities-PPPs)²⁵. Το στοχαστικό σενάριο αναφοράς προβλέπει μείωση του μέσου ρυθμού αύξησης του κατά κεφαλήν ΑΕΠ στις ανεπτυγμένες οικονομίες σε σύγκριση με την περίοδο 1970-2010 (Πίνακας 7-2). Αυτό το αποτέλεσμα είναι σύμφωνο με τη γενική τάση της φθίνουσας οριακής παραγωγικότητας του κεφαλαίου, της εργασίας και της γνώσης όσο αυξάνεται η οικονομική δραστηριότητα ανά κάτοικο. Από την άλλη πλευρά, στις αναπτυσσόμενες περιοχές προβλέπεται ταχεία αύξηση της οικονομικής δραστηριότητας, με αποτέλεσμα μια σημαντική μετατόπιση της γεωγραφικής κατανομής του παγκόσμιου ΑΕΠ; ενώ οι αναπτυσσόμενες οικονομίες αντιπροσώπευαν μόνο το 41% του παγκόσμιου ΑΕΠ το 2000 (και συνεπώς οι ανεπτυγμένες το 59%), το 2050 έχουν 100% πιθανότητα να έχουν υψηλότερο ΑΕΠ από τις ανεπτυγμένες και 64% πιθανότητα να έχουν μερίδιο μεγαλύτερο από τα 2/3 της παγκόσμιας οικονομικής δραστηριότητας. Η Ινδία έχει πιθανότητα 81% να διπλασιάσει το μερίδιό της στο παγκόσμιο ΑΕΠ μέχρι το 2050 εξαιτίας της αύξησης του πληθυσμού της και κυρίως της αύξησης των επενδύσεων (σαν ποσοστό του ΑΕΠ) και της αύξησης της συνολικής παραγωγικότητας. Οι παραπάνω μεταβολές οδηγούν σε σημαντική αύξηση του ΑΕΠ ανά κάτοικο, το οποίο προβλέπεται να αυξηθεί κατά 3.65% ετησίως κατά μέσο όρο μέχρι το 2050 (Πίνακας 7-2).

Ενώ ο εκτιμώμενος ρυθμός αύξησης του ΑΕΠ μέχρι το 2050 ανά κάτοικο στις ανεπτυγμένες οικονομίες έχει αμελητέες πιθανότητες (2.5%) και στις αναπτυσσόμενες περιοχές έχει πιθανότητα μόλις 36% να υπερβεί τα ιστορικά ποσοστά αύξησης, η αντίστοιχη πιθανότητα για τον κόσμο είναι 70% σύμφωνα με τα αποτελέσματα του μοντέλου. Αυτό αντανακλά την συνεχώς αυξανόμενη σημασία των αναπτυσσόμενων περιοχών (οι οποίες χαρακτηρίζονται από υψηλότερους ρυθμούς αύξησης του ΑΕΠ) στην παγκόσμια οικονομική δραστηριότητα. Η πιθανότητα ότι η αύξηση του κατά κεφαλήν ΑΕΠ στην Ευρώπη θα είναι υψηλότερη από τις υπόλοιπες ανεπτυγμένες οικονομίες κατά την περίοδο 2010-2050 εκτιμάται σε 52%. Από την άλλη πλευρά, υπάρχει ιδιαίτερα μεγάλη πιθανότητα (98%) ότι το μέσο κατά κεφαλήν ΑΕΠ στην ΕΕ θα εξακολουθήσει να είναι χαμηλότερο σε σύγκριση με την Β. Αμερική καθ' όλη την διάρκεια της περιόδου 2010 με 2050.

Η στοχαστική ανάλυση δείχνει ότι οι αναπτυσσόμενες οικονομίες συγκλίνουν σταδιακά με τα επίπεδα ευημερίας των ανεπτυγμένων περιοχών, αλλά είναι εξαιρετικά απίθανο να φθάσουν τα επίπεδα του κατά κεφαλήν ΑΕΠ της Ευρωπαϊκής Ένωσης ακόμη και το 2050. Η πιθανότητα ότι το κατά κεφαλήν ΑΕΠ στις αναπτυσσόμενες

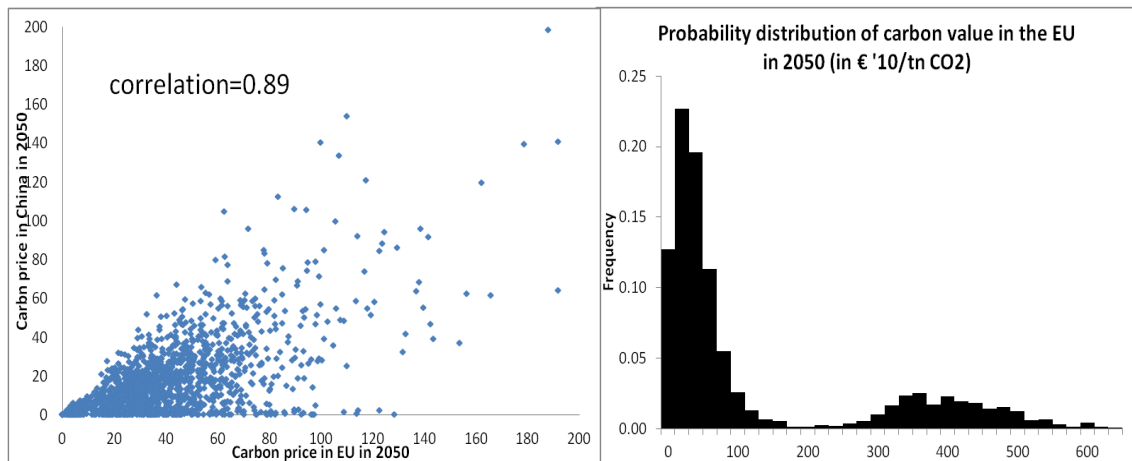
²⁵ Μια άλλη μέθοδος μέτρησης του ΑΕΠ είναι η συναλλαγματική ισοτιμία (Market Exchange Rate-MER) σε σταθερές τιμές μιας συγκεκριμένης χρονιάς (αξιολόγηση των δυο μεθόδων μέτρησης του ΑΕΠ παρουσιάζεται στο [173]). Στον ΠΡΟΜΗΘΕΑ επιλέχθηκε η μέθοδος PPP που χρησιμοποιείται συχνότερα σε ενεργειακά μοντέλα και είναι συμβατή με την μέθοδο που έχει επιλέξει η ΔΟΕ [38].

περιοχές το 2050 θα είναι υψηλότερο σε σύγκριση με το κατά κεφαλήν ΑΕΠ της Ευρώπης το 1990 εκτιμάται σε μόλις 12%. Οι ρυθμοί αύξησης του κατά κεφαλήν ΑΕΠ στις περιοχές που αναπαρίστανται στον ΠΡΟΜΗΘΕΑ συσχετίζονται ισχυρώς μεταξύ τους, καθώς η παγκόσμια οικονομία εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το διεθνές εμπόριο, την τεχνική πρόοδο και την αύξηση της παραγωγικότητας. Το στοχαστικό υπο-μοντέλο της οικονομικής δραστηριότητας έχει σχεδιαστεί για να εφαρμόσει την παραπάνω ιδέα της θετικής συσχέτισης στους ρυθμούς ανάπτυξης, λαμβάνοντας υπόψη τόσο βραχυπρόθεσμες όσο και μακροπρόθεσμες μεταβολές (που προέρχονται από οικονομετρική εκτίμηση χρονολογικών σειρών με πολύ μεγάλο ορίζοντα για την εξέλιξη του κατά κεφαλήν ΑΕΠ). Στις περιοχές CIS και MENA, ο ΠΡΟΜΗΘΕΑΣ ενσωματώνει στις εξισώσεις προβολής του ΑΕΠ τις επιπτώσεις από αλλαγές στις διεθνείς τιμές του πετρελαίου και του φυσικού αερίου (αύξηση του ΑΕΠ σε περιπτώσεις αύξησης των τιμών), δεδομένου ότι οι ενεργειακές εξαγωγές αντιπροσωπεύουν μεγάλο ποσοστό της οικονομικής τους δραστηριότητας.

	European Union	Rest of OECD	Developing Regions	noam	wpac	chn	ind	cis	mena	"emrg"	"poor"	world
Mean	1.49	1.43	2.69	1.27	1.61	3.47	3.65	1.95	2.26	2.15	2.85	2.04
Median	1.48	1.42	2.69	1.26	1.59	3.47	3.66	1.95	2.26	2.13	2.85	2.04
Std. Dev.	0.26	0.37	0.17	0.41	0.47	0.21	0.33	0.34	0.25	0.39	0.19	0.19
lower 5%	1.09	0.81	2.42	0.60	0.85	3.14	3.08	1.38	1.85	1.52	2.52	1.74
upper 5%	1.93	2.04	2.98	1.95	2.38	3.82	4.18	2.53	2.68	2.85	3.16	2.37
<i>historical growth (1970 to 2008)</i>	2.02	2.19	2.75	2.00	2.54	7.45	3.31	1.30	1.47	1.93	0.91	1.94
<i>probability to exceed historical growth(%)</i>	2.5	2.4	35.6	3.8	2.2	0.0	85.9	96.9	100.0	70.5	100.0	70.2

Πίνακας 7-2: Στατιστικά στοιχεία των υποθέσεων για αύξηση του ΑΕΠ/κάτοικο (περίοδος 2010-2050)

Το στοχαστικό σενάριο ενσωματώνει υποκειμενικά εκτιμημένες πιθανότητες για παγκόσμια συντονισμένη δράση για το κλίμα (κεφάλαιο 4) και ως εκ τούτου οι κατανομές των εκπομπών και των συγκεντρώσεων διοξειδίου του άνθρακα είναι ασύμμετρες (οι μέσες τιμές είναι χαμηλότερες από τις διάμεσες). Κατά την παραγωγή των κατανομών για τις παραμέτρους εισόδου, έχει δοθεί ιδιαίτερη προσοχή στα θέματα συνυπολογισμού και άθροισης των κρίσεων εμπειρογνομόνων και στην πιστοποίηση της ανεξαρτησίας τους. Δύο χαρακτηριστικά των κατανομών τιμών άνθρακα (Γράφημα 7-1) είναι η ισχυρή θετική συσχέτιση μεταξύ των περιοχών (ιδιαίτερα μετά το 2030) και η μεγάλη ασυμμετρία τους, εξαιτίας της εισαγωγής πιθανοτήτων συντονισμένης παγκόσμιας δράσης για το κλίμα, που καθιστούν τις μέσες τιμές πολύ υψηλότερες από τις διαμέσους (π.χ. η μέση τιμή του άνθρακα στην ΕΕ προβλέπεται να είναι 105 € ανά τόνο διοξειδίου το 2050, ενώ η μέση τιμή είναι μόνο 54 €). Επιπλέον, η ενσωμάτωση πιθανοτήτων συντονισμένης κλιματικής δράσης δίνουν μορφή δικόρυφης (bi-modal) κατανομής στις τιμές άνθρακα.



Γράφημα 7-1: Κατανομή των τιμών άνθρακα στην Ευρώπη που χρησιμοποιούνται σαν είσοδος στο μοντέλο το 2050 (σε € 2010/tn CO₂)

7.3 Ενεργειακή κατανάλωση στο σενάριο αναφοράς

Ο σκοπός της ενότητας είναι η παρουσίαση ενός δείγματος των στοχαστικών αποτελεσμάτων σε ποσοτικούς όρους. Στην παρούσα ενότητα, η έμφαση δίνεται στην πιθανολογική εκτίμηση της εξέλιξης της ζήτησης ενέργειας ανά καύσιμο και ανά τομέα.

7.3.1 Πρωτογενής ζήτηση ενέργειας

Το στοχαστικό σενάριο αναφοράς προβλέπει ότι υπάρχουν ιδιαίτερα υψηλές πιθανότητες επιβράδυνσης της ετήσιας αύξησης της παγκόσμιας ζήτησης ενέργειας σε σύγκριση με την περίοδο 1970-2010; Στην τελευταία, η μέση ετήσια αύξηση ήταν 2.28%, ενώ την περίοδο 2010-2050 ο μέσος όρος της αύξησης προβλέπεται να είναι 1.77% ανά έτος με μόλις 3.5% πιθανότητα να ξεπεράσει τις ιστορικές τάσεις. Οι βασικοί λόγοι της επιβράδυνσης είναι:

- Οι βελτιώσεις στην ενεργειακή αποδοτικότητα σε όλους τους τομείς της τελικής ενεργειακής κατανάλωσης και η εισαγωγή πιο αποδοτικών τεχνολογιών
- Η αύξηση των διεθνών τιμών των ορυκτών καυσίμων την περίοδο 2010-2050
- Η συνέχιση των διαρθρωτικών αλλαγών με κύριο χαρακτηριστικό την τάση για αποβιομηχάνιση της οικονομικής παραγωγής (μείωση του ποσοστού των ενεργοβόρων βιομηχανιών στην συνολική οικονομική δραστηριότητα)
- Η σταδιακή εισαγωγή κλιματικών πολιτικών σε παγκόσμιο επίπεδο

Η κατανάλωση ενέργειας στις αναπτυσσόμενες περιοχές αυξάνεται κατά μέσο όρο πολύ πιο γρήγορα σε σύγκριση με τις αναπτυγμένες οικονομίες. Το 2005 το μερίδιο των αναπτυσσόμενων χωρών στην παγκόσμια ζήτηση ενέργειας ήταν περίπου ίσο με το ποσοστό των αναπτυγμένων. Με βάση τις προβολές του μοντέλου και τις εκτιμήσεις μακροχρόνιων τάσεων, το 2050 η ζήτηση ενέργειας των αναπτυσσόμενων περιοχών έχει 100% πιθανότητα να ξεπεράσει το 50% της παγκόσμιας κατανάλωσης και 61% να ξεπεράσει ακόμα και το 75% της παγκόσμιας ζήτησης ενέργειας (Πίνακας 7-3).

Πίνακας 7-3: Μερίδια περιοχών στην παγκόσμια πρωτογενή ζήτηση ενέργειας το 2030 και το 2050 (αποτελέσματα στοχαστικής ανάλυσης με το μοντέλο)

	2030			2050		
	European Union	Rest of OECD	developing regions	European Union	Rest of OECD	developing regions
Mean	10.5	21.4	68.1	7.8	16.4	75.8
Median	10.4	21.4	68.1	7.8	16.3	75.9
lower 5%	8.8	17.9	63.1	6.2	12.8	70.7
upper 5%	12.3	25.2	72.9	9.7	20.4	80.5
Std. Dev.	1.0	2.2	2.9	1.0	2.3	3.0
share in 2005	17.6	33.2	49.2	17.6	33.2	49.2

Σε όλες τις περιοχές του ΠΡΟΜΗΘΕΑ, προβάλλονται βελτιώσεις του δείκτη ενεργειακής έντασης του ΑΕΠ με ιδιαίτερα υψηλό βαθμό βεβαιότητας. Το στοχαστικό μοντέλο προβλέπει ταχύτερες κατά μέσο όρο βελτιώσεις στην Ευρώπη σε σύγκριση με το υπόλοιπο του ΟΟΣΑ, το οποίο οδηγεί σε μια σαφή αντιστροφή των τάσεων που έχουν παρατηρηθεί. Η κύρια αιτία είναι η υλοποίηση φιλόδοξων κλιματικών πολιτικών στην Ευρωπαϊκή Ένωση, οι οποίες περιλαμβάνουν πολιτικές εξοικονόμησης ενέργειας. Η πιθανότητα ότι η βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης στην ΕΕ είναι μεγαλύτερη σε σύγκριση με τις υπόλοιπες αναπτυσσόμενες οικονομίες εκτιμάται σε 81%.

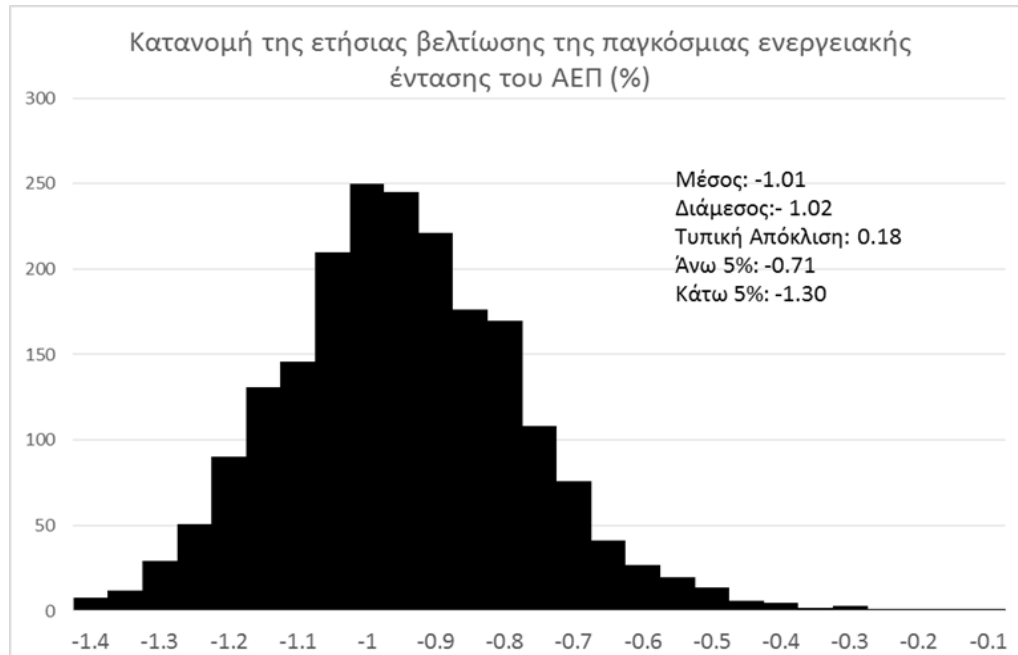
Οι αναπτυσσόμενες περιοχές έχουν πιθανότητα 66% να επιτύχουν ταχύτερες βελτιώσεις στους δείκτες ενεργειακής έντασης του ΑΕΠ σε σχέση με την πρόσφατη ιστορική περίοδο. Παρά τις ταχύτερες βελτιώσεις σε σύγκριση με την περίοδο 1970-2010 τόσο για τις αναπτυσσόμενες όσο και για τις αναπτυσσόμενες περιοχές, ο δείκτης ενεργειακής έντασης του ΑΕΠ στο παγκόσμιο επίπεδο έχει πιθανότητα μόλις 22% να μειωθεί ταχύτερα από τα ιστορικά δεδομένα, εξαιτίας της ολοένα αυξανόμενης σημασίας των αναπτυσσόμενων χωρών, οι οποίες χαρακτηρίζονται από υψηλότερους κατά μέσο όρο δείκτες ενεργειακής έντασης σε σχέση με τις ανεπτυγμένες οικονομίες.

Πίνακας 7-4: Στατιστικά στοιχεία για τον ετήσιο ρυθμό μεταβολής του δείκτη ενεργειακής έντασης του ΑΕΠ (στοχαστικές προβολές του μοντέλου) στις περιοχές την περίοδο 2010-2050

	European Union	Rest of OECD	Developing regions	World
Mean	-1.71	-1.53	-0.85	-1.01
Median	-1.71	-1.53	-0.86	-1.02
Std. Dev.	0.16	0.21	0.22	0.18
lower 5%	-1.97	-1.88	-1.19	-1.30
upper 5%	-1.45	-1.19	-0.48	-0.71
<i>historical growth (1980-2008)</i>	-1.36	-1.57	-0.76	-1.15
probability of faster improvement than historical	98.4	42.9	66.4	21.5

Το παρακάτω γράφημα παρουσιάζει την κατανομή της μέσης ετήσιας μείωσης της παγκόσμιας ενεργειακής έντασης του ΑΕΠ όπως προκύπτει από τα αποτελέσματα

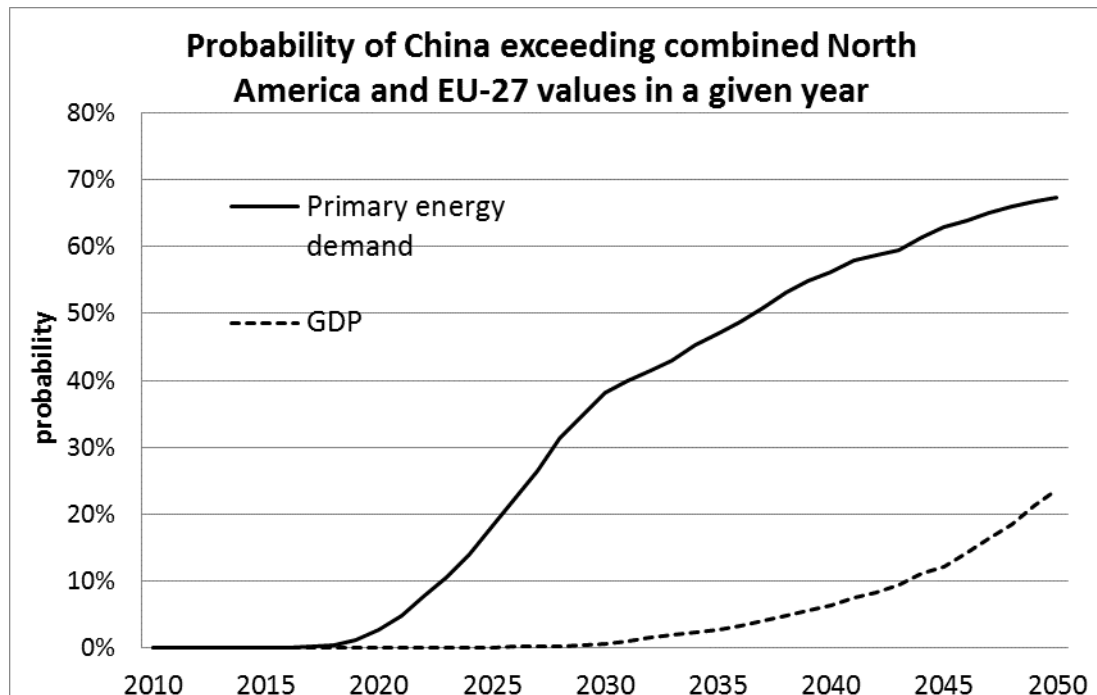
του στοχαστικού μοντέλου. Ο μέσος της κατανομής βρίσκεται στο -1.01% /έτος, ενώ η κατανομή προσεγγίζει την κανονική μορφή με τυπική απόκλιση ίση με 0.18 και πολύ μικρές ασυμμετρίες. Η πιθανότητα η βελτίωση να είναι μεγαλύτερη από τα ιστορικά δεδομένα υπολογίζεται σε 22% εξαιτίας των μεταβολών στην κατανομή ανά περιοχή του παγκόσμιου ΑΕΠ και της ενεργειακής ζήτησης. Το 90% διάστημα εμπιστοσύνης της κατανομής (δηλαδή το διάστημα μεταξύ των 5% και 95% εκατοστημορίων) βρίσκεται μεταξύ -0.7% και -1.3% ανά έτος (συμβατό με τα ιστορικά δεδομένα).



Γράφημα 7-2: Κατανομή της μέσης ετήσιας βελτίωσης της παγκόσμιας ενεργειακής έντασης του ΑΕΠ (σε %) με βάση την στοχαστική ανάλυση του μοντέλου στο σενάριο αναφοράς

Κατά την διάρκεια των τελευταίων δεκαετιών σημειώθηκε μια πολύ γρήγορη αύξηση της σημασίας της Κίνας σε οικονομικούς όρους, καθώς και σαν σημαντικός παίκτης στις διεθνείς αγορές ενέργειας. Υπάρχουν μια σειρά από παράγοντες που συμβάλλουν σε μια πιθανή επιβράδυνση των τάσεων αυτών κατά τις επόμενες δεκαετίες, κυρίως η σταδιακή εξάντληση των δυνατοτήτων για υψηλή αύξηση της παραγωγικότητας, καθώς οι διαδικασίες της εκβιομηχάνισης και αστικοποίησης της Κίνας ολοκληρώνονται, σε συνδυασμό με δημογραφικούς παράγοντες (μείωση του ενεργού πληθυσμού). Παρ' όλα αυτά, οι τωρινές δυναμικές τάσεις δείχνουν ότι η Κίνα βρίσκεται σε πορεία για να ξεπεράσει οικονομικούς γίγαντες, όπως οι Η.Π.Α., στο εγγύς μέλλον. Στην παρακάτω απεικόνιση των αποτελεσμάτων του ΠΡΟΜΗΘΕΑ (Γράφημα 7-3), αντιμετωπίζεται το ζήτημα της ημερομηνίας κατά την οποία η Κίνα θα έχει μεγαλύτερο ΑΕΠ (μετρούμενο σε PPP) σε σύγκριση με το άθροισμα Β. Αμερικής και Ευρωπαϊκής Ένωσης. Σύμφωνα με την στοχαστική ανάλυση σε μακρο-οικονομικό επίπεδο, η Κίνα έχει μια ιδιαίτερα χαμηλή πιθανότητα να ξεπεράσει τις δύο περιοχές αθροιστικά πριν από το 2030. Η πιθανότητα να τις ξεπεράσει εκτιμάται σε μόλις 6% το 2040 και 24% το 2050. Από την άλλη πλευρά, η Κίνα χαρακτηρίζεται από ιδιαίτερα

υψηλό δείκτη ενεργειακής έντασης του ΑΕΠ, κυρίως εξαιτίας του μεγάλου ποσοστού των ενεργοβόρων βιομηχανιών στην οικονομική της δραστηριότητα και της μεγάλης χρησιμοποίησης άνθρακα στο ενεργειακό μίγμα. Κατά μέσο όρο, η ενεργειακή ένταση του ΑΕΠ στην Κίνα προβλέπεται να μειωθεί δραματικά την περίοδο 2010-2050 (-2.6% ετησίως). Παρά την μεγάλη μείωση, τα αποτελέσματα του ΠΡΟΜΗΘΕΑ δείχνουν ότι από την σκοπιά της ενεργειακής κατανάλωσης, η Κίνα έχει 38% πιθανότητα να είναι πιο σημαντική από το άθροισμα της Ευρωπαϊκής Ένωσης και της Βόρειας Αμερικής το 2030. Αυτή η πιθανότητα προβλέπεται να αυξηθεί σε 67% το 2050 [84].



Γράφημα 7-3: Πιθανότητα του έτους στο οποίο η Κίνα θα ξεπεράσει τις αθροιστικές τιμές της Βόρειας Αμερικής και της Ευρώπης με βάση την στοχαστική ανάλυση με το μοντέλο

Σε παγκόσμιο επίπεδο, η κατανάλωση άνθρακα προβλέπεται να αυξηθεί με βραδύτερο ρυθμό σε σύγκριση με την κατανάλωση πετρελαίου και αερίου και συνεπώς το μερίδιό του άνθρακα στην παγκόσμια πρωτογενή ζήτηση έχει πιθανότητα 65% να μειωθεί το 2030 σε σύγκριση με το 2005 (Πίνακας 7-5); Μακροπρόθεσμα η πιθανότητα αυτή γίνεται σχεδόν 100% κυρίως εξαιτίας της συνεχώς αυξανόμενης έντασης των πολιτικών για το κλίμα. Παρά το γεγονός ότι στις περισσότερες περιοχές προβλέπεται μείωση της κατανάλωσης άνθρακα, είναι εξαιρετικά απίθανο ότι η Κίνα και η Ινδία θα απόσχουν από την εκμετάλλευση των ιδιαίτερα μεγάλων και χαμηλού κόστους κοιτασμάτων άνθρακα που διαθέτουν, λόγω της σπανιότητας εναλλακτικών εγχώριων πηγών ενέργειας μεγάλης κλίμακας (περιορισμένα κοιτάσματα πετρελαίου και αερίου).

Το ποσοστό του φυσικού αερίου στην παγκόσμια κατανάλωση ενέργειας προβλέπεται να αυξηθεί με 84% πιθανότητα την περίοδο 2010 με 2030. Η επέκταση των δικτύων μεταφοράς και διανομής φυσικού αερίου (κυρίως στις αναπτυσσόμενες οικονομίες) και η χαμηλότερη διεθνής τιμή του (σε σχέση με το πετρέλαιο) οδηγούν σε

αύξηση της ζήτησης αερίου, το οποίο υποκαθιστά τα υπόλοιπα καύσιμα σε ενεργειακές χρήσεις. Αντίθετα, μακροπρόθεσμα το αέριο σταδιακά μετατρέπεται σε μια σχετικά ακριβή μορφή ενέργειας εξαιτίας της σπανιότητάς των κοιτασμάτων (το σενάριο υποθέτει ιδιαίτερα χαμηλή εκμετάλλευση των μη συμβατικών κοιτασμάτων); συνεπώς το μερίδιο του αερίου στην παγκόσμια ζήτηση ενέργειας έχει πιθανότητα 66% να μειωθεί κατά την περίοδο 2030-2050. Η παγκόσμια ζήτηση για πετρέλαιο προβλέπεται να έχει σχετικά μεγάλη αύξηση, κυρίως εξαιτίας της ραγδαίας αύξησης του ποσοστού ιδιοκτησίας επιβατικών αυτοκινήτων στις αναπτυσσόμενες περιοχές. Η στοχαστική προβολή δείχνει ότι η ζήτηση πετρελαίου για μεταφορές στον αναπτυσσόμενο κόσμο θα αυξηθεί κατά 3.6% ετησίως κατά μέσο όρο την περίοδο 2010-2050.

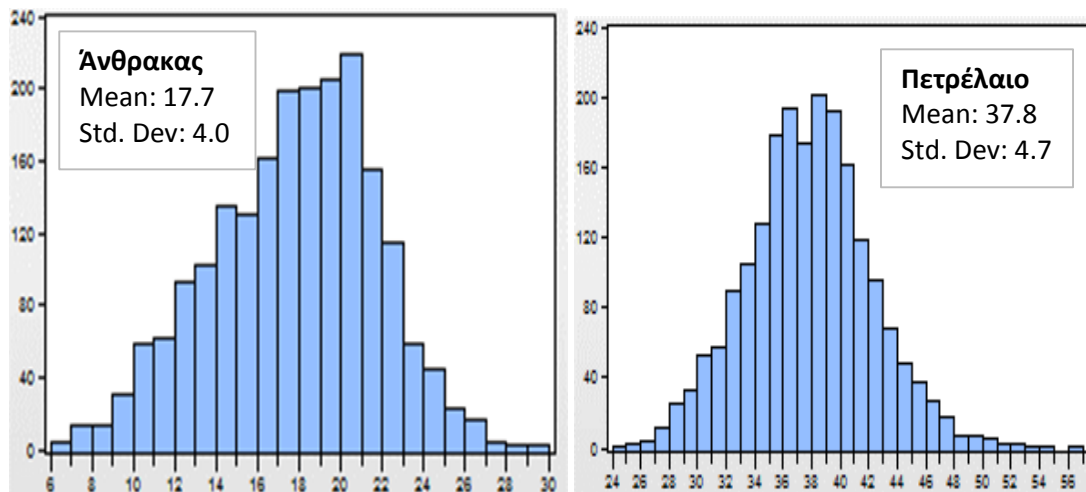
Πίνακας 7-5: Ποσοστά ενεργειακών μορφών στην παγκόσμια ζήτηση ενέργειας το 2030 και το 2050 με βάση τις στοχαστικές προεκτάσεις του μοντέλου

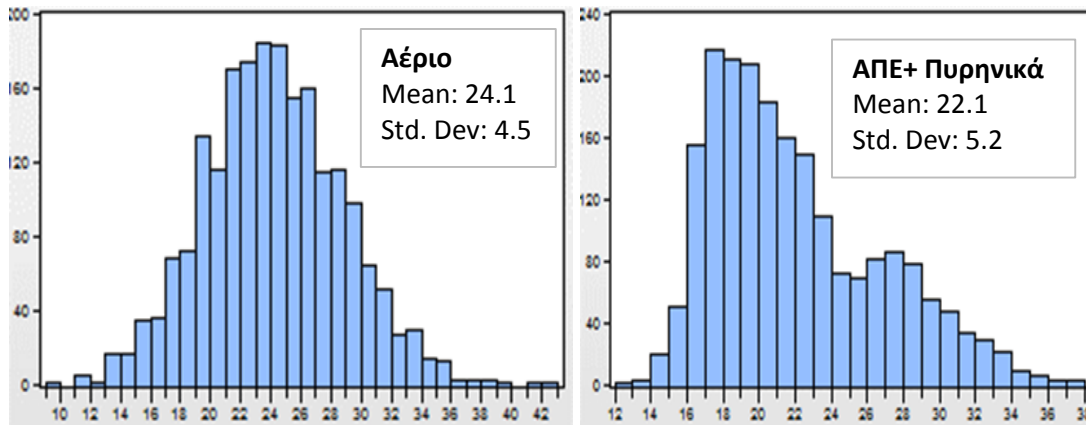
	2030					2050				
	coal	gas	oil	nuclear	renewables	coal	gas	oil	nuclear	renewables
Mean	23.7	25.7	34.5	7.9	8.3	17.7	24.1	37.8	9.7	10.7
Median	26.3	25.6	34.4	6.1	7.5	18.2	23.9	38.1	9.0	9.9
Std. Dev.	6.7	2.8	2.4	4.1	2.2	4.0	4.5	4.7	4.3	3.2
lower 5%	10.7	21.1	30.8	4.2	6.0	10.7	16.6	29.6	4.1	6.8
upper 5%	30.5	30.4	38.6	16.7	12.9	23.5	31.6	45.2	17.9	17.1
share in 2005	27.4	22.9	39.3	6.8	3.7	27.4	22.9	39.3	6.8	3.7
probability to exceed 2005 share	34.8	84.4	2.9	39.6	100.0	0.3	59.3	38.7	70.6	100.0

Το στοχαστικό σενάριο προβάλλει σημαντική αύξηση του ποσοστού των ΑΠΕ μέχρι το 2050. Ο φόρος άνθρακα αποτελεί προφανώς ένα βασικό κίνητρο για την υλοποίηση πολιτικών προώθησης των ΑΠΕ, ενώ η υποκατάσταση των πετρελαϊκών προϊόντων από τα βιοκαύσιμα έχει ως κύρια αιτία την αύξηση των διεθνών τιμών πετρελαίου. Επιπλέον, οι τεχνολογίες ΑΠΕ έχουν προοπτικές για σημαντικές βελτιώσεις των τεχνολογικών και οικονομικών τους χαρακτηριστικών. Ο συνδυασμός μειωμένου κόστους, αύξησης των τιμών των υδρογονανθράκων και υλοποίησης κλιματικών πολιτικών οδηγεί στον τριπλασιασμό (κατά μέσο όρο) του ποσοστού των ΑΠΕ στο παγκόσμιο ενεργειακό μίγμα κατά την περίοδο 2010-2050. Το ποσοστό της πυρηνικής ενέργειας επίσης αυξάνεται κατά μέσο όρο την περίοδο 2005-2050 με πιθανότητα 71%. Οι κατανομές των ποσοστών της πυρηνικής ενέργειας και των ΑΠΕ είναι ασύμμετρες αντικατοπτρίζοντας την ισχυρή θετική τους συσχέτιση με τις κλιματικές πολιτικές (τιμή διοξειδίου του άνθρακα). Επιπλέον οι κατανομές αυτές έχουν τον υψηλότερο συντελεστή διακύμανσης (διακύμανση προς μέσο όρο) σε σύγκριση με τις άλλες πηγές ενέργειας εξαιτίας της μεγάλης αβεβαιότητας που περιβάλλει τόσο την ένταση της πολιτικής για το κλίμα όσο και την τεχνολογική πρόοδο μέχρι το 2050.

Η στοχαστική προβολή οδηγεί σε σταδιακή μείωση του ρόλου του άνθρακα στο παγκόσμιο ενεργειακό μίγμα εξαιτίας κλιματικών πολιτικών και της υποκατάστασής του από πιο οικονομικές, ενεργειακά αποδοτικές και φιλικότερες στο περιβάλλον

ενεργειακές μορφές. Συνεπώς, η πιθανότητα η ζήτηση φυσικού αερίου να ξεπεράσει τον άνθρακα αυξάνεται συνεχώς από 11% το 2020 σε 51% το 2030 και 85% το 2050. Από την άλλη πλευρά, η πιθανότητα η παγκόσμια κατανάλωση φυσικού αερίου να υπερβεί την αντίστοιχη του πετρελαίου είναι ιδιαίτερα χαμηλή (μόλις 3% το 2050). Τα ποσοστά των ενεργειακών μορφών στο παγκόσμιο ενεργειακό μίγμα (οι κατανομές προήλθαν από την στοχαστική ανάλυση με το μοντέλο) το 2050 παρουσιάζονται στο Γράφημα 7-4. Παρατηρούμε ότι οι κατανομές που προκύπτουν από τα 2000 πειράματα Monte Carlo δεν έχουν κανονική μορφή καθώς παρουσιάζουν έντονες ασυμμετρίες και γενικά έχουν μεγάλες διακυμάνσεις, παρά το γεγονός ότι οι κατανομές είναι αθροιστικές (δηλαδή προκύπτουν από άθροισμα πολλαπλών επιμέρους μεταβλητών). Η κατανομή του ποσοστού του άνθρακα έχει αρνητική ασυμμετρία (*skewness*) με την μέση τιμή μικρότερη από την διάμεσο εξαιτίας της ενσωμάτωσης πιθανοτήτων για φιλόδοξες κλιματικές πολιτικές που οδηγούν σε ραγδαία μείωση της κατανάλωσης άνθρακα και επηρεάζουν περισσότερο την μέση τιμή από την διάμεσο. Αντίθετα, οι κατανομές των ποσοστών του πετρελαίου και του φυσικού αερίου έχουν μικρές τιμές του συντελεστή ασυμμετρίας και η μέση τιμή τους έχει σχετικά μικρή απόκλιση από τη διάμεσο (καθώς επηρεάζονται λιγότερο από τον άνθρακα). Τέλος, το ποσοστό τεχνολογιών μηδενικών εκπομπών CO₂ (ΑΠΕ και πυρηνικά) έχει θετική ασυμμετρία με την μέση τιμή αρκετά υψηλότερη από την διάμεσο, εξαιτίας της ισχυρής τους εξάρτησης από τη τιμή άνθρακα η οποία απεικονίζεται επίσης και στην δικόρυφη μορφή που τείνει να λάβει το ποσοστό των καθαρών τεχνολογιών (παρόμοια με την κατανομή του φόρου άνθρακα).





Γράφημα 7-4: Στοχαστικές προβολές του μοντέλου για τις κατανομές των ποσοστών των καυσίμων στο παγκόσμιο ενεργειακό μίγμα το 2050 στο σενάριο αναφοράς (σε %)

7.3.2 Τελική κατανάλωση ενέργειας στη βιομηχανία και στα νοικοκυριά

Παρά τη συνεχιζόμενη αποβιομηχάνιση και τη βελτίωση της ενεργειακής αποδοτικότητας, το στοχαστικό σενάριο προβλέπει ότι υπάρχει πιθανότητα 73% να αυξηθεί η τελική ζήτηση ενέργειας για βιομηχανικές χρήσεις στις αναπτυγμένες οικονομίες μεταξύ 2010 και 2050. Στις αναπτυσσόμενες περιοχές, η ετήσια αύξηση της βιομηχανικής ζήτησης είναι 1.7% κατά μέσο όρο και έχει πιθανότητα 17% να υπερβεί το 2% κατά την περίοδο 2005-2050²⁶. Ο ηλεκτρισμός διαδραματίζει κύριο ρόλο στην εξέλιξη της βιομηχανικής ζήτησης ενέργειας, καθώς το ποσοστό του προβλέπεται να αυξηθεί σε όλες τις περιοχές εξαιτίας της υποκατάστασης προς ηλεκτρικές διεργασίες και τις διαρθρωτικές αλλαγές προς λιγότερο ενεργοβόρους κλάδους. Το ποσοστό της ηλεκτρικής ενέργειας στην τελική ζήτηση αυξάνεται από 27% το 2010 σε 40% το 2050 (κατά μέσο όρο) και έχει πιθανότητα 69% να υπερβεί το μερίδιο του φυσικού αερίου το 2050. Ο ετήσιος ρυθμός αύξησης της παγκόσμιας ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας για τη βιομηχανία προβλέπεται να είναι 2.2% ετησίως κατά μέσο όρο.

Το ποσοστό του φυσικού αερίου στην παγκόσμια ζήτηση των μη ηλεκτρικών βιομηχανικών διεργασιών έχει πιθανότητα 68% να υπερβεί το 50% το 2050. Από την άλλη πλευρά, στην Ευρώπη υπάρχει μικρή πιθανότητα η ζήτηση αερίου να υπερβεί την τιμή του 2010. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι το φυσικό αέριο στην ΕΕ έχει σήμερα μεγάλο μερίδιο στη μη ηλεκτρική ζήτηση και άρα θα ακολουθήσει την εξέλιξη της συνολικής κατανάλωσης, η οποία έχει σημαντική πιθανότητα μείωσης (41%) μεταξύ 2010 και 2050. Το ποσοστό του άνθρακα αναμένεται να μειωθεί στις περισσότερες περιοχές μεταξύ 2010 και 2050, ενώ η αύξηση της βιομηχανικής δραστηριότητας στην Κίνα και την Ινδία σημαίνει ότι το 2050 οι 2 χώρες έχουν το 77% κατά μέσο όρο της παγκόσμιας βιομηχανικής ζήτησης άνθρακα. Το μερίδιο του πετρελαίου στη ζήτηση μειώνεται σταθερά από το 1980 και η τάση αυτή συνεχίζεται, καθώς το 2050 το μέσο ποσοστό του προβλέπεται να είναι 5%.

²⁶ Πρέπει να αναφέρουμε ότι η παρούσα ανάλυση δεν περιλαμβάνει τις μη ενεργειακές χρήσεις στην βιομηχανία, οι οποίες καταναλώνουν κυρίως πετρελαϊκά προϊόντα και φυσικό αέριο

Πίνακας 7-6: Στοχαστικές προεκτάσεις του μοντέλου στο σενάριο αναφοράς για τα μερίδια των καυσίμων στην παγκόσμια ζήτηση ενέργειας στη βιομηχανία το 2050 (σε %)

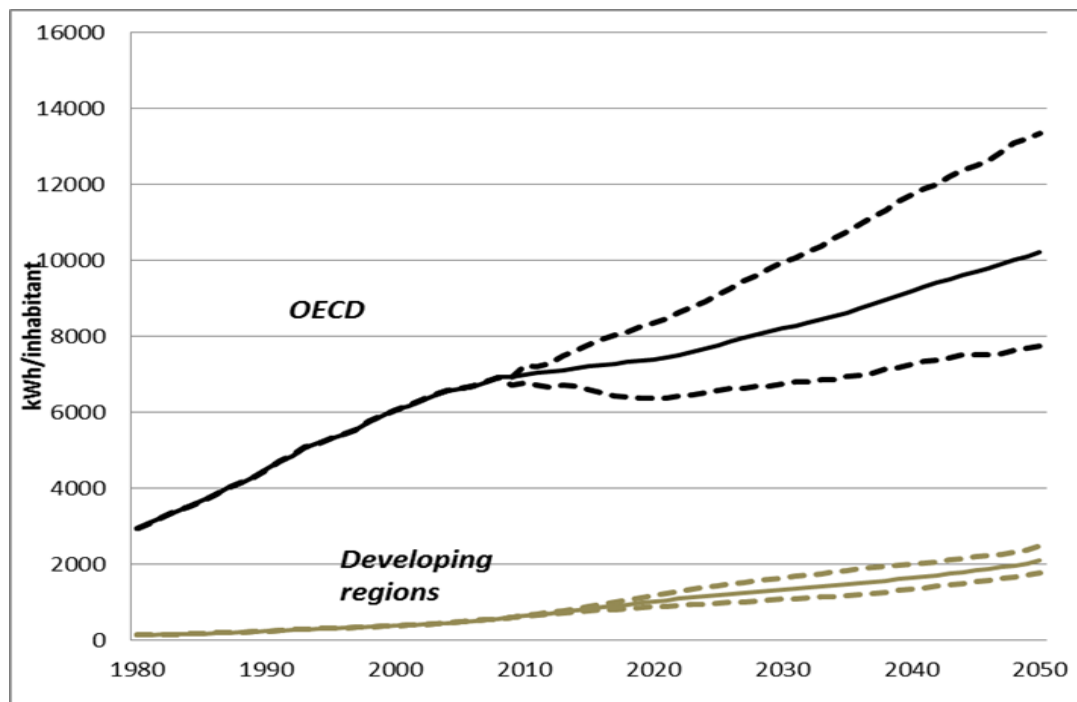
	electricity	natural gas	coal	oil	hydrogen
Mean	39.8	36.2	18.4	5.0	0.6
Median	40.0	36.2	19.1	4.6	0.1
Std. Dev.	3.5	4.8	4.7	1.9	0.9
lower 5%	33.7	27.9	9.7	2.6	0.0
upper 5%	46.4	45.3	26.3	8.9	2.7
<i>share in 2005</i>	<i>27.2</i>	<i>27.9</i>	<i>34.9</i>	<i>13.0</i>	<i>0.0</i>

Η τελική ζήτηση ενέργειας στον οικιακό τομέα θα συνεχίσει να αυξάνεται σε παγκόσμιο επίπεδο, με μέσο ετήσιο ρυθμό αύξησης 1.5% ετησίως και έχει πιθανότητα 46% να υπερβεί την αύξηση της περιόδου 1980-2010. Στις ανεπτυγμένες οικονομίες, η ζήτηση ενέργειας για τα νοικοκυριά έχει αμελητέες πιθανότητες να έχει μεγαλύτερη ετήσια αύξηση από την ιστορική, εξαιτίας της διείσδυσης πιο ενεργειακά αποδοτικών τεχνολογιών, των επιπτώσεων κορεσμού στις ανάγκες θέρμανσης και στην ιδιοκτησία ηλεκτρικών συσκευών. Αντίθετα, στις αναπτυσσόμενες χώρες προβλέπεται απογείωση στο ποσοστό ιδιοκτησίας ηλεκτρικών συσκευών ανά νοικοκυριό. Ο μέσος ετήσιος ρυθμός αύξησης της ζήτησης ενέργειας στα νοικοκυριά στις αναπτυσσόμενες περιοχές προβλέπεται να είναι 2.5% και έχει πιθανότητα 68% να υπερβεί την τάση 1980-2010.

Στις περιοχές της Β. Αμερικής και του ΟΟΣΑ Ειρηνικού, η κατά κεφαλήν ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας για μη υποκαταστάσιμες χρήσεις προβλέπεται να φτάσει κατά μέσο όρο τις 10.210 kWh το 2050 (Γράφημα 7-5). Οι επιπτώσεις από τα φαινόμενα κορεσμού είναι ήδη εμφανείς στην περιοχή, καθώς ο ιστορικός ετήσιος ρυθμός αύξησης (1980-2000) του 3.7% επιβραδύνθηκε σε 1.2% ετησίως κατά την τελευταία δεκαετία και αναμένεται να μειωθεί περαιτέρω στο 0.95% κατά μέσο όρο στα επόμενα 40 χρόνια. Μια μέση ετήσια αύξηση 1% προβλέπεται για την Ευρώπη, ενώ ακόμα και το 2050 η Ευρώπη έχει πιθανότητα 0% να υπερβεί την κατά κεφαλήν ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας στο υπόλοιπο του ΟΟΣΑ. Η στοχαστική προβολή για τις αναπτυσσόμενες περιοχές οδηγεί σε ιδιαίτερα μεγάλη αύξηση των ποσοστών ιδιοκτησίας ηλεκτρικών συσκευών παράλληλα με την βελτίωση του βιοτικού τους επιπέδου και συνεπώς η ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας αυξάνεται με ετήσιο ρυθμό της τάξης του 3.2% κατά μέσο όρο την περίοδο 2010-2050. Σύμφωνα με την στοχαστική προβολή, η κατά κεφαλήν ζήτηση ηλεκτρισμού στις αναπτυσσόμενες οικονομίες το 2050 έχει πιθανότητα 48% να υπερβεί την τιμή της ΕΕ του 1995 (η αντίστοιχη πιθανότητα για την Κίνα είναι 95%). Οι βελτιώσεις στην ενεργειακή αποδοτικότητα, η καλύτερη μόνωση των κτιρίων και τα φαινόμενα κορεσμού για ανάγκες θέρμανσης στις αναπτυσσόμενες οικονομίες οδηγούν σε υψηλές πιθανότητες μείωσης της ζήτησης ενέργειας για θέρμανση; Η πιθανότητα μείωσης εκτιμάται σε 92% στην Ευρώπη, 82% στο Υπόλοιπο του ΟΟΣΑ και 12% σε παγκόσμιο επίπεδο. Από την άλλη πλευρά, η Κίνα εξαιτίας της ιδιαίτερα μεγάλης οικονομικής ανάπτυξης μέχρι το 2050 έχει πιθανότητα 64% να υπερδιπλασιάσει (τουλάχιστον) την ζήτηση ενέργειας για οικιακή θέρμανση μεταξύ 2005 και 2050.

Το φυσικό αέριο προβλέπεται να παραμείνει η κορυφαία επιλογή για την κάλυψη της ζήτησης για θέρμανση κατοικιών καθώς το 2050 το ποσοστό του έχει 65% πιθανότητα να είναι άνω του 50% σε παγκόσμιο επίπεδο (Πίνακας 7-7) κυρίως εξαιτίας της συνεχούς ανάπτυξης του δικτύου μεταφοράς και διανομής και της οικονομικής του αποδοτικότητας. Στις ανεπτυγμένες οικονομίες, η πιθανότητα το μερίδιο του αερίου να υπερβαίνει το 50% εκτιμάται σε 79% το 2050. Ο ετήσιος ρυθμός αύξησης της ζήτησης φυσικού αερίου στις αναπτυσσόμενες περιοχές προβλέπεται να είναι 2.3% ετησίως κατά μέσο όρο την περίοδο 2010-2050. Από την άλλη πλευρά, τα ποσοστά του πετρελαίου και του άνθρακα έχουν υψηλές πιθανότητες να μειωθούν ως το 2050. Οι αντλίες θερμότητας και οι κυψέλες υδρογόνου διεισδύουν στο ενεργειακό μίγμα μετά το 2030, αλλά η σχετικά αργή ανανέωση του αποθέματος του εξοπλισμού σε συνδυασμό με τον κορεσμό στις ανάγκες θέρμανσης αποτρέπει την μεγάλης κλίμακας διείσδυση τους και συνεπώς το 2050 το μέσο ποσοστό των αντλιών θερμότητας προβλέπεται να είναι 4.7% και των κυψελών υδρογόνου 3.6%, ενώ οι διάμεσοί τους είναι μόλις 3.1% και 1.4% αντίστοιχα. Από την άλλη πλευρά, υπάρχει 11% πιθανότητα οι κυψέλες υδρογόνου να παρέχουν περισσότερο από το ένα δέκατο των παγκόσμιων αναγκών θέρμανσης, κυρίως σε περιπτώσεις φιλόδοξων κλιματικών πολιτικών.

Γράφημα 7-5: Ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας από νοικοκυριά κατά κεφαλή στις περιοχές του μοντέλου σε kWh ανά κάτοικο. Οι διακεκομμένες γραμμές αναπαριστούν τα 5% και 95% εκατοστημόρια της κατανομής των αποτελεσμάτων όπως προέκυψαν από το σεναρίου αναφοράς με το μοντέλο



Πίνακας 7-7: Στοχαστικές προβολές του μοντέλου για τα ποσοστά των ενεργειακών τεχνολογιών στην παγκόσμια ωφέλιμη ζήτηση ενέργειας για οικιακή θέρμανση το 2030 και το 2050

	2030						2050					
	natural gas	oil	coal	electric resistance heating	heat-pumps	fuel-cells	natural gas	oil	coal	electric resistance heating	heat-pumps	fuel-cells
Mean	55.5	22.2	5.4	15.5	1.5	0.0	51.6	17.0	3.4	19.8	4.7	3.6
Median	55.4	22.1	5.9	15.1	1.3	0.0	53.9	17.0	3.7	19.4	3.1	1.4
lower 5%	49.4	16.7	1.4	11.1	1.0	0.0	32.4	11.0	0.1	11.8	1.5	0.6
upper 5%	62.3	28.5	8.6	21.4	2.5	0.0	65.3	23.4	6.7	28.9	12.8	16.4
Std. Dev.	3.9	3.5	2.3	3.1	0.5	0.0	10.2	3.8	2.2	5.3	3.7	5.9
<i>share in 2005</i>	45.9	36.9	6.0	10.9	0.3	0.0	45.9	36.9	6.0	10.9	0.3	0.0
<i>probability to exceed 2005 share</i>	99.6	0.0	47.4	95.9	100.0	100.0	74.6	0.0	10.1	97.4	100.0	100.0

7.3.3 Κατανάλωση ενέργειας για μεταφορές

Ο τομέα των μεταφορών είναι ιδιαίτερα σημαντικός για την εξέλιξη του ενεργειακού συστήματος σε παγκόσμιο επίπεδο. Ο αριθμός οχημάτων, τόσο ιδιωτικών επιβατικών όσο και των εμπορικών, προβλέπεται να αυξηθεί σταθερά σε όλες τις περιοχές του μοντέλου και η συνέχιση αυτού του φαινομένου μπορεί να οδηγήσει σε σοβαρά προβλήματα βιωσιμότητας από την άποψη των ρύπων, της εξάντλησης των πόρων (πχ κοιτάσματα πετρελαίου) και της κυκλοφοριακής συμφόρησης σε πόλεις με υπερπληθυσμό χωρίς τις κατάλληλες υποδομές. Η μελέτη των αβεβαιοτήτων που περιβάλλουν τη μακροπρόθεσμη εξέλιξη του στόλου των επιβατικών αυτοκινήτων επικεντρώνεται σε δύο βασικά ζητήματα:

- Τα επίπεδα κορεσμού στα ποσοστά ιδιοκτησίας αυτοκινήτων στις ανεπτυγμένες περιοχές του ΟΟΣΑ (ΕΕ, Βόρεια Αμερική, Ιαπωνία)
- Η δυναμική της αύξησης των επιβατικών μεταφορών που συνοδεύει την βελτίωση του βιοτικού επιπέδου και την αύξηση του ΑΕΠ στις αναπτυσσόμενες περιοχές

Το σενάριο αναφοράς προβλέπει ότι το παγκόσμιο απόθεμα αυτοκινήτων θα αυξηθεί κατά 3.1% ετησίως κατά μέσο όρο την περίοδο 2010-2050. Η ιδιοκτησία επιβατικών οχημάτων ανά κάτοικο έχει πιθανότητα 58% να υπέρ-τριπλασιαστεί μεταξύ 2000 και 2050 (σε παγκόσμιο επίπεδο), ενώ ο ετήσιος ρυθμός αύξησης της έχει πιθανότητα 43% να υπερβεί το 2.5%. Η πιθανότητα ο αριθμός των επιβατικών αυτοκινήτων να υπέρ-τριπλασιαστεί μεταξύ 2010 και 2050 εκτιμάται σε 98%, ενώ η πιθανότητα να αυξηθεί περισσότερο από 4 φορές είναι 28%. Η ανάλυση υποδηλώνει τεράστια δυνατότητα αύξησης της παγκόσμιας αγοράς αυτοκινήτων με υψηλό βαθμό βεβαιότητας. Μέχρι το 2030, η πιθανότητα ότι περισσότερα από το 50% των επιβατικών οχημάτων θα βρίσκονται στις αναπτυσσόμενες χώρες είναι 75%.

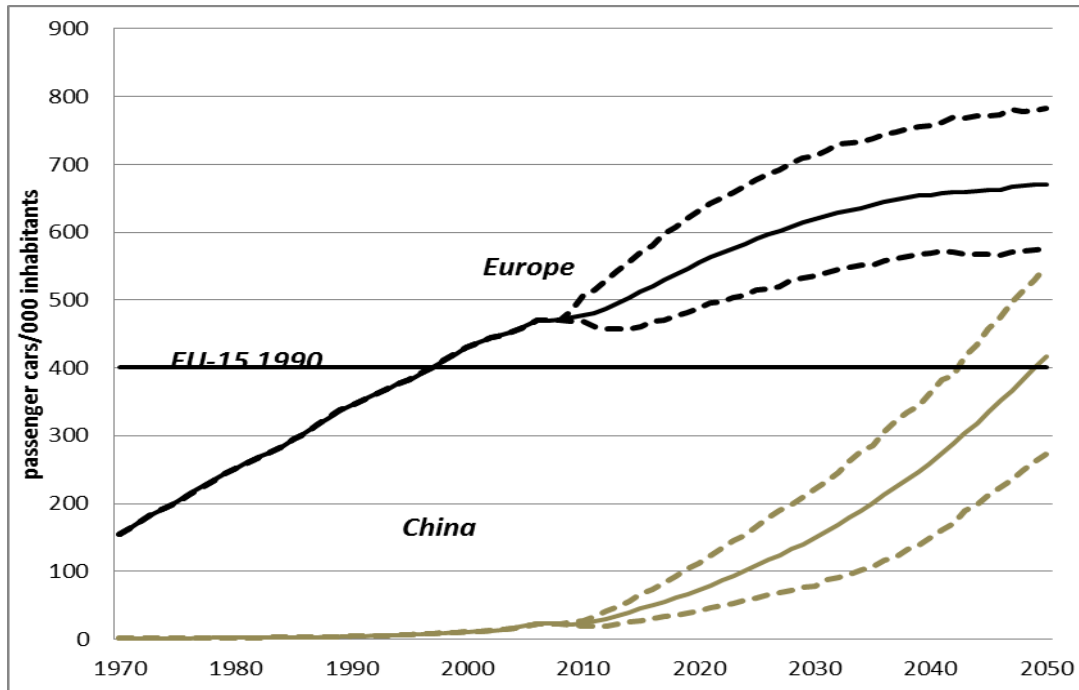
Η ενεργειακή κατανάλωση για μεταφορές εκτός από τον αριθμό των οχημάτων εξαρτάται και από άλλους παράγοντες, οι οποίοι λαμβάνονται άμεσα ή έμμεσα υπόψη στις στοχαστικές προβολές. Καθώς αυξάνεται η ιδιοκτησία των αυτοκινήτων ανά κάτοικο, υπάρχει μια γενική τάση μείωσης των ποσοστών χρησιμοποίησής τους. Από

την άλλη πλευρά, το ποσοστό αστικής οδήγησης σε συνθήκες συμφόρησης αυξάνεται σημαντικά εξαιτίας της αστικοποίησης. Το μέσο μέγεθος των οχημάτων έχει μια ελαφρά αυξητική τάση καθώς τα εισοδήματα αυξάνονται. Η ενεργειακή απόδοση των οχημάτων προβλέπεται να αυξηθεί ιδιαίτερα στις περιοχές που εφαρμόζουν πρότυπα ενεργειακής απόδοσης και εκπομπών άνθρακα (πχ Ε.Ε., Η.Π.Α.). Η προβλεπόμενη αύξηση της διεθνούς τιμής των πετρελαϊκών προϊόντων παράλληλα με την κατάργηση των ενεργειακών επιδοτήσεων σε μεγάλο μέρος των αναπτυσσόμενων οικονομιών θα οδηγήσει σε μείωση της μέσης χρησιμοποίησης των οχημάτων. Το καθαρό αποτέλεσμα του συνόλου των παραπάνω παραγόντων είναι ότι υπάρχει 70% πιθανότητα ότι η παγκόσμια κατανάλωση πετρελαίου για οδικές μεταφορές θα υπερδιπλασιαστεί την περίοδο 2010-2050. Ωστόσο, υπάρχει μια (σχετικά μικρή) πιθανότητα 5% μείωσης της κατανάλωσης πετρελαίου σε σχέση με τα επίπεδα του 2010, η οποία σχετίζεται με περιπτώσεις φιλόδοξης πολιτικής για το κλίμα και ραγδαίων τεχνολογικών εξελίξεων για τα μη-συμβατικά καύσιμα (πχ ηλεκτρισμός, υδρογόνο).

Τα πιο έντονα σημάδια κορεσμού στις μεταφορών εμφανίζονται στις Η.Π.Α. και στον Δυτικό Ειρηνικό. Η στοχαστική προβολή συνεπάγεται μια σταδιακή επιβράδυνση της ετήσιας αύξησης της ιδιοκτησίας αυτοκινήτων ανά κάτοικο από 1.2% την περίοδο 1970-2010 σε 0.95% ετησίως την περίοδο 2010-2050. Υπάρχει επίσης πιθανότητα 63% ότι η κατανάλωση πετρελαίου για τις μεταφορές θα μειωθεί μακροπρόθεσμα, εξαιτίας της βελτίωσης της ενεργειακής απόδοσης, της διείσδυσης των υβριδικών αυτοκινήτων και της σταδιακής εισαγωγής plug-in υβριδικών, ηλεκτρικών και αυτοκινήτων με κυψέλες υδρογόνου. Η ιδιοκτησία των επιβατικών αυτοκινήτων ανά κάτοικο στην Ευρώπη έχει αυξηθεί με έντονο ρυθμό (3% ετησίως) την περίοδο 1970-2008, αν και με έντονα σημάδια κορεσμού στα πιο πρόσφατα έτη: την περίοδο 1995-2010 ο μέσος ετήσιος ρυθμός αύξησης ήταν 1.2%. Φαινόμενα κορεσμού είναι ιδιαίτερα πιθανό να εμφανιστούν, καθώς ο μέσος ετήσιος ρυθμός αύξησης μειώνεται σε 0.83% την περίοδο 2010-2050. Από την άλλη πλευρά, υπάρχει πιθανότητα 86% ότι η κατανάλωση πετρελαίου θα μειωθεί μακροπρόθεσμα; αυτή η πιθανότητα είναι μεγαλύτερη σε σύγκριση με το υπόλοιπο του ΟΟΣΑ εξαιτίας της υψηλότερης έντασης των κλιματικών πολιτικών και της εισαγωγής των προτύπων εκπομπών άνθρακα στα αυτοκίνητα.

Ο αναπτυσσόμενος κόσμος βιώνει μια απογείωση στην ιδιοκτησία επιβατικών αυτοκινήτων παράλληλα με την άνοδο των εισοδημάτων και του βιοτικού επιπέδου. Παρ' όλα αυτά, η πιθανότητα ότι τα ποσοστά ιδιοκτησίας αυτοκινήτων στις αναπτυσσόμενες περιοχές θα φθάσουν στα σημερινά Ευρωπαϊκά επίπεδα το 2050 είναι μηδενική. Το στοχαστικό σενάριο αναφοράς προβλέπει σημαντικές διαφορές μεταξύ των αναπτυσσόμενων περιοχών, εξαιτίας διαφορών στο κατά κεφαλήν εισόδημα και στο χρονοδιάγραμμα των διαφόρων φάσεων ανάπτυξης της μηχανοκίνησης, π.χ. η Κίνα το 2050 έχει πιθανότητα 58% να υπερβεί το επίπεδο της ΕΕ-15 το 1990 (Γράφημα 7-6) ενώ η αντίστοιχη πιθανότητα για την Ινδία εκτιμάται σε μόλις 4%. Η αύξηση της δραστηριότητας των μεταφορών βασίζεται κυρίως στο πετρέλαιο και συνεπώς η πιθανότητα ότι η κατανάλωση πετρελαίου θα αυξηθεί περισσότερο από τέσσερις φορές σε σύγκριση με τα επίπεδα του 2010 είναι 63%

Γράφημα 7-6: Στοχαστικές προβολές του μοντέλου για το ποσοστό ιδιοκτησίας αυτοκινήτων ανά χίλιους κατοίκους στην Ευρώπη και στην Κίνα (οι διακεκομμένες γραμμές αναπαριστούν τα άνω και κάτω 5% εκατοστημόρια της κατανομής των αποτελεσμάτων του μοντέλου)



Τα αυτοκίνητα με κινητήρες ντίζελ είναι σήμερα η πιο οικονομικά αποδοτική επιλογή ειδικά όταν χρησιμοποιείται σαν σημείο αναφοράς κόστους σχετικά μεγάλη ετήσια απόσταση (15.000 χιλιόμετρα ετησίως). Αυτό το πλεονέκτημα κόστους εξηγεί σε μεγάλο βαθμό τη σταδιακή «νηζελοποίηση» του Ευρωπαϊκού στόλου οχημάτων. Ωστόσο, το πλεονέκτημα σταδιακά διαβρώνεται εξαιτίας της φορολογίας, της αύξησης των διεθνών τιμών πετρελαίου και των βελτιώσεων στο κόστος και στην απόδοση των εναλλακτικών τεχνολογιών (μπαταρίες, ηλεκτρικά αυτοκίνητα, κυψέλες υδρογόνου).

Η μεταμόρφωση των οδικών μεταφορών είναι πιθανό να ξεκινήσει από την ΕΕ, όπου το 2030 υπάρχει πιθανότητα 40% ότι τα μη συμβατικά αυτοκίνητα θα αποτελούν περισσότερο από το 50% του στόλου. Μακροπρόθεσμα, τα plug-in υβριδικά οχήματα αποτελούν τη κύρια δύναμη για ανάπτυξη των κατάλληλων υποδομών επαναφόρτισης μπαταριών ανοίγοντας το δρόμο για τη διείσδυση των ηλεκτρικών αυτοκινήτων. Μετά το 2040, υπάρχει αυξημένη πιθανότητα για ταχεία μετατροπή του τομέα των οδικών μεταφορών κυρίως εξαιτίας της ραγδαίας αύξησης στις πωλήσεις ηλεκτρικών αυτοκινήτων και οχημάτων με κυψέλες υδρογόνου. Οι χρονικές υστερήσεις στην ανανέωση του στόλου των αυτοκινήτων σημαίνουν ότι η αύξηση των μη συμβατικών τεχνολογιών στις νέες ταξινομήσεις θα χρειαστεί χρόνο για να μεταφραστεί σε μετασχηματισμό του συνολικού στόλου, π.χ. τα ηλεκτρικά οχήματα αντιπροσωπεύουν κατά μέσο όρο το 20% των νέων εγγραφών μεταξύ 2030 και 2040, αλλά το μέσο ποσοστό τους στον στόλο των επιβατικών οχημάτων είναι μόλις 5% το 2040. Η διαδικασία μετασχηματισμού του τομέα των οδικών μεταφορών στις υπόλοιπες

αναπτυγμένες οικονομίες είναι παρόμοια με την Ευρώπη, ενώ στις αναπτυσσόμενες υπάρχει ιδιαίτερα μεγάλη αβεβαιότητα για τη διείδυση εναλλακτικών καυσίμων.

Τα αποτελέσματα του μοντέλου δείχνουν ότι υπάρχει μεγάλη πιθανότητα ο τομέας των οδικών μεταφορών να αποτελέσει το βασικό σημείο εισόδου για μια ενδεχόμενη μεγάλη κλίμακας εισαγωγή των κυψελών καυσίμου που οδηγεί σε ένα σύστημα ενέργειας με βάση το υδρογόνο («οικονομία του υδρογόνου»). Οι κυψέλες υδρογόνου χαρακτηρίζονται από υψηλό ρίσκο αλλά και υψηλές προοπτικές. Η ανάλυση δείχνει ότι η διείδυση του υδρογόνου στο παγκόσμιο στόλο αυτοκινήτων περιορίζεται όχι από το κόστος παραγωγής, μεταφοράς και διανομής του υδρογόνου, αλλά από το υψηλό κόστος των κυψελών υδρογόνου. Η πιθανότητα ο αριθμός των μη-συμβατικών να υπερβαίνει τα συμβατικά πετρελαιοκίνητα το 2050 είναι 45%; η πιθανότητα ότι το μερίδιό τους θα είναι μικρότερο από 40% εκτιμάται σε μόλις 7%, ενώ η πιθανότητα να είναι υψηλότερο από 67% είναι 22%. Η κατανομή έχει δύο ευδιάκριτες κορυφές (binomial distribution), οι οποίες αντιστοιχούν με τις πιθανότητες συντονισμένης κλιματικής δράσης, που οδηγούν σε μεταμόρφωση των οδικών μεταφορών εξαιτίας, της υψηλής τιμής άνθρακα, των επενδύσεων σε R&D για τεχνολογίες χαμηλών εκπομπών και της ανάπτυξης των απαραίτητων υποδομών.

7.4 Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας στο σενάριο αναφοράς

Ο τομέας της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας αναμένεται να διαδραματίσει σημαντικό ρόλο στην εξέλιξη των ενεργειακών στρατηγικών και των πολιτικών μετριασμού της κλιματικής αλλαγής. Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας θα συνεχίσει να αυξάνεται κατά μέσο όρο (Πίνακας 7-8) κυρίως εξαιτίας αύξησης της οικονομικής δραστηριότητας, της αύξησης ιδιοκτησίας ηλεκτρικών συσκευών στις αναπτυσσόμενες περιοχές, της αύξησης του ποσοστού του ηλεκτρισμού στην βιομηχανική ζήτηση και του σταδιακού εξηλεκτρισμού του τομέα των μεταφορών μετά το 2030. Η υψηλή μέση αύξηση της παγκόσμιας ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας προκύπτει επίσης από την σχετική ανθεκτικότητα του κόστους του ηλεκτρισμού στην αύξηση της διεθνούς τιμής των ορυκτών καυσίμων, εξαιτίας της υψηλής έντασης κεφαλαίου που χαρακτηρίζει τον τομέα της ηλεκτροπαραγωγής και της υψηλής πιθανότητας εκτεταμένης διείδυσης τεχνολογιών χαμηλού και μηδενικού άνθρακα, οι οποίες παίζουν καθοριστικό ρόλο στην απορρόφηση των οικονομικών επιπτώσεων των κλιματικών πολιτικών.

Αντίθετα, την περίοδο 2030-2050 προβάλλεται επιβράδυνση (κατά μέσο όρο) του ρυθμού αύξησης της ηλεκτροπαραγωγής σε παγκόσμιο επίπεδο, εξαιτίας κυρίως των χαμηλότερων ρυθμών οικονομικής ανάπτυξης και της αύξησης της ενεργειακής αποδοτικότητας: η πιθανότητα ότι η αύξηση της παγκόσμιας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας θα είναι υψηλότερη την περίοδο 2030-2050 σε σύγκριση με 2010-2030 εκτιμάται σε μόλις 16%. Υψηλές πιθανότητες υπέρβασης της περιόδου 2010-2030 υπάρχουν στις περιοχές της Ευρωπαϊκής Ένωσης και της Β. Αμερικής εξαιτίας της αυξημένης πιθανότητας για εκτεταμένη διείδυση των ηλεκτρικών οχημάτων.

Πίνακας 7-8: Στατιστικά στοιχεία για την μέση αύξηση της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας ανά περιοχή με βάση τα στοχαστικά αποτελέσματα του μοντέλου (σε %)

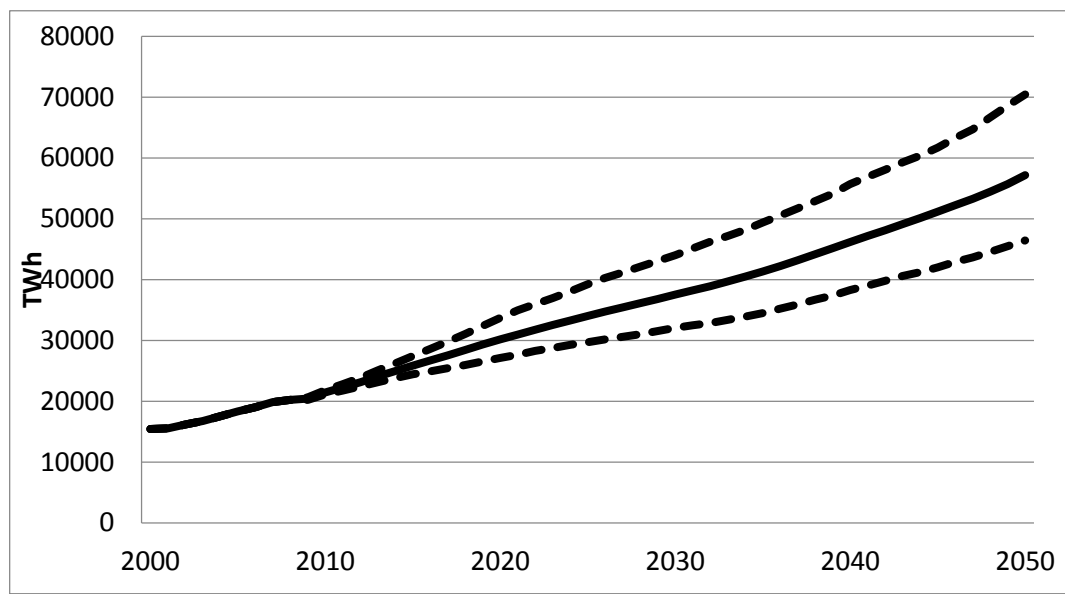
2008 to 2030										
	European Union	NOAM	WPAC	CHN	IND	CIS	MENA	"EMRG"	"poor"	WORLD
Mean	0.87	1.38	0.86	4.39	6.01	1.31	4.68	3.95	5.46	2.99
Median	0.85	1.36	0.85	4.35	5.98	1.07	4.68	3.96	5.42	2.98
lower 5%	0.24	0.39	-0.21	2.80	4.88	-0.50	3.70	2.54	4.31	2.25
uper 5%	1.59	2.42	1.96	6.19	7.22	3.91	5.68	5.41	6.69	3.77
Std. Dev.	0.42	0.62	0.66	1.01	0.73	1.40	0.60	0.88	0.73	0.46
<i>historical growth (1980-2008)</i>	1.96	1.99	3.46	9.00	7.13	0.31	7.47	5.07	4.78	3.29
<i>probability to exceed historical growth</i>	1.0	16.8	0.0	0.0	6.2	76.7	0.0	9.8	82.1	24.3
2030 to 2050										
	European Union	NOAM	WPAC	CHN	IND	CIS	MENA	"EMRG"	"poor"	WORLD
Mean	0.97	1.55	0.59	1.40	4.77	-0.05	2.44	2.24	5.36	2.16
Median	0.96	1.55	0.59	1.37	4.72	-0.06	2.45	2.23	5.34	2.15
lower 5%	0.15	0.35	-0.77	-0.24	3.22	-1.55	1.11	0.37	3.94	1.19
uper 5%	1.84	2.80	1.89	3.11	6.48	1.46	3.67	4.16	6.90	3.17
Std. Dev.	0.51	0.75	0.81	1.02	0.98	0.93	0.79	1.15	0.90	0.59
<i>historical growth (1980-2008)</i>	1.96	1.99	3.46	9.00	7.13	0.31	7.47	5.07	4.78	3.29
<i>probability to exceed historical growth</i>	2.4	28.3	0.0	0.0	1.5	35.6	0.0	0.8	74.2	3.7

Μετά το 2030, η τυπική απόκλιση της παραγωγής ηλεκτρισμού αυξάνεται, εξαιτίας της συσσώρευσης των αβεβαιοτήτων και των εγγενών αβεβαιοτήτων που περιβάλλουν πιθανούς μετασχηματισμούς ενεργειακού συστήματος μακροπρόθεσμα (π.χ. εξηλεκτρισμός των μεταφορών), της τεχνικής προόδου και της αυξημένης έντασης των κλιματικών πολιτικών. Κατά την διάρκεια της περιόδου 2010-2050, η παγκόσμια ηλεκτροπαραγωγή αναμένεται να αυξηθεί κατά ένα συντελεστή 3.7 κατά μέσο όρο (Γράφημα 7-7), ενώ υπάρχει πιθανότητα 23% ότι η παραγωγή ηλεκτρισμού θα αυξηθεί περισσότερο από 4 φορές μεταξύ 2000 και 2050.

Το μελλοντικό μίγμα των τεχνολογιών παραγωγής ηλεκτρισμού έχει μεγάλη πιθανότητα να είναι περισσότερο διαφοροποιημένο σε σύγκριση με το 2010 (Πίνακας 7-9) καθώς οι ΑΠΕ αναμένεται να διεισδύσουν μαζικά στην ηλεκτροπαραγωγή, ενώ ορισμένες μη διαθέσιμες ή τεχνολογικά ανώριμα επιλογές θα εισαχθούν μέχρι το 2050 (CCS, ηλιακά θερμικά, υδρογόνο). Ο άνθρακας αποτελεί σήμερα το κυρίαρχο καύσιμο για την παγκόσμια ηλεκτροπαραγωγή. Μακροπρόθεσμα ωστόσο το μερίδιό του προβλέπεται να μειωθεί, κυρίως λόγω της εισαγωγής κλιματικών πολιτικών. Τα εργοστάσια που χρησιμοποιούν καύση σε υπερ-κρίσιμη θερμοκρασία (PFC) βρίσκονται ήδη σε χρήση, ενώ η τεχνολογία ενσωματωμένης αεριοποίησης άνθρακα (ICG) θα είναι επίσης διαθέσιμη μεσοπρόθεσμα. Οι δυο αυτές χαρακτηρίζονται από υψηλότερο

κόστος κεφαλαίου αλλά μεγαλύτερη αποδοτικότητα σε σύγκριση με τις συμβατικές θερμικές τεχνολογίες. Το 2030, η τεχνολογία PFC έχει πιθανότητα 63% να έχει μεγαλύτερο μερίδιο σε σύγκριση με συμβατικά εργοστάσια άνθρακα, ενώ το ποσοστό της τεχνολογίας ICG αυξάνεται κατά μέσο όρο μέχρι το 2050. Οι τεχνολογίες CCS με άνθρακα καλύπτουν κατά μέσο όρο το 6% της παγκόσμιας ηλεκτροπαραγωγής το 2050, ενώ υπάρχει πιθανότητα 25% να υπερβούν την παραγωγή από άνθρακα χωρίς CCS. Η υψηλή αβεβαιότητα σχετικά με την διείσδυση των τεχνολογιών CCS προέρχεται από την αβεβαιότητα που περιβάλλει την ένταση της κλιματικής πολιτικής, αλλά και της δημόσιας αποδοχής της υπόγειας αποθήκευσης διοξειδίου του άνθρακα.

Γράφημα 7-7: Εξέλιξη της παγκόσμιας παραγωγής ηλεκτρισμού σε TWh με βάση στοχαστική ανάλυση (οι διακεκομμένες γραμμές αναπαριστούν άνω και κάτω 5% εκατοστημόρια κατανομής)



Το φυσικό αέριο προβλέπεται να είναι η πιο σημαντική μεσοπρόθεσμη επιλογή για την κάλυψη της αυξανόμενης ζήτησης ηλεκτρισμού καθώς το 2030 υπάρχει πιθανότητα 95% να έχει μεγαλύτερο μερίδιο σε σύγκριση με το 2000. Το 2030 υπάρχει πιθανότητα 29% ότι η ηλεκτροπαραγωγή από φυσικό αέριο θα υπερβεί την παραγωγή από άνθρακα, ενώ η αντίστοιχη πιθανότητα είναι 61% για το 2050. Η τεχνολογία συνδυασμένου κύκλου, που είναι σήμερα η κυρίαρχη επιλογή, έχει υψηλή πιθανότητα να παραμείνει μια βασική τεχνολογία ηλεκτροπαραγωγής. Η τεχνολογία συνδυασμένου κύκλου με CCS εισέρχεται μετά το 2030, ειδικά στις περιπτώσεις υψηλών τιμών του άνθρακα (υπάρχει πιθανότητα 23% ότι η ηλεκτροπαραγωγή από συνδυασμένο κύκλο με CCS θα υπερβεί την αντίστοιχη χωρίς CCS το 2050).

Το μέσο ποσοστό της πυρηνικής ενέργειας προβλέπεται να παραμείνει σχεδόν σταθερό κατά την περίοδο 2010-2050 αλλά η εξέλιξη των επενδυτικών προτύπων για τα καινούργια εργοστάσια πυρηνικής ενέργειας είναι πολύ διαφορετική ανάμεσα στις περιοχές του μοντέλου. Η Κίνα σχεδιάζει εκτεταμένες επενδύσεις στον πυρηνικό τομέα και μέχρι το 2050 το 21% κατά μέσο όρο της παγκόσμιας παραγωγής πυρηνικής

ενέργειας θα γίνεται στην Κίνα, ενώ η Ινδία θα καλύπτει κατά μέσο όρο το 18% της συνολικής της ζήτησης ηλεκτρισμού με πυρηνικά εργοστάσια το 2050. Από την άλλη πλευρά, στην Ευρώπη αναμένεται μια σχετική σταθεροποίηση της πυρηνικής ενέργειας στα τρέχοντα επίπεδα. Μακροπρόθεσμα, οι αντιδραστήρες 4^{ης} γενιάς εισάγονται στο σύστημα παραγωγής, αλλά μεγάλη αβεβαιότητα περιβάλλει τη διείσδυσή τους εξαιτίας κυρίως του αβέβαιου κεφαλαιουχικού κόστους. Το 2050, η παγκόσμια παραγωγή από πυρηνική ενέργεια έχει πιθανότητα 27% να υπερβεί την παραγωγή ηλεκτρισμού από άνθρακα και πιθανότητα 12% να υπερβεί την παραγωγή από αέριο και από άνθρακα.

Η στοχαστική προβολή του ΠΡΟΜΗΘΕΑ καταδεικνύει ότι οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ΑΠΕ) θα διαδραματίσουν σημαντικό ρόλο στον σταδιακό μετασχηματισμό του παγκόσμιου ενεργειακού συστήματος, καθώς το ποσοστό τους στην παγκόσμια ηλεκτροπαραγωγή έχει πιθανότητα 96% να αυξηθεί. Η παγκόσμια ηλεκτροπαραγωγή από ΑΠΕ το 2050 έχει πιθανότητα 60% να υπερβεί την παραγωγή από άνθρακα και 55% από φυσικό αέριο. Η υδροηλεκτρική ενέργεια παραμένει με ιδιαίτερα μεγάλη πιθανότητα η σημαντικότερη σε παραγωγή ΑΠΕ. Οι ανεμογεννήτριες χαρακτηρίζονται από ιδιαίτερα υψηλές προοπτικές επέκτασης και το μέσο ποσοστό τους στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας προβλέπεται να αυξηθεί από 0.2% το 2000 σε 5.5% το 2030 και 6.8% το 2050, κυρίως λόγω του σχετικά χαμηλού κόστους τους (σε σύγκριση με τις υπόλοιπες ΑΠΕ) και των υψηλών τεχνικών δυνατοτήτων τους σε αρκετές περιοχές. Οι υπεράκτιες ανεμογεννήτριες αναμένεται να αποτελέσουν μια οικονομικά αποδοτική εναλλακτική μετά το 2030 (ιδιαίτερα σε περιπτώσεις φιλόδοξης κλιματικής πολιτικής). Η Ευρώπη διαδραματίζει κρίσιμο ρόλο στην ανάπτυξη ανεμογεννητριών, καθώς είναι η πρώτη περιοχή όπου εισάγονται μαζικά στην με αποτέλεσμα την μείωση του κόστους κεφαλαίου. Κατά την περίοδο 2030-2050, η παγκόσμια ηλεκτροπαραγωγή από ηλιακή ενέργεια τετραπλασιάζεται κατά μέσο όρο εξαιτίας μεγάλης κλίμακας επενδύσεων σε φωτοβολταϊκά και ηλιακά θερμικά εργοστάσια. Παρά το γεγονός ότι η βιομάζα προβλέπεται να αυξήσει το μερίδιό της στην παγκόσμια παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, η αύξηση αυτή μετριάζεται από την σχετικά περιορισμένη δυναμικότητα της και τον ανταγωνισμό με την παραγωγή τροφίμων. Τέλος, οι κυψέλες υδρογόνου χρησιμοποιούνται για ηλεκτροπαραγωγή σε εφαρμογές μικρής και μεγάλης κλίμακας, αλλά το ποσοστό τους προβλέπεται να είναι ιδιαίτερα χαμηλό ακόμη και το 2050.

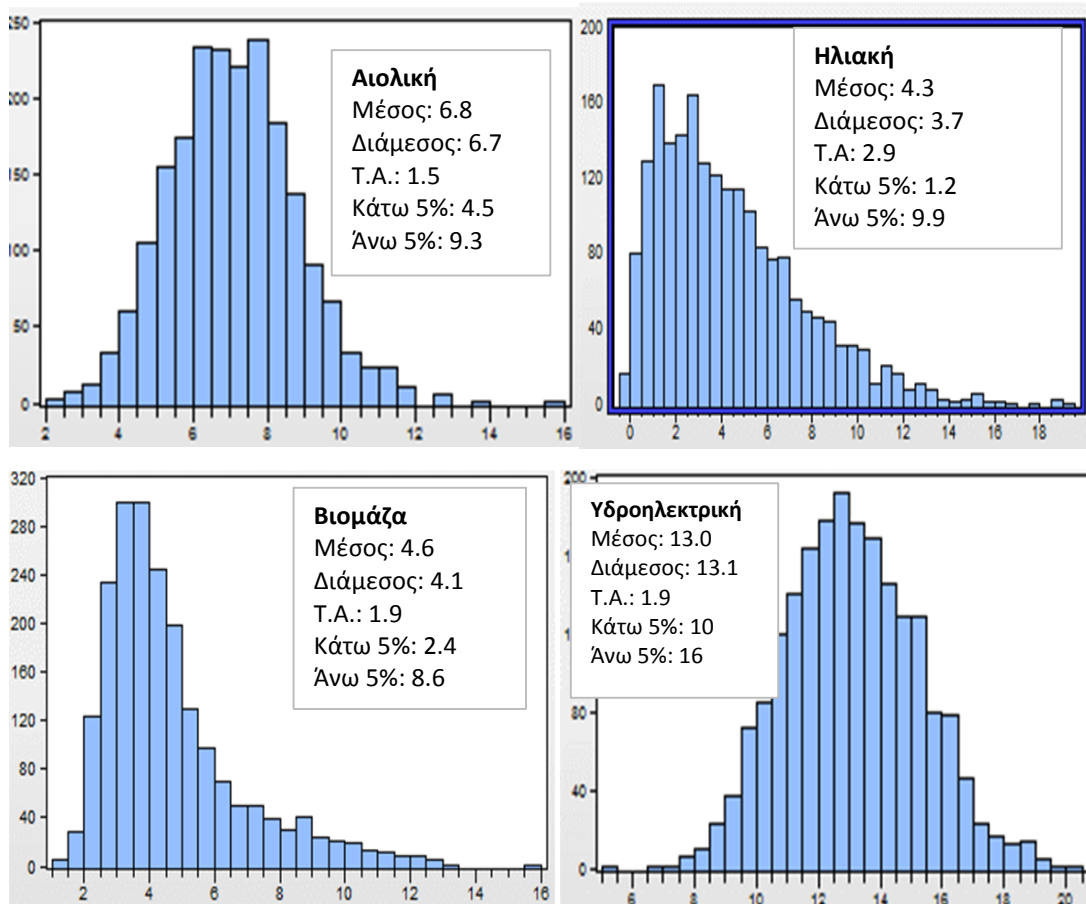
Πίνακας 7-9: Προεκτάσεις του μοντέλου για τα ποσοστά εναλλακτικών τεχνολογιών στην παγκόσμια παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας το 2030 και το 2050 (σε %)

	2030								
	coal	gas	oil	nuclear	biomass	hydro	wind	solar	fuelcells
Mean	31.8	26.5	1.5	15.0	2.7	14.8	5.5	2.2	0.0
Median	36.2	26.4	1.3	12.1	2.4	14.2	4.8	1.6	0.0
Std. Dev.	10.8	5.4	1.1	6.9	1.0	2.5	2.0	1.9	0.0
lower 5%	10.9	17.7	0.2	8.5	1.7	11.5	3.3	0.4	0.0
upper 5%	42.5	35.7	3.5	29.4	4.9	19.7	9.5	5.9	0.0
share in 2000	39.3	17.7	7.3	16.8	0.8	17.9	0.2	0.0	0.0
probability to exceed the share of 2000	22.1	95.2	0.0	26.7	100.0	14.2	100.0	100.0	100.0

2050									
	coal	gas	oil	nuclear	biomass	hydro	wind	solar	fuelcells
Mean	24.4	27.9	1.5	16.3	4.6	13.0	6.8	4.3	1.3
Median	25.6	27.6	0.6	15.5	4.1	13.1	6.7	3.7	0.4
Std. Dev.	7.1	8.3	1.9	6.2	1.9	1.9	1.5	2.9	1.8
lower 5%	12.1	15.1	0.0	7.6	2.4	10.0	4.5	0.9	0.2
upper 5%	34.6	42.7	5.6	27.9	8.6	16.1	9.3	9.9	5.5
share in 2000	39.3	17.7	7.3	16.8	0.8	17.9	0.2	0.0	0.0
probability to exceed the share of 2000	0.3	90.0	1.7	42.1	100.0	0.6	100.0	100.0	100.0

Τα ποσοστά της ηλιακής ενέργειας και των κυψελών υδρογόνου έχουν μεγαλύτερη αβεβαιότητα (υψηλότερο συντελεστή διακύμανσης) σε σύγκριση με τις υπόλοιπες τεχνολογίες παραγωγής ηλεκτρισμού, εξαιτίας κυρίως της υπερβολικής εξάρτησης του κόστους κεφαλαίου τους από τους μηχανισμούς τεχνολογικής προόδου, οι οποίοι χαρακτηρίζονται από μεγάλες εγγενείς αβεβαιότητες. Επιπλέον, η διείσδυση των ΑΠΕ καθορίζεται σε μεγάλο βαθμό από τις κλιματικές πολιτικές και από την αβεβαιότητα που τις περιβάλλει. Το Γράφημα 7-8 παρουσιάζει κατανομές πιθανοτήτων των αποτελεσμάτων του μοντέλου για τα ποσοστά ΑΠΕ στην παγκόσμια παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας το 2050. Οι κατανομές που προκύπτουν δεν λαμβάνουν προκαθορισμένη μορφή και το ενδιαφέρον αποτέλεσμα είναι ακριβώς η μορφή της κατανομής πιθανοτήτων που το μοντέλο παράγει για κάθε μέγεθος που προβάλλεται στοχαστικά στο μέλλον. Οι μορφές των κατανομών μπορούν να αξιολογηθούν ώστε να προκύψουν συμπεράσματα σχετικά με το εύρος και την δομή της αβεβαιότητας για κάθε προβολή στο μέλλον. Από το παραπάνω γράφημα προκύπτει ότι οι κατανομές του ποσοστού των νέων τεχνολογιών ΑΠΕ (αιολική, ηλιακή και βιομάζα) αποκλίνουν πολύ από την κανονική μορφή εξαιτίας της μεγάλης τους εξάρτησης από μεταβλητές με ιδιαίτερα μεγάλη διακύμανση που χαρακτηρίζονται από μη κανονικές κατανομές όπως οι κλιματικές πολιτικές (ο φόρος άνθρακα έχει δικόρυστη κατανομή) και το κόστος κεφαλαίου τους. Όσον αφορά το εύρος της αβεβαιότητας, παρατηρώ ότι η βιομάζα και οι ανεμογεννήτριες έχουν πολύ χαμηλότερους συντελεστές διακύμανσης σε σύγκριση με ηλιακή ενέργεια εξαιτίας της μικρότερης αβεβαιότητας για την εξέλιξη του κόστους τους αλλά και περιορισμών στην εκτεταμένη διείσδυσή τους (σχετικά περιορισμένη δυναμικότητα της αιολικής ενέργειας σε αρκετές περιοχές, ανταγωνισμός βιομάζας με άλλες γεωργικές χρήσεις και παραγωγή τροφής). Από την άλλη, η υδροηλεκτρική ενέργεια έχει τη χαμηλότερη διακύμανση (συντελεστής τυπικής απόκλισης προς μέση τιμή), εξαιτίας της εξάντλησης των δυνατοτήτων παραγωγής σε ορισμένες περιοχές, των χαμηλών ποσοστών παροπλισμού (scrapping) της εγκατεστημένης ισχύος και της μικρής αβεβαιότητας σχετικά με την εξέλιξη του κόστους της, καθώς είναι μια ώριμη τεχνολογία με μικρά περιθώρια επιπρόσθετης βελτίωσης.

Γράφημα 7-8: Κατανομές των αποτελεσμάτων του μοντέλου για τα ποσοστά των τεχνολογιών ΑΠΕ στην παγκόσμια ηλεκτροπαραγωγή το 2050 στο σενάριο αναφοράς (σε %)



Ο παρακάτω πίνακας παρουσιάζει συνοπτικά τους συντελεστές συσχέτισης μεταξύ της διεύθυνσης διαφόρων τεχνολογιών στην παγκόσμια ηλεκτροπαραγωγή και του φόρου στις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα το 2050. Υψηλές τιμές άνθρακα αυξάνουν την σχετική ανταγωνιστικότητα των ΑΠΕ σε σύγκριση με τεχνολογίες άνθρακα. Συνεπώς, τα στοχαστικά αποτελέσματα του μοντέλου οδηγούν σε έντονα αρνητική συσχέτιση μεταξύ του φόρου άνθρακα και ποσοστού τεχνολογιών άνθρακα (-0.9) ενώ αντίθετα υπάρχει θετική συσχέτιση με την διεύθυνση των ΑΠΕ. Τα ποσοστά των ΑΠΕ εμφανίζουν σχετικά υψηλή θετική συσχέτιση μεταξύ τους (0.41) εξαιτίας της κοινής εξάρτησης τους από τις κλιματικές πολιτικές. Από την άλλη πλευρά, οι τεχνολογίες ΑΠΕ έχουν αρνητική συσχέτιση με τις τεχνολογίες καύσης άνθρακα (μεταξύ -0.3 και -0.4) αφού σε περιπτώσεις όπου βελτιώνεται η ανταγωνιστικότητα των ΑΠΕ (πειράματα με υψηλές τιμές άνθρακα ή/και υψηλές διεθνείς τιμές υδρογονανθράκων) μειώνεται αντίστοιχα το ποσοστό των τεχνολογιών άνθρακα στο μίγμα ηλεκτροπαραγωγής.

	% αιολικής ενέργειας	% ηλιακής ενέργειας	% τεχνολογιών άνθρακα
Ποσοστό ηλιακής ενέργειας	0.41		
Ποσοστό άνθρακα	-0.29	-0.38	
Φόρος άνθρακα	0.26	0.38	-0.90

Πίνακας 7-10: Συντελεστής συσχέτισης μεταξύ των κατανομών των ποσοστών στην παγκόσμια ηλεκτροπαραγωγή το 2050 (%) όπως προέκυψαν από την στοχαστική ανάλυση του μοντέλου

7.5 Εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα στο σενάριο αναφοράς

Κατά την διάρκεια των τελευταίων δεκαετιών, η κλιματική αλλαγή και τα αποτελέσματά της για το περιβάλλον, την οικονομία και την κοινωνία αποτελούν ένα από τα σημαντικότερα προβλήματα σε παγκόσμιο επίπεδο [2, 178]. Κατά τη διάρκεια της περιόδου δέσμευσης του Κιότο (περίοδος 1997-2010), οι παγκόσμιες εκπομπές έχουν αυξηθεί κατά μέσο όρο κατά 2.2% ετησίως εξαιτίας της μη συμμετοχής των αναπτυσσόμενων χωρών και των χαμηλών επιδόσεων πολλών ανεπτυγμένων στην υλοποίηση δεσμευτικών νομοθεσιών μείωσης των εκπομπών. Στο 15^ο συνέδριο της UNFCCC, η πλειοψηφία των χωρών (που αντιπροσωπεύουν το 80% των σημερινών παγκόσμιων εκπομπών άνθρακα) υιοθέτησε δεσμεύσεις για την μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου μέχρι το 2020. Ωστόσο, η υλοποίηση των δεσμεύσεων δεν είναι υποχρεωτική, ενώ ακόμη και αν επιτευχθούν θα οδηγήσουν σε σχεδόν μηδενικές πιθανότητες διατήρησης της αύξησης της παγκόσμιας θερμοκρασίας σε ασφαλή επίπεδα (λιγότερο από 2°C σε σύγκριση με τα προ-βιομηχανικά επίπεδα) [7].

Στο στοχαστικό μοντέλο που αναπτύχθηκε, η έκταση της διεθνούς συνεργασίας και η ένταση των κλιματικών πολιτικών προβάλλονται πιθανολογικά με τη μέθοδο Delphi (αναλυτική περιγραφή στο κεφάλαιο 5). Το πρόβλημα της κλιματικής αλλαγής επιδεινώνεται εξαιτίας της αύξησης των ατμοσφαιρικών συγκεντρώσεων αερίων του θερμοκηπίου η οποία προκαλείται από την αύξηση του παγκόσμιου πληθυσμού, τις τάσεις αστικοποίησης, την οικονομική ανάπτυξη (ιδιαίτερα στις αναπτυσσόμενες οικονομίες) και από το χρησιμοποιούμενο ενεργειακό μίγμα που βασίζεται σε ποσοστό 80% στην καύση υδρογονανθράκων. Συνεπώς, η στοχαστική προβολή αναφοράς δίνει σχετικά χαμηλή (15%) πιθανότητα σταθεροποίησης των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα μεταξύ 2005 και 2050, ενώ η πιθανότητα ότι οι εκπομπές υπερδιπλασιάζονται κατά την ίδια περίοδο εκτιμάται σε 32% (Γράφημα 7-9). Η ανάλυση δείχνει ότι υπάρχει πιθανότητα 50% οι παγκόσμιες εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα από καύση ορυκτών καυσίμων να βρίσκονται στο εύρος μεταξύ 42.5 και 56.5 Gtn το 2050, ενώ ο διάμεσος της κατανομής αναμένεται να αυξηθεί από 28.5 Gtn το 2005 σε 51.6 Gtn το 2050. Για να τεθούν τα αποτελέσματα σε προοπτική, θα πρέπει να σημειωθεί ότι η μέση προβολή

του μοντέλου για την περίοδο 2010 με 2050 είναι ιδιαίτερα κοντά στα αποτελέσματα πρόσφατα δημοσιευμένων συγκριτικών μελετών, οι οποίες χρησιμοποιούν πλήθος μοντέλων ενέργειας-οικονομίας²⁷, όπως το σενάριο αναφοράς του EMF-27 [60] και το σενάριο μέτριας έντασης των πολιτικών μείωσης των εκπομπών του AMPERE [7].

Η υψηλή πιθανότητα συντονισμένης φιλόδοξης κλιματικής πολιτικής μετά το 2030 οδηγεί σε πιθανότητα 25% μείωσης των εκπομπών μεταξύ 2030 και 2050. Η κορυφή (μέγιστη τιμή) των παγκόσμιων εκπομπών CO₂ έχει πιθανότητα 20% να συμβεί πριν από το 2030 και 38% να συμβεί πριν από το 2040. Στα πρώτα χρόνια της προσομοίωσης, οι εκπομπές CO₂ σχετίζονται σε μεγάλο βαθμό με την αύξηση του ΑΕΠ (το 2020 ο βαθμός συσχέτισης τους είναι 0.6). Ωστόσο, μακροπρόθεσμα η ένταση της κλιματικής πολιτικής παίζει ιδιαίτερα σημαντικό ρόλο στην εξέλιξη των εκπομπών και ως αποτέλεσμα το 2050 η συσχέτισή των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα με το παγκόσμιο ΑΕΠ είναι μόλις 0.2, ενώ η αντίστοιχη συσχέτιση με την παγκόσμια μέση τιμή του άνθρακα είναι -0.84.

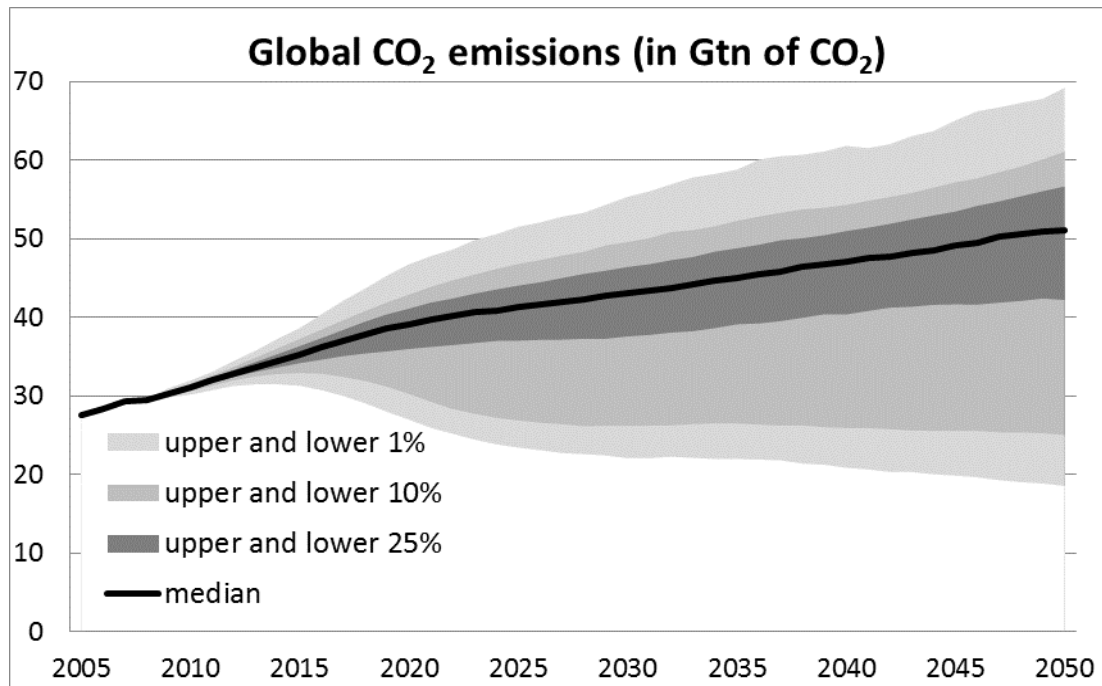
Όσον αφορά τις τάσεις ανά περιοχή, οι πιθανότητες οι εκπομπές CO₂ να υπερβούν τον ιστορικό ρυθμό αύξησης κατά την περίοδο 2005-2030 είναι αμελητέες για τις ανεπτυγμένες περιοχές και μόλις 19% για τις αναπτυσσόμενες. Από την άλλη πλευρά, η πιθανότητα είναι μεγαλύτερη σε παγκόσμιο επίπεδο (31%), αντανακλώντας την κυριαρχία των αναπτυσσόμενων χωρών που έχουν υψηλότερο δείκτη έντασης εκπομπών προς ΑΕΠ σε σύγκριση με τις αναπτυγμένες. Η πιθανότητα κλιματικής πολιτικής, η αύξηση της διείσδυσης τεχνολογιών χαμηλού άνθρακα και η εξοικονόμηση ενέργειας οδηγούν σε 91% πιθανότητα μείωσης των εκπομπών στον ΟΟΣΑ την περίοδο 2005-2050. Από την άλλη πλευρά, η πιθανότητα μείωσης στον αναπτυσσόμενο κόσμο είναι μηδενική, ενώ υπάρχει πιθανότητα 77% ότι οι εκπομπές θα υπερδιπλασιαστούν μεταξύ 2005 και 2050 (και 18% ότι θα υπερ-τριπλασιαστούν). Αντίθετα, την περίοδο 2030-2050 υπάρχει 49% πιθανότητα μείωσης των εκπομπών στην Κίνα, η οποία έχει σήμερα τις υψηλότερες εκπομπές CO₂ και έχει πιθανότητα 96% να παραμείνει μέχρι το 2050, ενώ οι εκπομπές της προβλέπεται να αυξηθούν κατά ένα συντελεστή 2.3 κατά μέσο όρο από το 2005. Οι εκπομπές CO₂ της Ινδίας έχουν πιθανότητα 75% να υπερ-τετραπλασιαστούν την περίοδο 2005-2050, ενώ υπάρχει πιθανότητα 4% να ξεπεράσουν τις εκπομπές της Κίνας το 2050. Στην CIS προβλέπεται μείωση των εκπομπών (με 81% πιθανότητα) εξαιτίας της μείωσης του πληθυσμού και της υψηλής πιθανότητας περιορισμού των ενεργειακών επιδοτήσεων.

Ο δείκτης έντασης άνθρακα της οικονομικής δραστηριότητας (σε tnCO₂ ανά € '08 PPP) αναμένεται να βελτιωθεί σε όλες τις περιοχές αν και σε διαφορετικούς ρυθμούς. Η ένταση άνθρακα των ανεπτυγμένων περιοχών θα συνεχίσει να βελτιώνεται με υψηλότερους ρυθμούς (κατά μέσο όρο) σε σύγκριση με την περίοδο 1980-2010 (πιθανότητα 73% να ξεπεράσει τον ιστορικό ρυθμό). Παρά την πιθανότητα κλιματικών

²⁷ Αυτές οι μελέτες χρησιμοποιούν ένα μεγάλο εύρος καθιερωμένων και ευρέως χρησιμοποιούμενων παγκόσμιων μοντέλων ενέργειας-οικονομίας ολοκληρωμένης αξιολόγησης (Integrated Assessment), όπως τα REMIND, POLES, WITCH, IMAGE, MESSAGE, GEM-E3, IMACLIM, and GCAM.

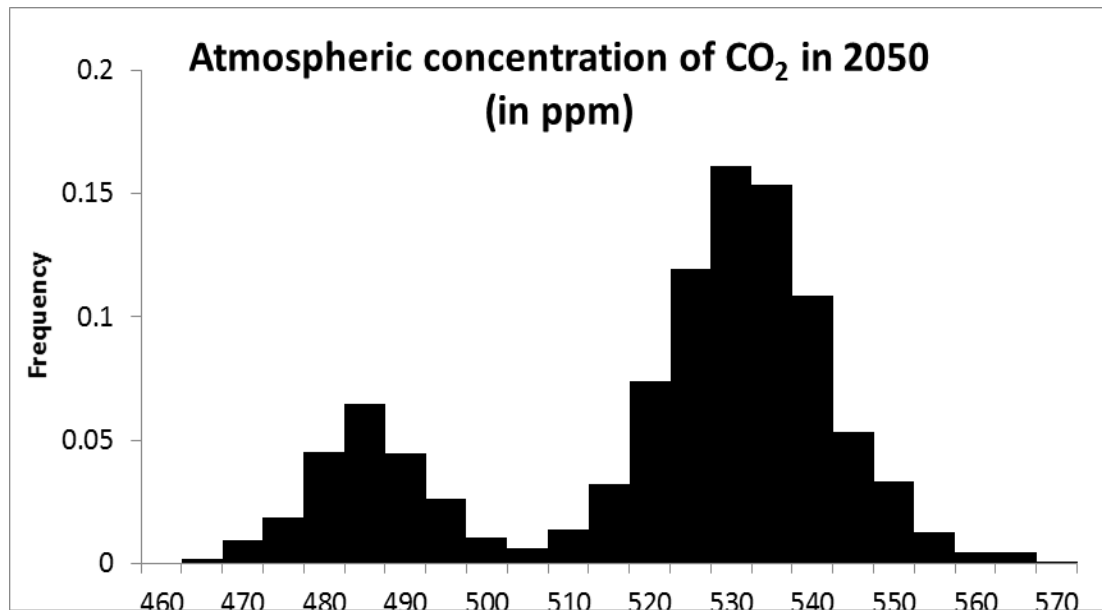
πολιτικών, η ένταση άνθρακα του ΑΕΠ σε παγκόσμιο επίπεδο έχει πιθανότητα μόλις 36% να βελτιώνεται ταχύτερα σε σύγκριση με την περίοδο 1980-2010, αντανakλώντας την αυξανόμενη σημασία των αναπτυσσόμενων χωρών, οι οποίες χαρακτηρίζονται από υψηλότερους δείκτες έντασης άνθρακα κατά μέσο όρο σε σχέση με τις ανεπτυγμένες.

Γράφημα 7-9: Στοχαστικές προβολές του μοντέλου για τις παγκόσμιες εκπομπές CO₂ την περίοδο 2010-2050 στο σενάριο αναφοράς



Ο ΠΡΟΜΗΘΕΑΣ περιέχει ένα στοχαστικό υπομοντέλο (σε συγκεντρωτική μη αναλυτική μορφή) για την αναπαράσταση της κλιματικής αλλαγής, που περιλαμβάνει εξισώσεις που συσχετίζουν τις εκπομπές και την συσσώρευση εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα με τις ατμοσφαιρικές συγκεντρώσεις. Το Γράφημα 7-10 παρουσιάζει την εμπειρική κατανομή των συγκεντρώσεων άνθρακα το 2050. Αυτή η κατανομή χαρακτηρίζεται από έντονα αρνητική συσχέτιση με τις παγκόσμιες τιμές του φόρου άνθρακα και είναι δικόρυφος “bimodal” (δηλαδή έχει δυο άνισες επικρατούσες τιμές), ένα χαρακτηριστικό που οφείλεται κυρίως στον τρόπο που οι πιθανότητες κλιματικής δράσης έχουν εισαχθεί: υπάρχει μια σαφής πιθανότητα παγκόσμιας φιλόδοξης δράσης, στην οποία η ένταση της κλιματικής πολιτικής αυξάνεται σημαντικά. Γενικά, υπάρχουν σχετικά μικρές πιθανότητες παγκόσμιας δράσης και συνεπώς η πιθανότητα ότι οι συγκεντρώσεις CO₂ θα παραμείνουν κάτω από τα 500 ppm το 2050 εκτιμάται σε μόλις 22%, ενώ η διάμεση τιμή της συγκέντρωσης προβλέπεται να είναι 526 ppm το 2050. Οι Schaeffer et al [179] χρησιμοποιούν το στοχαστικό κλιματολογικό μοντέλο MAGICC 6.0 για τον υπολογισμό των ατμοσφαιρικών συγκεντρώσεων άνθρακα με βάση τα αποτελέσματα των μοντέλων ενέργειας-οικονομίας του AMPERE. Η διάμεση τιμή των αποτελεσμάτων του στοχαστικού σεναρίου αναφοράς του ΠΡΟΜΗΘΕΑ είναι ιδιαίτερα κοντά στα αποτελέσματα του σεναρίου αναφοράς του AMPERE το 2050 (524 ppm).

Γράφημα 7-10: Στοχαστική προβολή του μοντέλου στο σενάριο αναφοράς για την κατανομή της ατμοσφαιρικής συγκέντρωσης CO₂ το 2050 (σε ppm)



7.6 Διεθνείς τιμές των καυσίμων στο σενάριο αναφοράς

Το στοχαστικό σενάριο του ΠΡΟΜΗΘΕΑ προβλέπει υψηλούς μέσους για τις διεθνείς τιμές πετρελαίου, φυσικού αερίου και άνθρακα²⁸ μέχρι το 2050, δηλαδή 112 € '08 ανά βαρέλι για το πετρέλαιο, 87 € '08 ανά boe (βαρέλι ισοδυνάμου πετρελαίου) για το φυσικό αέριο και 28 € '08 ανά boe για τον άνθρακα (Πίνακας 7-11). Η κύρια αιτία της συνεχούς αύξησης των διεθνών τιμών είναι οι υψηλοί ρυθμοί αύξησης του ΑΕΠ και η συνακόλουθη αύξηση της ζήτησης ενέργειας κυρίως στις αναπτυσσόμενες περιοχές σε συνδυασμό με την εξάντληση των συμβατικών κοιτασμάτων υδρογονανθράκων και το αυξημένο κόστος εξόρυξης των μη συμβατικών πηγών. Πρέπει να αναφερθεί ότι η στοχαστική προβολή περιέχει απαισιόδοξες υποθέσεις σχετικά με την εκμετάλλευση του μη συμβατικού αερίου, η οποία περιορίζεται στην Β. Αμερική. Μελετώντας την αβεβαιότητα στην εξέλιξη των τιμών, υπολογίζω τον λόγο των τυπικών αποκλίσεων προς τον μέσο (συντελεστής διακύμανσης) και προκύπτει ότι μακροπρόθεσμα η αβεβαιότητα είναι μεγαλύτερη, εξαιτίας της υψηλής αβεβαιότητας σχετικά με την εξέλιξη του παγκόσμιου ενεργειακού συστήματος (εξάντληση των κοιτασμάτων, βελτίωση κόστους τεχνολογιών χαμηλού άνθρακα, εισαγωγή μη διαθέσιμων προς το παρόν τεχνολογιών). Με βάση τα στοχαστικά αποτελέσματα του ΠΡΟΜΗΘΕΑ:

- Η πιθανότητα ότι η τιμή του πετρελαίου θα υπερβαίνει τα 100 € '08 ανά βαρέλι το 2050 είναι 51%; η πιθανότητα ότι η τιμή του πετρελαίου θα είναι μικρότερη από την μέση τιμή του 2008 εκτιμάται σε μόλις 23% το 2030 και 18% το 2050 .

²⁸ Στον ΠΡΟΜΗΘΕΑ, η τιμή αναφοράς για το πετρέλαιο είναι η παγκόσμια τιμή του Brent, για το φυσικό αέριο η μέση τιμή εισαγωγής στην Ευρωπαϊκή Ένωση (η οποία αποτελεί τον σταθμισμένο μέσο των τιμών των μακροχρόνιων συμβολαίων, των τιμών εισαγωγής με LNG και των τιμών spot στις Ευρωπαϊκές αγορές) και για τον άνθρακα η τιμή εισαγωγής στην Ευρώπη cif που περιλαμβάνει το κόστος και τον ναύλο (6000 kcal/tonne).

Κεφάλαιο 7

- Η πιθανότητα ότι η τιμή του φυσικού αερίου θα υπερβαίνει τα 100 € '08 ανά boe το 2050 είναι 29%, ενώ για το 2030 η πιθανότητα είναι μόνο 6%;
- Η πιθανότητα ότι η τιμή του άνθρακα είναι υψηλότερη από 20 € '08/boe το 2050 είναι 63% και υψηλότερη σε σύγκριση με το 2008 εκτιμάται σε 60%.

	2008			2030			2050		
	oil	gas	coal	oil	gas	coal	oil	gas	coal
Mean	66.5	44.0	21.1	94.5	62.6	22.7	111.7	86.9	28.3
Median				85.7	59.3	21.4	100.6	78.2	25.5
Std. Dev.				39.4	21.4	11.9	53.6	41.6	15.0
lower5%				49.1	34.4	5.5	47.4	37.6	7.7
upper 5%				175.1	102.6	47.8	215.6	169.3	62.9
<i>probability to be higher than 2008</i>				76.6%	81.8%	51.3%	82.2%	89.3%	60.2%
<i>probability to exceed 100 €/boe(*)</i>				33.3%	5.6%	56.1%	50.5%	29.3%	62.9%

* 100€/boe for oil and gas, 20€/boe for coal

Πίνακας 7-11: Στατιστικά στοιχεία για τις στοχαστικές προβολές του μοντέλου για τις διεθνείς τιμές των ορυκτών καυσίμων (σε € 08 ανά βαρέλι ισοδυνάμου πετρελαίου)

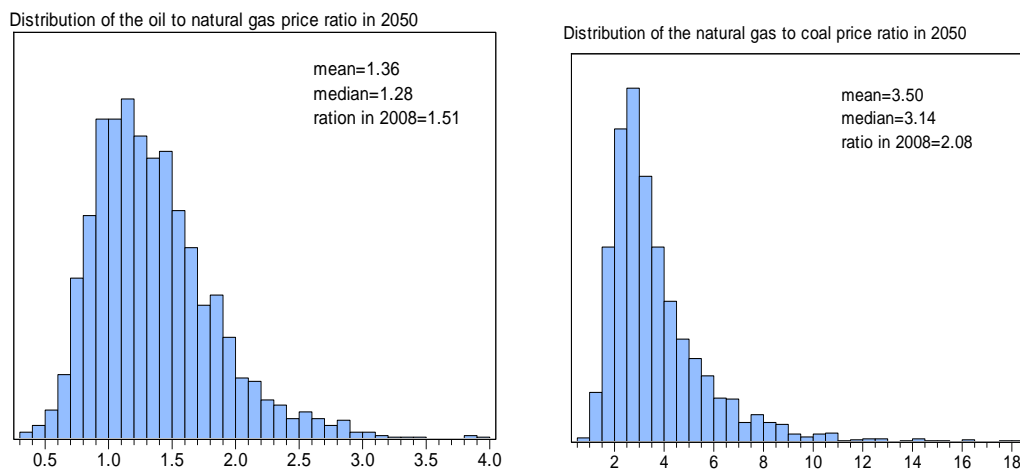
Οι βραχυπρόθεσμες προβλέψεις για την τιμή του φυσικού αερίου επηρεάζονται από την αυξανόμενη ζήτηση από την Ασία (ιδιαίτερα από την Κίνα και την Ιαπωνία μετά το πυρηνικό ατύχημα στη Φουκουσίμα), η οποία αντισταθμίζει την μειωμένη ζήτηση για εισαγωγές από τις Η.Π.Α. εξαιτίας της παραγωγής σχιστολιθικού αερίου. Το σενάριο υποθέτει περιορισμένη εκμετάλλευση του μη συμβατικού αερίου, αναπαριστώντας αργές τεχνολογικές βελτιώσεις στην υδραυλική ρωγμάτωση και στην οριζόντια γεώτρηση, αυστηρές περιβαλλοντικές ρυθμίσεις και χαμηλή δημόσια αποδοχή. Η πιθανότητα το φυσικό αέριο να είναι πιο ακριβό από το πετρέλαιο είναι 24% το 2050 (Γράφημα 7-11); ο λόγος της διεθνούς τιμής πετρελαίου προς φυσικό αέριο ήταν 1.61 μεταξύ 2000-2012 κατά μέσο όρο, ενώ στο σενάριο αναφοράς η μέση τιμή του λόγου προβλέπεται να μειωθεί στο 1.36 το 2050, εξαιτίας της μεγαλύτερης αύξησης της ζήτησης αερίου και της μη εκμετάλλευσης των μη συμβατικών κοιτασμάτων. Η πιθανότητα ότι ο λόγος της διεθνούς τιμής του πετρελαίου προς το φυσικό αέριο το 2050 θα υπερβεί την τιμή της περιόδου 2010-2012 (δηλαδή 1.61) είναι 25%. Όσον αφορά την αναλογία της τιμής του αερίου προς την τιμή του άνθρακα (η οποία είναι σημαντική για τις επενδύσεις στην ηλεκτροπαραγωγή), η πιθανότητα να υπερβεί την τρέχουσα τιμή εκτιμάται σε 71%, ενώ ο μέσος του λόγου των τιμών αυξάνεται από 2.37 την περίοδο 2010-2012 σε 3.50 το 2050, εξαιτίας κυρίως της εισαγωγής κλιματικών πολιτικών, οι οποίες επηρεάζουν πιο αρνητικά τον άνθρακα από το αέριο

Οι διεθνείς τιμές πετρελαίου και αερίου, όπως παρατηρείται τόσο στα ιστορικά δεδομένα όσο και στα αποτελέσματα του στοχαστικού μοντέλου, έχουν μεγάλο βαθμό συσχέτισης μεταξύ τους. Τα βασικά αίτια αυτής της συσχέτισης είναι:

- Τα ανεξερευνήτα συμβατικά κοιτάσματά τους έχουν θετική συσχέτιση, η οποία οφείλεται σε γεωλογικούς λόγους για το σχηματισμό των υδρογονανθράκων και τη διατήρησή τους σε ιζηματογενείς λεκάνες

- Οι προσθήκες στα συμβατικά αποθέματα έχουν έντονη συσχέτιση καθώς η εξερεύνηση για πετρέλαιο αυξάνει την πιθανότητα για ανακαλύψεις αερίου.
- Τα μακροχρόνια συμβόλαια εισαγωγής αερίου με τιμαριθμική αναπροσαρμογή της τιμής ως προς το πετρέλαιο (πχ τα συμβόλαια εισαγωγής στην ΕΕ από την Ρωσία). Οι παγκόσμιες αγορές πετρελαίου χρησιμοποιούνται συχνά σε τέτοιες συμβάσεις, επειδή είναι μεγαλύτερες σε σύγκριση με τις spot αγορές φυσικού αερίου (σε όρους διαπραγματεύσιμων όγκων) και έχουν μικρότερη γεωγραφική διαφοροποίηση.
- Το ποσοστό εξάντλησης του πετρελαίου και του φυσικού αερίου καθορίζεται κυρίως από την αύξηση της ζήτησης ενέργειας και από το μέγεθος των παγκόσμιων κοιτασμάτων. Δεδομένου ότι τα κοιτάσματα των υδρογονανθράκων μειώνονται (ιδιαίτερα μετά το 2040), οι διεθνείς τιμές των ορυκτών καυσίμων γίνονται όλο και πιο ευαίσθητες στις αλλαγές της παγκόσμιας ζήτησης ενέργειας και ως εκ τούτου στις διακυμάνσεις της οικονομικής δραστηριότητας.

Γράφημα 7-11: Κατανομή του λόγου των διεθνών τιμών ενέργειας (αριστερό σχήμα: πετρέλαιο προς αέριο, δεξιό: αέριο προς άνθρακα) όπως προέκυψαν από το στοχαστικό μοντέλο το 2050



Από την άλλη πλευρά, η συσχέτιση μεταξύ των τιμών του φυσικού αερίου και του άνθρακα οφείλεται κυρίως στον ανταγωνισμό τους στον τομέα της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, όπου οι τεχνολογίες που χρησιμοποιούν φυσικό αέριο και άνθρακα είναι οι πιο σημαντικές επιλογές για την κάλυψη της αυξανόμενης παγκόσμιας ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας. Ο Πίνακας 7-12 παρουσιάζει τους συντελεστές συσχέτισης των διεθνών τιμών των καυσίμων και του παγκόσμιου ΑΕΠ το 2050, ο οποίος προκύπτει από τον πίνακα διακύμανσης-συνδιακύμανσης των μεταβλητών. Η συσχέτιση του παγκόσμιου ΑΕΠ με τις διεθνείς τιμές των καυσίμων προβλέπεται να βρίσκεται μεταξύ 0.31 και 0.38 το 2050 κυρίως εξαιτίας της επίδρασης που έχει η αύξηση του ΑΕΠ στην αύξηση της παγκόσμιας ζήτησης ενέργειας και συνεπώς στην μεταβολή των διεθνών τιμών. Η στοχαστική ανάλυση με τον ΠΡΟΜΗΘΕΑ προβλέπει μεγαλύτερους συντελεστές συσχέτισης μεταξύ των τιμών πετρελαίου και φυσικού αερίου (0.68) και μεταξύ τιμών άνθρακα και αερίου (0.68). Επιπλέον, οι διεθνείς τιμές

πετρελαίου και άνθρακα συσχετίζονται θετικά μεταξύ τους (0.62), εξαιτίας της κοινής τους συσχέτισης με την τιμή του φυσικού αερίου, της εξάρτησής τους από την εξέλιξη της παγκόσμιας οικονομικής δραστηριότητας και του κόστους μεταφοράς άνθρακα το οποίο επηρεάζεται άμεσα από την διεθνή τιμή του πετρελαίου Brent.

Πίνακας 7-12: Πίνακας συσχέτισης μεταξύ των διεθνών τιμών των καυσίμων και του παγκόσμιου ΑΕΠ το 2050 όπως προκύπτουν από την στοχαστική ανάλυση του ΠΡΟΜΗΘΕΑ

	oil price	gas price	coal price	world GDP
oil price	1.00			
gas price	0.68	1.00		
coal price	0.62	0.68	1.00	
world GDP	0.31	0.38	0.36	1.00

Το σενάριο προβλέπει σημαντική αύξηση της παραγωγής πετρελαίου από μη συμβατικά κοιτάσματα κατά την περίοδο 2015-2050, η οποία προκαλείται από την βελτίωση των τεχνικών και οικονομικών χαρακτηριστικών της εξόρυξής τους, από την σχετική εξάντληση των συμβατικών πόρων και κυρίως από την αύξηση της διεθνούς τιμής του πετρελαίου, εξαιτίας της οποίας ολοένα μεγαλύτερη ποσότητα μη συμβατικών κοιτασμάτων καθίσταται εκμεταλλεύσιμη. Συνεπώς, το ποσοστό του μη συμβατικού πετρελαίου στην παγκόσμια παραγωγή αναμένεται να αυξηθεί ραγδαία από 3.3% το 2013 σε 22% το 2030 (κατά μέσο όρο) και 32% το 2050 (Πίνακας 7-13), ενώ υπάρχει πιθανότητα 11% ότι το ποσοστό του θα ξεπεράσει το 50% το 2050.

Από την άλλη πλευρά, το στοχαστικό σενάριο υποθέτει περιορισμένη παραγωγή από μη συμβατικά κοιτάσματα αερίου (με εξαίρεση την Β. Αμερική). Αυτό σημαίνει ότι το μερίδιο του στην παγκόσμια παραγωγή φυσικού αερίου αναμένεται να αυξηθεί από περίπου 10% το 2013 σε 13% το 2050 (κατά μέσο όρο), ενώ από την άλλη πλευρά στην Βόρεια Αμερική η παραγωγή σχιστολιθικού αερίου προβλέπεται να αντιπροσωπεύει το 60% (κατά μέσο όρο) της συνολικής παραγωγής αερίου το 2050.

Πίνακας 7-13: Στοχαστικές προβολές του μοντέλου για το ποσοστό των μη συμβατικών κοιτασμάτων στην παγκόσμια παραγωγή πετρελαίου το 2030 και το 2050

	2030		2050	
	conventional oil	non- conventional oil	conventional oil	non- conventional oil
Mean	78.4	21.6	68.0	32.0
Median	81.0	19.0	69.9	30.1
Std. Dev.	9.3	9.3	14.0	14.0
lower 5%	59.3	10.7	41.5	12.8
upper 5%	89.3	40.7	87.2	58.5
share in 2008	97.5	2.5	97.5	2.5

7.7 Σενάριο φιλόδοξης κλιματικής πολιτικής

Η ενότητα 7.7 εξετάζει τις επιπτώσεις στο παγκόσμιο ενεργειακό σύστημα, στις διεθνείς τιμές των καυσίμων και τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα από ένα σενάριο παγκόσμιας φιλόδοξης κλιματικής πολιτικής. Η στοχαστική λογική του ΠΡΟΜΗΘΕΑ υπαγορεύει ότι η χρήση ρητών κλιματικών στόχων αποτελεί διαστρέβλωση της αβεβαιότητας που περιβάλλει τις μελλοντικές πολιτικές για το κλίμα, καθώς πρέπει να εξεταστεί η πιθανότητα να τεθούν στόχοι αλλά να μην υλοποιηθούν. Για το λόγο αυτό, το μοντέλο χρησιμοποιεί μια κατανομή πιθανότητας για την «τιμή του διοξειδίου του άνθρακα» ως μέτρο της έντασης της κλιματικής πολιτικής [11]. Όπως έχει αναλυθεί στο κεφάλαιο 4, το σενάριο αναφοράς υποθέτει ότι ο βαθμός συμμετοχής στις κλιματικές πολιτικές διαφέρει ανάμεσα στις περιοχές (π.χ. η ΕΕ ακολουθείται από τις υπόλοιπες οικονομίες), αλλά υπάρχει μεγάλη πιθανότητα ότι η ένταση των κλιματικών πολιτικών αυξάνεται με το χρόνο. Επιπλέον, το μοντέλο ενσωματώνει μια διακριτή πιθανότητα παγκόσμιας φιλόδοξης δράσης για την μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου, η οποία ορίζεται υποκειμενικά και οι εξωγενείς μεταβολές της αντιπροσωπεύουν εναλλακτικά σενάρια κλιματικής πολιτικής. Στο σενάριο αναφοράς, οι τιμές της αυξάνονται από 0% το 2015 σε 22% το 2050 ανταναικλώνοντας την αυξημένη πιθανότητα για φιλόδοξες πολιτικές μακροπρόθεσμα. Στο σενάριο φιλόδοξης παγκόσμιας δράσης, η πιθανότητα αυτή είναι μεγαλύτερη και αυξάνεται σε 75% το 2050.

Στις περιπτώσεις συντονισμένης διεθνούς κλιματικής δράσης, το μοντέλο υποθέτει ότι (εκτός από την τιμή άνθρακα) θα πρέπει να εφαρμοστούν επιπρόσθετες πολιτικές και μέτρα εξειδικευμένα ανά τομέα (π.χ. πρότυπα ενεργειακής απόδοσης, μονώσεις στα κτίρια, επενδύσεις σε ενεργειακά αποδοτικές τεχνολογίες, πρόσθετους φόρους στα ορυκτά καύσιμα, επιδοτήσεις στο κόστος κεφαλαίου των ΑΠΕ, πολιτικές προώθησης τεχνολογιών μηδενικών εκπομπών, χρησιμοποίηση ενός ποσοστού των εσόδων από τον φόρο άνθρακα σε πρόσθετες επενδύσεις σε R&D για τις καθαρές ενεργειακές τεχνολογίες). Το σενάριο παγκόσμιας κλιματικής προσπάθειας υποθέτει αυξημένη φιλοδοξία όλων των παραπάνω πολιτικών σε σχέση με το σενάριο αναφοράς. Στο σενάριο αναφοράς δυο βασικά χαρακτηριστικά των κατανομών των τιμών άνθρακα είναι η ισχυρή θετική συσχέτιση μεταξύ των περιοχών (ιδιαίτερα μετά το 2030) και η μεγάλη ασυμμετρία τους, εξαιτίας κυρίως της εισαγωγής πιθανοτήτων συντονισμένης παγκόσμιας δράσης, που καθιστούν τις μέσες τιμές πολύ υψηλότερες από τις διαμέσους (π.χ. η μέση τιμή του άνθρακα στην ΕΕ προβλέπεται να είναι 92 € ανά τόνο διοξειδίου το 2050, ενώ η μέση τιμή είναι μόνο 59 €). Στο σενάριο παγκόσμιας κλιματικής δράσης η στατιστική εξάρτηση μεταξύ των τιμών άνθρακα στις διάφορες περιοχές είναι ιδιαίτερα ισχυρή (ο συντελεστής συσχέτισης λαμβάνει τιμές μεταξύ 0.7 και 0.85 το 2050). Στο σενάριο φιλόδοξης πολιτικής, οι τιμές άνθρακα σε όλες τις περιοχές αυξάνονται σημαντικά σε σύγκριση με το σενάριο αναφοράς, ιδιαίτερα την μετά το 2020 (Πίνακας 7-14), αντικατοπτρίζοντας τις μεγαλύτερες πιθανότητες για παγκόσμια φιλόδοξη δράση μείωσης των εκπομπών άνθρακα. Από την άλλη πλευρά, παρατηρούμε ότι ο συντελεστής διακύμανσης (λόγος τυπικής απόκλισης προς μέσο)

είναι υψηλότερος στο σενάριο αναφοράς εξαιτίας της μεγαλύτερης μεταβλητότητας (αναλογικά) που προκαλείται από τις πιθανότητες παγκόσμιας κλιματικής δράσης.

Τα αποτελέσματα του στοχαστικού σεναρίου εξαρτώνται από τις υποθέσεις για τις κλιματικές πολιτικές που εισάγονται σε κάθε περιοχή του μοντέλου και συνεπώς οι κατανομές πιθανοτήτων είναι δεσμευμένες με βάση τις κλιματικές πολιτικές. Η μορφή της κατανομής των πιθανοτήτων που παράγεται για κάθε ενδογενή μεταβλητή του μοντέλου αποτελεί ιδιαίτερα ενδιαφέρον αποτέλεσμα της ανάλυσης με το στοχαστικό μοντέλο, καθώς οι κατανομές των αποτελεσμάτων εξαρτώνται από τις αναδράσεις και τις αλληλεπιδράσεις με άλλες μεταβλητές του παγκόσμιου ενεργειακού συστήματος και συνεπώς δεν λαμβάνουν προκαθορισμένη μορφή (π.χ. κανονική). Η μορφή μπορεί να αξιολογηθεί από τον χρήστη του μοντέλου ώστε να προκύψουν συμπεράσματα σχετικά με το εύρος της αβεβαιότητας για κάθε προβολή στο μέλλον.

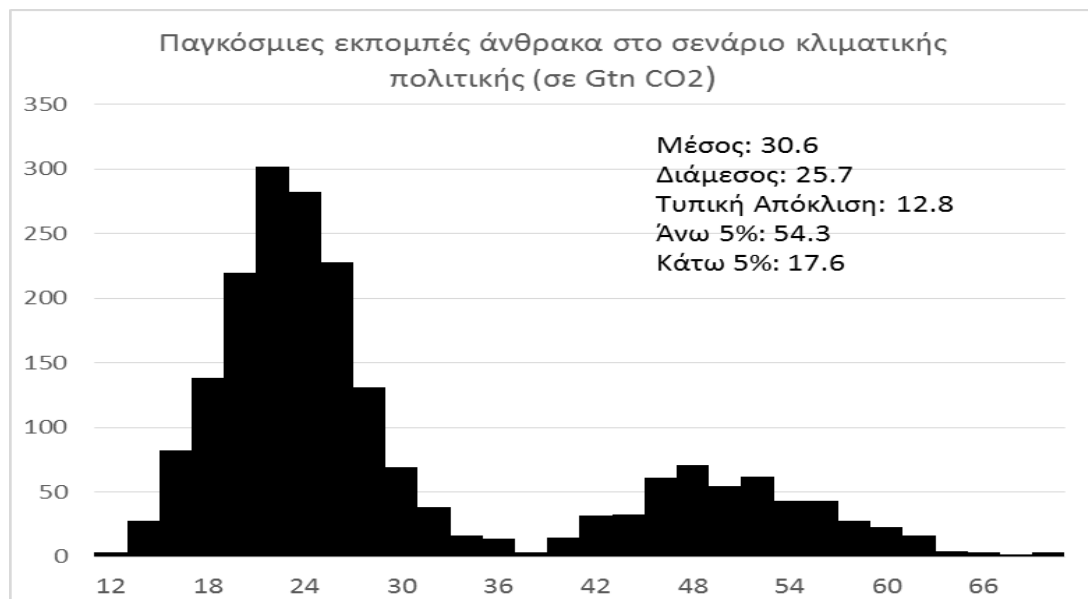
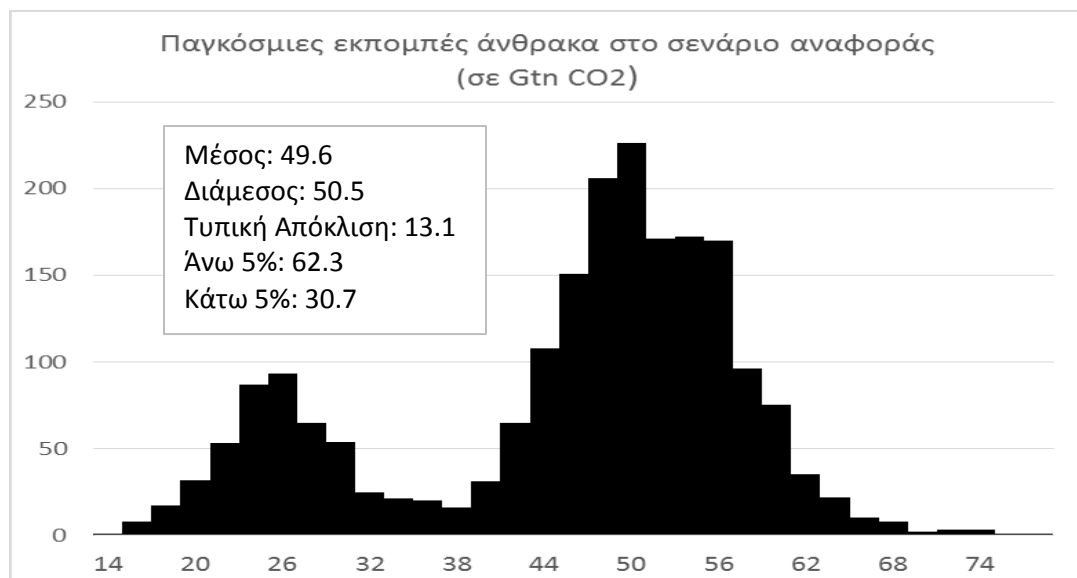
Πίνακας 7-14: Στατιστικά στοιχεία για τις τιμές άνθρακα που χρησιμοποιούνται σαν είσοδος στο μοντέλο στις περιοχές του μοντέλου στα εναλλακτικά σενάρια (€ 2010/tn CO₂)

		Σενάριο αναφοράς				Σενάριο κλιματικής πολιτικής			
		EU	CHN	IND	NOAM	EU	CHN	IND	NOAM
2030	Μέσος	67	22	13	37	178	102	65	115
	Διάμεσος	40	3	2	18	216	119	75	138
	Τυπ. Αποκλ.	52	30	29	29	95	66	41	65
2050	Μέσος	92	46	31	67	217	129	97	187
	Διάμεσος	59	20	15	37	252	136	103	213
	Τυπ. Αποκλ.	62	43	31	57	118	84	64	109

Στο στοχαστικό σενάριο αναφοράς, ο διάμεσος των παγκόσμιων εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα από ενεργειακές χρήσεις αυξάνεται συνεχώς από 27.6 Gtn CO₂ το 2010 σε 50.5 Gtn CO₂ το 2050. Η ανάλυση των στοχαστικών αποτελεσμάτων δείχνει ότι υπάρχει σχετικά χαμηλή (6%) πιθανότητα σταθεροποίησης των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα μεταξύ 2010-2050, ενώ η πιθανότητα ότι οι εκπομπές θα υπερδιπλασιαστούν κατά την ίδια περίοδο εκτιμάται σε 20%. Το σενάριο φιλόδοξης κλιματικής πολιτικής οδηγεί σε σημαντική μείωση του μέσου και του διαμέσου της κατανομής των παγκόσμιων εκπομπών; Η μείωση αυτή το 2050 προσεγγίζει το 50% για τον διάμεσο (25.7 Gtn CO₂ στο σενάριο κλιματικής πολιτικής) και το 40% για τον μέσο (30.6 Gtn CO₂). Το σενάριο υψηλών τιμών άνθρακα οδηγεί επιπλέον σε μεγαλύτερη αβεβαιότητα για τις παγκόσμιες εκπομπές άνθρακα, καθώς το εύρος 50% (δηλαδή πιθανότητα 50% οι εκπομπές να βρίσκονται στο συγκριμένο διάστημα) αυξάνεται από 9 Gtn CO₂ στο σενάριο αναφοράς σε 13 Gtn στο σενάριο κλιματικής δράσης. Η υψηλότερη αβεβαιότητα διακρίνεται στο Γράφημα 7-13, που παρουσιάζει την εξέλιξη των 10% εκατοστημορίων κατανομής των εκπομπών CO₂ στα δυο σενάρια. Οι μεταβολές των κατανομών για τις παγκόσμιες εκπομπές CO₂ στα δυο σενάρια το 2050 φαίνονται στο Γράφημα 7-12. Παρατηρούμε ότι η ραγδαία αύξηση των πιθανοτήτων για δράση για το κλίμα μεταβάλλουν την ασυμμετρία της κατανομής από «αρνητική ασυμμετρία» στο σενάριο αναφοράς (με το μέσο μικρότερο από το διάμεσο)

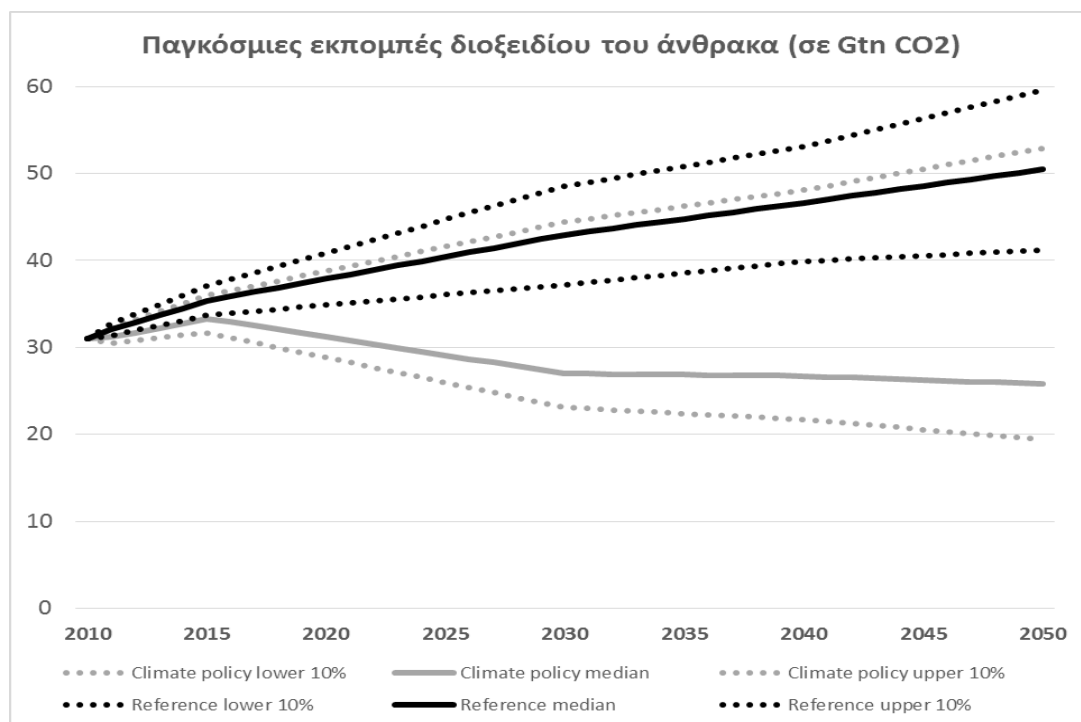
σε «θετική ασυμμετρία» στο σενάριο κλιματικής πολιτικής (με την μέση τιμή πολύ μεγαλύτερη από τη διάμεση). Επιπλέον, ο συντελεστής μεταβλητότητας (τυπική απόκλιση προς μέσο) αυξάνεται σε μεγάλο βαθμό στο σενάριο κλιματικής πολιτικής. Με βάση την ανάλυση από σημαντικές έρευνες με μοντέλα ενέργειας-οικονομίας, οι παγκόσμιες εκπομπές άνθρακα το 2050 που είναι συμβατές με τον μακροπρόθεσμο στόχο μετριασμού της κλιματικής αλλαγής κυμαίνονται μεταξύ 30-32 Gtn CO₂. Η στοχαστική ανάλυση με το μοντέλο δείχνει ότι στο σενάριο αναφοράς η πιθανότητα να επιτευχθεί αυτός ο στόχος το 2050 είναι μόνο 7%, ενώ στο σενάριο κλιματικής δράσης αυξάνεται σημαντικά σε 70% (ενώ υπάρχει πιθανότητα 16% υπέρβασης του στόχου).

Γράφημα 7-12: Στοχαστικές προβολές του μοντέλου για τις κατανομές των παγκόσμιων εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα στα δυο εναλλακτικά σενάρια σε Gtn CO₂

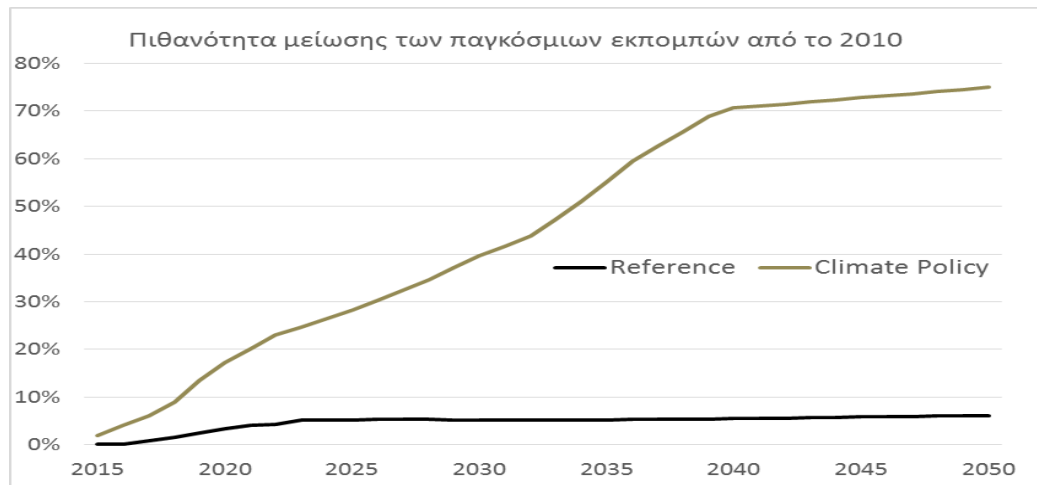


Στο σενάριο αναφοράς, η αυξανόμενη πιθανότητα υλοποίησης κλιματικών πολιτικών μετά το 2030 οδηγεί σε πιθανότητα 18% μείωσης των εκπομπών μεταξύ 2030 και 2050. Η αντίστοιχη πιθανότητα στο σενάριο φιλόδοξης κλιματικής πολιτικής αυξάνεται σε 58%. Στο Γράφημα 7-14 παρατηρούμε ότι ενώ στο σενάριο αναφοράς η πιθανότητα μείωσης των παγκόσμιων εκπομπών άνθρακα παραμένει σε επίπεδα μικρότερα του 10% μέχρι το 2050, στο σενάριο συντονισμένης κλιματικής δράσης η πιθανότητα αυξάνεται ραγδαία από 15% το 2020 σε 40% το 2030 και σε 75% το 2050. Στο σενάριο αναφοράς, οι παγκόσμιες εκπομπές CO₂ σχετίζονται σε μεγάλο βαθμό με τον ρυθμό αύξησης του ΑΕΠ (το 2020 ο συντελεστής συσχέτισης τους είναι 0.65). Ωστόσο, μακροπρόθεσμα η ένταση της κλιματικής πολιτικής διαδραματίζει ιδιαίτερα σημαντικό ρόλο στην εξέλιξη των εκπομπών και ως αποτέλεσμα το 2050 η συσχέτισή των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα με το παγκόσμιο ΑΕΠ είναι μόλις 0.4, ενώ η αντίστοιχη συσχέτιση με την παγκόσμια μέση τιμή του άνθρακα είναι -0.71. Στο σενάριο φιλόδοξης πολιτικής για το κλίμα, η από-συσχέτιση των εκπομπών CO₂ από τον ρυθμό αύξησης της οικονομικής δραστηριότητας γίνεται ακόμα μεγαλύτερη, καθώς ο συντελεστής συσχέτισής τους το 2050 είναι μόλις 0.21, ενώ οι κλιματικές πολιτικές είναι ο καθοριστικός παράγοντας για την εξέλιξη των παγκόσμιων εκπομπών άνθρακα (συντελεστής συσχέτισης -0.87 το 2050).

Γράφημα 7-13: Στοχαστικές προβολές του μοντέλου για την εξέλιξη των παγκόσμιων εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα στα δυο εναλλακτικά σενάρια σε Gtn CO₂ (οι διακεκομμένες γραμμές αναπαριστούν τα 10% εκατοστημόρια)



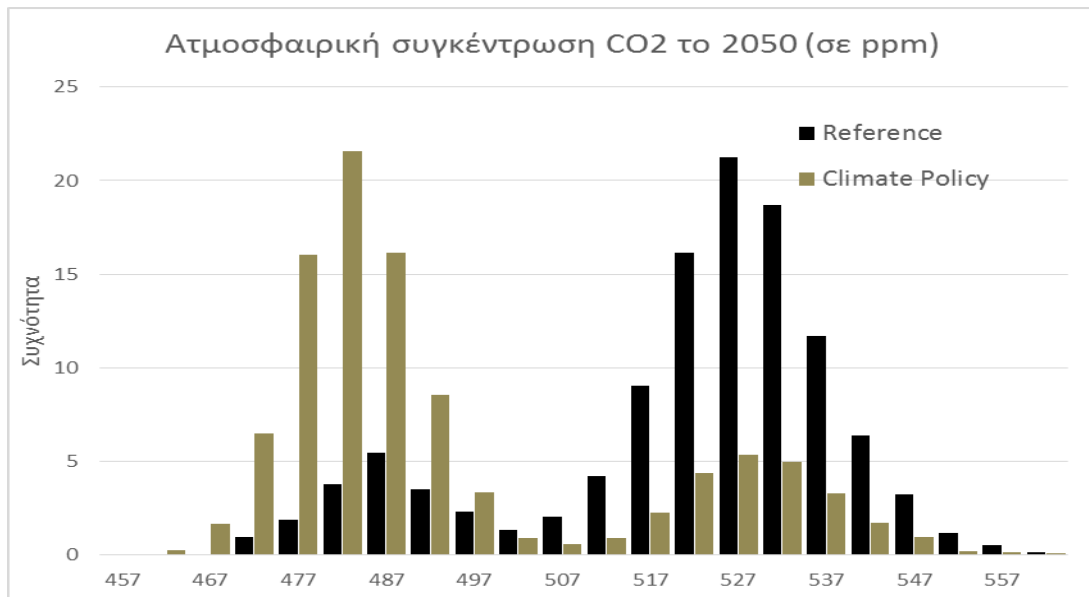
Γράφημα 7-14: Πιθανότητα μείωσης των παγκόσμιων εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα από τα επίπεδα του 2010 με βάση την στοχαστική ανάλυση του μοντέλου για τα 2 εναλλακτικά σενάρια



Το Γράφημα 7-15 παρουσιάζει την εμπειρική κατανομή των συγκεντρώσεων άνθρακα το 2050 στα δυο σενάρια που εξετάστηκαν. Αυτή η κατανομή χαρακτηρίζεται από έντονα αρνητική συσχέτιση με τις παγκόσμιες τιμές του φόρου άνθρακα και είναι δικόρυφη “bimodal” (έχει δυο άνισες επικρατούσες τιμές), εξαιτίας της πιθανότητας παγκόσμιας, φιλόδοξης δράσης με αυξημένη ένταση κλιματικής πολιτικής. Στο σενάριο αναφοράς, οι σχετικά μικρές πιθανότητες παγκόσμιας δράσης οδηγούν σε μόλις 8% πιθανότητα ότι οι συγκεντρώσεις CO₂ θα παραμείνουν κάτω από τα 500 ppm το 2050, ενώ η διάμεση τιμή της συγκέντρωσης προβλέπεται να είναι 525 ppm το 2050. Τα αποτελέσματα είναι ιδιαίτερα κοντά στις συγκεντρώσεις άνθρακα που προέκυψαν από την μελέτη Schaeffer et al [179] με χρήση του κλιματολογικού μοντέλου MAGICC 6.0 για τον υπολογισμό ατμοσφαιρικών συγκεντρώσεων άνθρακα (διάμεσος=524 ppm).

Στο σενάριο συντονισμένης φιλόδοξης κλιματικής δράσης, η διάμεσος τιμή της ατμοσφαιρικής συγκέντρωσης άνθρακα μειώνεται το 2050 από 525 ppm (στο σενάριο αναφοράς) σε 483 ppm. Λαμβάνοντας όμως υπόψη τις τάσεις των εκπομπών CO₂ και την πιθανή μεγάλη κλίμακας ανάπτυξη των τεχνολογιών βιομάζας με CCS μετά το 2050 (οι οποίες οδηγούν σε καθαρή μείωση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα), το σενάριο κλιματικής πολιτικής οδηγεί σε σχετικά υψηλές πιθανότητες συγκράτησης των ατμοσφαιρικών συγκεντρώσεων άνθρακα στα επίπεδα των 450 ppm το 2100 (το οποίο θεωρείται ως όριο ασφαλείας για την αποφυγή δυσμενών επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής σύμφωνα με το IPCC). Τέλος, ο συντελεστής μεταβλητότητας της κατανομής αυξάνεται από 3.2% στο σενάριο αναφοράς σε 5.7% στο σενάριο παγκόσμιας δράσης, εξαιτίας κυρίως της μεγαλύτερης διακύμανσης των τιμών άνθρακα και των αυξημένων πιθανοτήτων για συντονισμένες και φιλόδοξες κλιματικές πολιτικές.

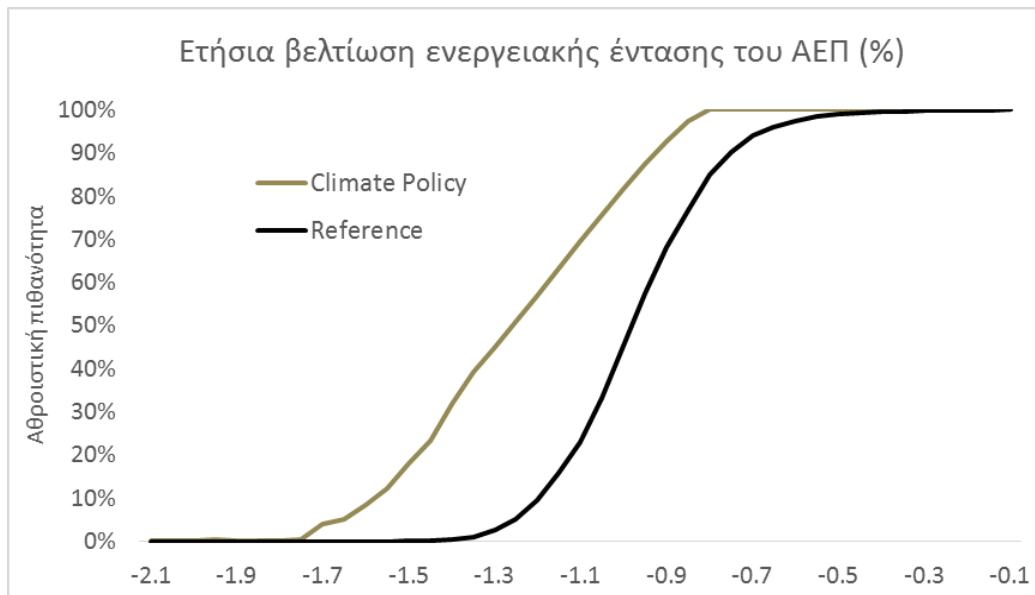
Γράφημα 7-15: Κατανομή πιθανοτήτων για την ατμοσφαιρική συγκέντρωση CO₂ το 2050 όπως προέκυψε από στοχαστική ανάλυση (οι διαδοσμένες γραμμές αναπαριστούν το σενάριο 450)



Ένα ιδιαίτερα σημαντικό χαρακτηριστικό της ανάλυσης αβεβαιότητας με τον ΠΡΟΜΗΘΕΑ αποτελεί η ενσωμάτωση της πιθανότητας να τεθούν συγκεκριμένοι στόχοι περιορισμού της κλιματικής αλλαγής, αλλά να μην πραγματοποιηθούν. Συγκεκριμένα, οι μελέτες [7, 10,60] αποδεικνύουν ότι ο στόχος του μετριασμού στα επίπεδα των 2οC είναι συνεπής με τον περιορισμό των αθροιστικών παγκόσμιων εκπομπών CO₂ στα επίπεδα 1300 Gtn την περίοδο 2000-2050. Ωστόσο, στα στοχαστικά σενάρια υπάρχουν πιθανότητες μη επίτευξης του στόχου, οι οποίες κυμαίνονται από 97% στο σενάριο αναφοράς ως 44% στο κλιματικό σενάριο (ορισμένες ως το ποσοστό των πειραμάτων Monte Carlo που ξεπερνούν τον περιορισμό των 1300 Gtn την περίοδο 2000-2050).

Η αυξημένη πιθανότητα φιλόδοξων κλιματικών πολιτικών οδηγεί σε μεταβολές στο ενεργειακό σύστημα με υποκατάσταση της καύσης υδρογονανθράκων από μορφές ενέργειας χαμηλών εκπομπών (ΑΠΕ, βιοκαύσιμα, πυρηνική ενέργεια, CCS) και μείωση της κατανάλωσης ενέργειας (βιομηχανία, νοικοκυριά, μεταφορές) εξαιτίας της αύξησης του κόστους (μέσω ενσωμάτωσης αυξημένου φόρου στο διοξείδιο του άνθρακα). Το Γράφημα 7-16 παρουσιάζει την αθροιστική κατανομή των αποτελεσμάτων του στοχαστικού μοντέλου για την ετήσια βελτίωση της ενεργειακής έντασης του ΑΕΠ σε παγκόσμιο επίπεδο στο σενάριο αναφοράς και στο σενάριο κλιματικής πολιτικής. Η αναμενόμενη τιμή της ενεργειακής απόδοσης αυξάνει από 1.01% ετησίως στο σενάριο αναφοράς σε 1.25% στο σενάριο κλιματικής πολιτικής. Επιπλέον, υπάρχουν σχετικά υψηλές πιθανότητες για μεγάλες σε μέγεθος βελτιώσεις της ενεργειακής έντασης (π.χ. περίπου 20% πιθανότητες για ετήσια βελτίωση άνω του 1.5%).

Γράφημα 7-16: Γράφημα αθροιστικής πιθανότητας της ετήσιας βελτίωσης της μέσης ενεργειακής έντασης του ΑΕΠ σε παγκόσμιο επίπεδο στα 2 σενάρια με βάση τα αποτελέσματα του μοντέλου



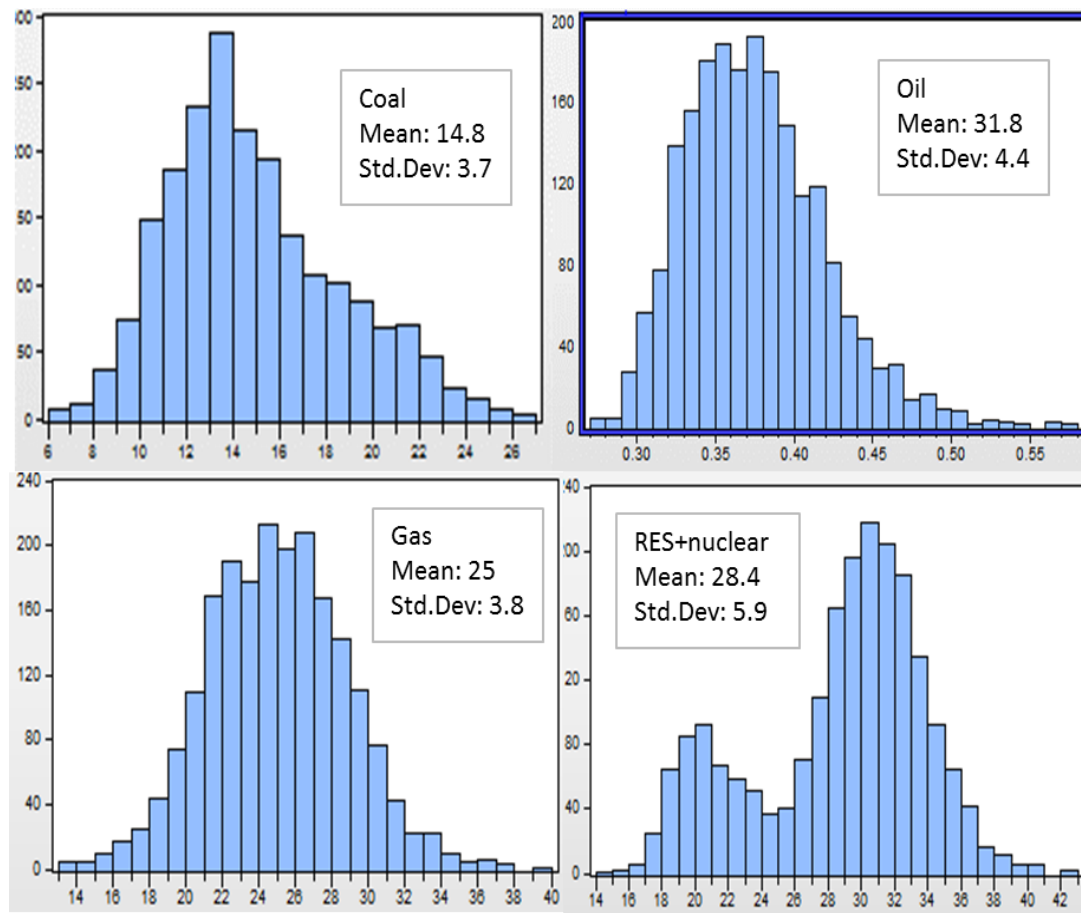
Κατά την περίοδο 2012-2050, το σενάριο αναφοράς οδηγεί σε αύξηση 71% κατά μέσο όρο της παγκόσμιας πρωτογενούς κατανάλωσης υδρογονανθράκων, εξαιτίας της ραγδαίας οικονομικής ανάπτυξης των αναπτυσσόμενων χωρών, της αύξησης του πληθυσμού, της βελτίωσης των συνθηκών διαβίωσης καθώς και των σχετικά περιορισμένων πολιτικών μείωσης των εκπομπών άνθρακα. Στο σενάριο κλιματικής πολιτικής (Πίνακας 7-15), ο υψηλότερος φόρος άνθρακα οδηγεί σε μείωση της παγκόσμιας ζήτησης καυσίμων κατά 15% (κατά μέσο όρο) το 2050. Επιπλέον, ενώ στο σενάριο αναφοράς υπάρχει μόλις 3% πιθανότητα να μειωθεί η παγκόσμια κατανάλωση υδρογονανθράκων μεταξύ 2012-2030, η αντίστοιχη πιθανότητα στο σενάριο συντονισμένες δράσης είναι 45%. Ωστόσο, η μεγάλης κλίμακας διείσδυση των τεχνολογιών CCS στο σενάριο κλιματικής πολιτικής μετά το 2030 οδηγεί σε αυξημένη ζήτηση υδρογονανθράκων και συνεπώς η πιθανότητα μείωσης της κατανάλωσης εκτιμάται σε μόλις 3.5% κατά την περίοδο 2012-2050.

Πίνακας 7-15: Στατιστικά στοιχεία για την παγκόσμια κατανάλωση υδρογονανθράκων (σε Mtoe) στα εναλλακτικά σενάρια που εξετάστηκαν με το μοντέλο το 2030 και το 2050

	2012	2030		2050		
		Σενάριο Αναφοράς	Κλιματική Πολιτική	Σενάριο Αναφοράς	Κλιματική Πολιτική	% διαφορά από σεν. αναφοράς
Μέσος	11512	15016	12296	19698	16805	-15%
Διάμεσος		15048	11796	19574	16543	-15%
Τυπ. Απ.		1649	2102	2591	2923	13%
Κάτω 5%		12199	9632	15688	12474	-20%
Άνω 5%		17609	16346	24103	21949	-9%

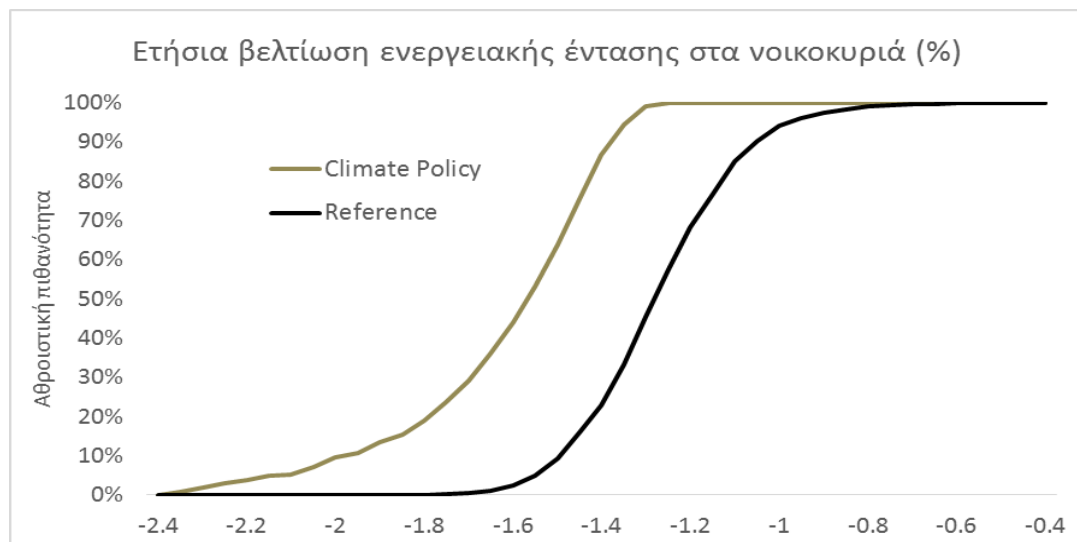
Το Γράφημα 7-17 παρουσιάζει κατανομές πιθανοτήτων για τα ποσοστά των ενεργειακών μορφών στην παγκόσμια ζήτηση ενέργειας το 2050 στο σενάριο των κλιματικών πολιτικών. Όπως είναι λογικό τα ποσοστά του πετρελαίου και του άνθρακα μειώνονται σε σύγκριση με το σενάριο αναφοράς (κατά μέσο όρο) εξαιτίας επιβολής υψηλότερου φόρου άνθρακα. Η μείωση είναι υψηλότερη για το πετρέλαιο (κατά μέσο όρο) εξαιτίας κυρίως της εκτεταμένης διείσδυσης ηλεκτροκίνητων οχημάτων στις μεταφορές που υποκαθιστούν μαζικά την κατανάλωση πετρελαϊκών προϊόντων μετά το 2030 αλλά και της υψηλής διείσδυσης τεχνολογιών άνθρακα με CCS στον τομέα της ηλεκτροπαραγωγής (που οδηγούν σε σχετική διατήρηση της κατανάλωσης άνθρακα). Το ποσοστό του φυσικού αερίου αυξάνεται οριακά από το σενάριο αναφοράς εξαιτίας της μικρότερης έντασης άνθρακα σε σχέση με τα υπόλοιπα ορυκτά καύσιμα και της ανάπτυξης των τεχνολογιών CCS με φυσικό αέριο την περίοδο μετά το 2030. Τέλος, το σενάριο οδηγεί σε μαζική ανάπτυξη των τεχνολογιών μηδενικών εκπομπών άνθρακα και κυρίως των ΑΠΕ για ηλεκτροπαραγωγή αλλά και των βιοκαυσίμων στις μεταφορές. Το μέσο ποσοστό τους έχει μεγάλες πιθανότητες να ξεπερνάει τόσο τον άνθρακα (88%) όσο και το φυσικό αέριο (67%) το 2050, ενώ έχει περιορισμένες να ξεπεράσει και την παγκόσμια κατανάλωση πετρελαίου (11%).

Γράφημα 7-17: Στοχαστικές προβολές του μοντέλου για τις κατανομές των ποσοστών των καυσίμων στο παγκόσμιο ενεργειακό μίγμα το 2050 στο σενάριο κλιματικής πολιτικής (σε %)



Ο τομέας με τις μεγαλύτερες βελτιώσεις στην ενεργειακή αποδοτικότητα είναι τα νοικοκυριά κυρίως εξαιτίας των μεγάλων δυνατοτήτων τους για χαμηλού κόστους υποκαταστάσεις (π.χ. αέριο υποκαθιστά πετρέλαιο και άνθρακα) και επενδύσεις σε βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης των κατοικιών, θερμική μόνωση και ενεργειακά αποδοτικές συσκευές. Το Γράφημα 7-29 παρουσιάζει την αθροιστική κατανομή της μέσης ετήσιας βελτίωσης της ενεργειακής απόδοσης των κατοικιών στα εναλλακτικά στοχαστικά σενάρια. Ο ιστορικός ρυθμός της παγκόσμιας βελτίωσης της ενεργειακής έντασης είναι περίπου 1.3% ετησίως. Το στοχαστικό σενάριο αναφοράς οδηγεί σε 52% πιθανότητα να ξεπεραστεί ο ιστορικός ρυθμός, ενώ στο σενάριο κλιματικής πολιτικής οι πιθανότητες αυξάνονται σημαντικά (99%).

Γράφημα 7-18: Γράφημα αθροιστικής πιθανότητας της μέσης ετήσιας βελτίωσης της παγκόσμιας ενεργειακής έντασης στα νοικοκυριά στα 2 σενάρια με βάση τα αποτελέσματα του μοντέλου

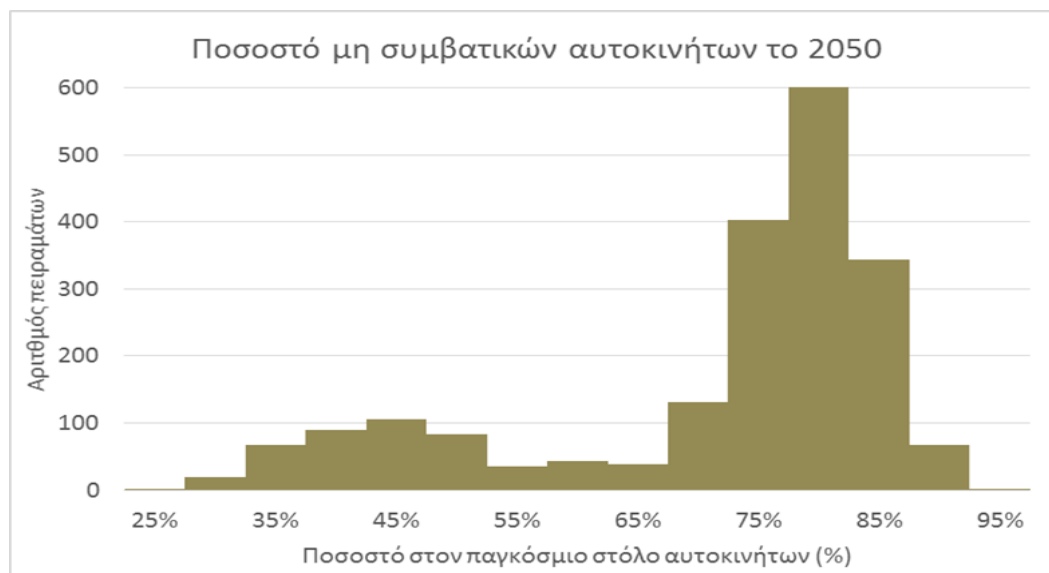


Μια ιδιαίτερα σημαντική μεταβολή στο παγκόσμιο ενεργειακό σύστημα είναι η εκτεταμένη διείσδυση μη συμβατικών αυτοκινήτων ιδιαίτερα μετά το 2030, η οποία προκαλείται τόσο από την αύξηση του κόστους των πετρελαιοκίνητων οχημάτων (μέσω της φορολόγησης των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα) όσο και από πολιτικές προώθησης εναλλακτικών τεχνολογιών, π.χ. μέτρα προώθησης επενδύσεων σε R&D (μείωση κόστους αποθήκευσης ηλεκτρισμού και κυψελών καυσίμου) και παροχής των απαραίτητων υποδομών για αυτοκίνητα με καύσιμο υδρογόνο ή ηλεκτρισμό.

Την περίοδο 2010-2030, το σενάριο κλιματικής πολιτικής οδηγεί σε αυξημένη διείσδυση των υβριδικών αυτοκινήτων, των οποίων το ποσοστό στον παγκόσμιο στόλο επιβατικών αμαξιών αυξάνεται από 10% στο σενάριο αναφοράς σε 14% (κατά μέσο όρο) το 2030. Το ποσοστό αυτό είναι μεγαλύτερο στις αναπτυγμένες οικονομίες της ΕΕ, της Β. Αμερικής και του ΟΟΣΑ Ειρηνικού και φτάνει το 27% (μέσος όρος). Η κύρια τάση μετά το 2030 είναι ο εξηλεκτρισμός του τομέα των επιβατικών οδικών μεταφορών με μαζική διείσδυση των ηλεκτρικών και των plug-in υβριδικών αυτοκινήτων τα οποία υποκαθιστούν τόσο τα συμβατικά όσο και τα υβριδικά αυτοκίνητα (που θεωρούνται μια μεσοπρόθεσμη λύση). Το ποσοστό των ηλεκτροκίνητων αυτοκινήτων αυξάνεται

από 11.5% στο σενάριο αναφοράς σε 33% (κατά μέσο όρο) στο σενάριο συντονισμένης δράσης, ενώ υπάρχει πιθανότητα 35% το ποσοστό τους να ξεπεράσει το 50% το 2050. Η ανάπτυξη των αυτοκινήτων υδρογόνου χαρακτηρίζεται από υψηλές αβεβαιότητες, οι οποίες εξαρτώνται πρωταρχικά από το κόστος των κυψελών καυσίμου και από την διαμόρφωση του δικτύου μεταφοράς και αποθήκευσης υδρογόνου, καθώς επίσης και από το κόστος παραγωγής υδρογόνου και τις τιμές των ανταγωνιστικών καυσίμων. Το 2050 στο σενάριο αναφοράς, το μέσο ποσοστό των υδρογονοκίνητων οχημάτων είναι 17% (ο διάμεσος είναι 7%), ενώ παράλληλα έχουν μη αμελητέες πιθανότητες (10%) το ποσοστό τους να υπερβεί το 50%. Στο σενάριο συντονισμένης δράσης το μέσο ποσοστό αυξάνεται σε 28% το 2050, ενώ υπάρχει 20% πιθανότητα τα αυτοκίνητα υδρογόνου να μην εισέλθουν καθόλου στην αγορά (ποσοστό μικρότερο από 2%) αλλά και 25% να την κατακτήσουν (πάνω από 50% του παγκόσμιου στόλου). Συνολικά, το μέσο ποσοστό των μη συμβατικών αυτοκινήτων αυξάνεται από 43% στο σενάριο αναφοράς σε 75% το 2050 στο σενάριο φιλόδοξης κλιματικής πολιτικής (Γράφημα 7-19).

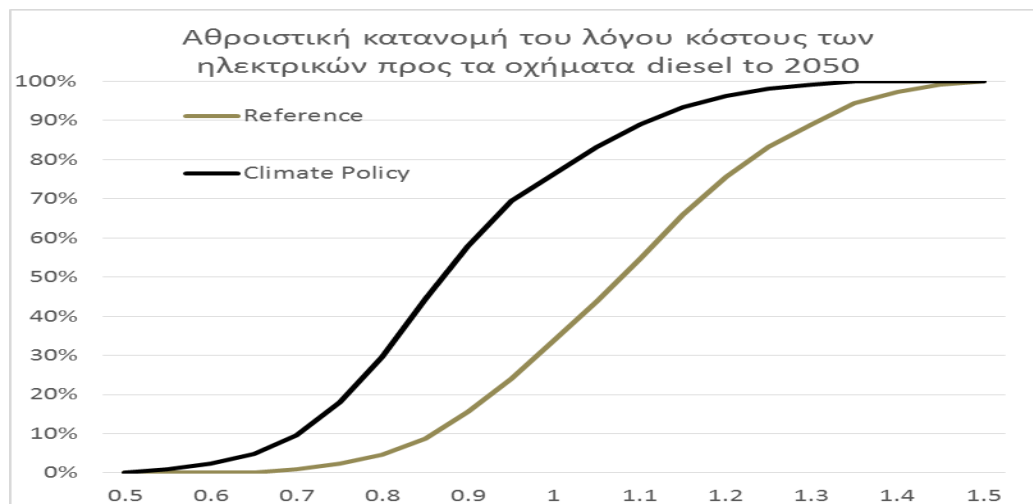
Γράφημα 7-19: Κατανομή του ποσοστού των μη συμβατικών στον παγκόσμιο στόλο αυτοκινήτων το 2050 στο σενάριο κλιματικής πολιτικής όπως προέκυψε από το στοχαστικό μοντέλο



Η διείσδυση τεχνολογιών στις μεταφορές εξαρτάται από το συνολικό κόστος των ανταγωνιστικών επιλογών, το οποίο υπολογίζεται ενδογενώς στο μοντέλο και εξαρτάται από το κόστος απόκτησης του αυτοκινήτου και από το κόστος λειτουργίας (κυρίως μέσω της τιμής των καυσίμων). Μετά το 2030, τα πετρελαιοκίνητα αυτοκίνητα χάνουν μέρος της αγοράς εξαιτίας της διείσδυσης καινούργιων τεχνολογιών χαμηλών εκπομπών και κυρίως υβριδικά με καλώδιο και ηλεκτρικά αυτοκίνητα (ειδικά στο σενάριο κλιματικής πολιτικής). Οι κύριες αιτίες είναι η ραγδαία τεχνολογική πρόοδος των μπαταριών (κόστος και εύρος αυτονομίας), η μείωση κόστους των μη συμβατικών οχημάτων, η αύξηση του κόστους για το πετρέλαιο (αύξηση διεθνών τιμών και φόρος άνθρακα) και η παροχή κατάλληλων υποδομών επαναφόρτισης μπαταριών. Με βάση τα παραπάνω, τα στοχαστικά αποτελέσματα του μοντέλου δείχνουν ότι υπάρχει

πιθανότητα 33% τα ηλεκτρικά οχήματα να είναι φθηνότερα από τα πετρελαϊκά το 2050 στην περιοχή της Ευρώπης στο σενάριο αναφοράς, ενώ στο σενάριο κλιματικής πολιτικής η πιθανότητα αυξάνεται δραστικά στο 77% (Γράφημα 7-20). Επίσης, η στοχαστική ανάλυση κατέδειξε ότι η πιθανότητα το κόστος ηλεκτρικού αυτοκινήτου να είναι 20% μικρότερο από το diesel αυξάνεται από μόλις 4% στο σενάριο αναφοράς σε 30% στο στοχαστικό σενάριο κλιματικής πολιτικής.

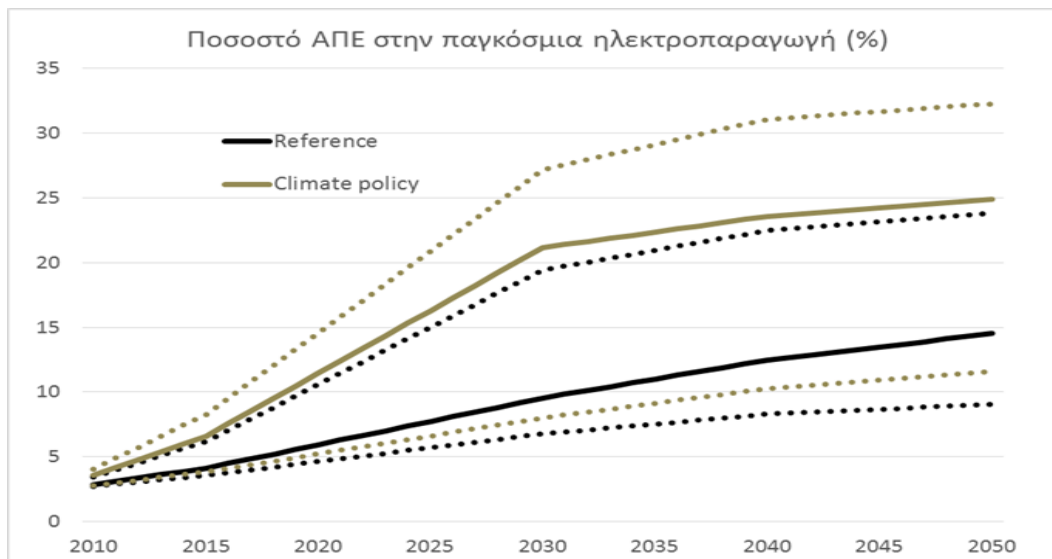
Γράφημα 7-20: Αθροιστική πιθανότητα του λόγου κόστους των ηλεκτρικών αυτοκινήτων σε σύγκριση με τα αυτοκίνητα diesel στην ΕΕ το 2050 στα 2 σενάρια με βάση τα αποτελέσματα του μοντέλου



Η επιβολή φόρου άνθρακα οδηγεί σε αλλαγές στο μίγμα ηλεκτροπαραγωγής, καθώς οι τεχνολογίες χαμηλού άνθρακα (ΑΠΕ, CCS, πυρηνική ενέργεια) υποκαθιστούν τα ορυκτά καύσιμα. Ο τομέας της ηλεκτροπαραγωγής είναι ο πιο ευέλικτος σε αλλαγές της κλιματικής πολιτικής, εξαιτίας των πολλαπλών εναλλακτικών επιλογών χαμηλών εκπομπών και των μικρών διαφορών στα κόστη τεχνολογιών. Η ανάλυση επιβεβαιώνει ότι μια οικονομικά αποδοτική στρατηγική για την μείωση των εκπομπών είναι η απανθρακοποίηση του μίγματος ηλεκτροπαραγωγής σε συνδυασμό με υποκατάσταση της καύσης υδρογονανθράκων από ηλεκτρισμό στους τομείς που είναι μη ευέλικτοι και δεν έχουν πολλές τεχνολογικές επιλογές για την μείωση των εκπομπών (νοικοκυριά, μεταφορές). Συνεπώς, στο σενάριο αναφοράς το ποσοστό του ηλεκτρισμού στην τελική ζήτηση ενέργειας αυξάνεται από 20.2% σε 28.1% (κατά μέσο όρο) την περίοδο 2010-2050. Στο σενάριο συντονισμένης δράσης το ποσοστό αυξάνεται ακόμα περισσότερο και φτάνει το 34.3% (μέσος όρος) το 2050 σε παγκόσμιο επίπεδο. Το ποσοστό των ΑΠΕ στην παραγωγή ηλεκτρισμού αυξάνεται σε σχέση με το σενάριο αναφοράς (Γράφημα 7-21). Από την ανάλυση εξαιρείται η υδροηλεκτρική ενέργεια, η οποία είναι ώριμη τεχνολογία με μικρά περιθώρια μείωσης κόστους και της οποίας η ανάπτυξη εξαρτάται κυρίως από πολιτικές αποφάσεις και από το δυναμικό της κάθε περιοχής. Το Γράφημα 7-21 δείχνει ότι ήδη από το 2020, η διάμεσος τιμή του ποσοστού ΑΠΕ διπλασιάζεται σε σχέση με το σενάριο αναφοράς, ενώ το 2030 το (μέσο) του ποσοστού αυξάνεται από 9.9% στο σενάριο αναφοράς σε 20.2% στο σενάριο κλιματικής δράσης. Μετά το 2030, παρατηρείται επιβράδυνση της αύξησης των ΑΠΕ με κύριες αιτίες:

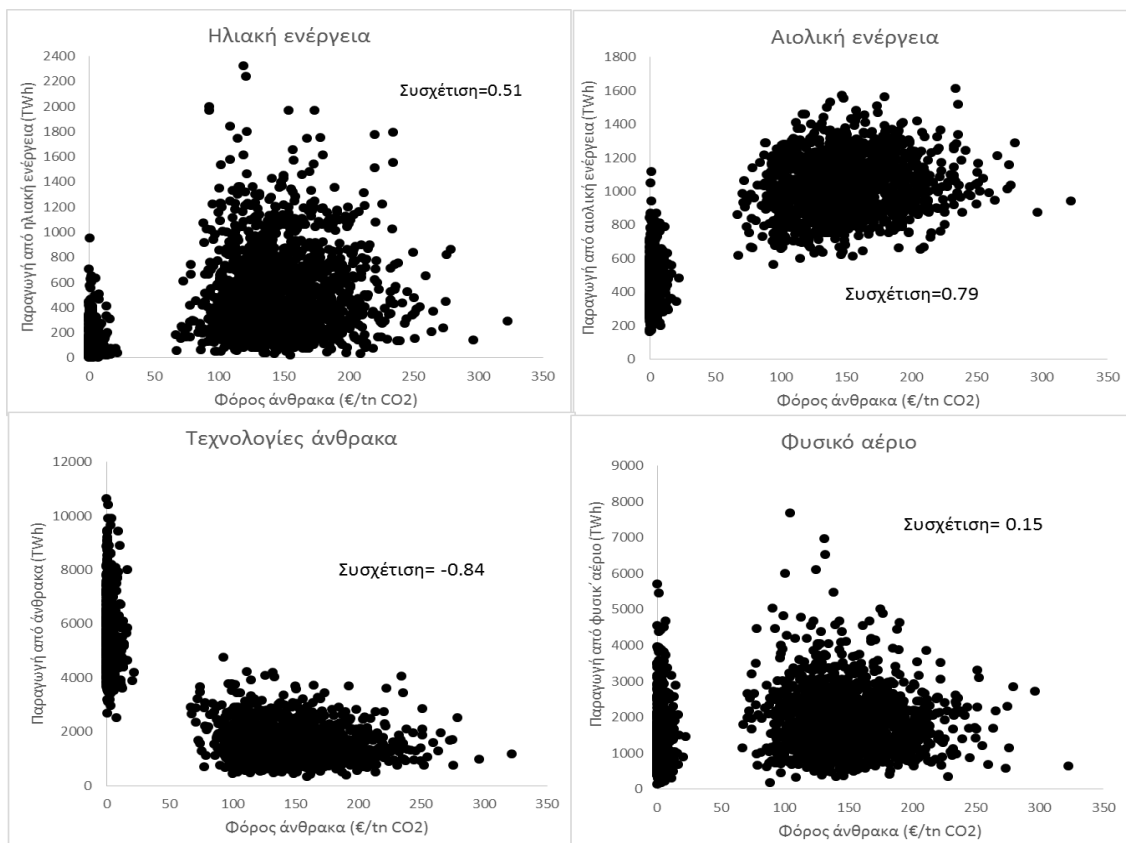
- Το περιορισμένο τεχνικό δυναμικό για ανάπτυξη αιολικής και ηλιακής σε αρκετές περιοχές. Όσο η παραγωγή πλησιάζει το δυναμικό, το κόστος των ΑΠΕ αυξάνεται μη γραμμικά καθώς χρησιμοποιούνται χειρότερες τοποθεσίες για την εγκατάσταση (π.χ. χαμηλή ταχύτητα ανέμων, περιορισμένη ηλιοφάνεια)
- Το υψηλό κόστος ενσωμάτωσης των ΑΠΕ διακοπτόμενης ισχύος στο ηλεκτρικό δίκτυο το οποίο αυξάνεται μη γραμμικά καθώς το ποσοστό τους υπερβαίνει ένα όριο (συνήθως 20-40%). Το κόστος ενσωμάτωσης των ΑΠΕ διακοπτόμενης ισχύος περιλαμβάνει το κόστος εφεδρείας, αποθήκευσης, δικτύου και παροχής ευέλικτων σταθμών παραγωγής (π.χ. τεχνολογία συνδυασμένου κύκλου).
- Η μεγάλη κλίμακας διεξόδου των τεχνολογιών CCS με oxyfuel στην παραγωγή ηλεκτρισμού μετά το 2030 που μπορούν να δεσμεύσουν το 95-99% των εκπομπών και αποτελούν αξιόπιστες επιλογές για κάλυψη του φορτίου βάσης.

Γράφημα 7-21: Στοχαστικές προεκτάσεις του μοντέλου για το ποσοστό ΑΠΕ στην παγκόσμια παραγωγή ηλεκτρισμού (εξαιρείται η υδροηλεκτρική). Οι διακεκομμένες γραμμές αναπαριστούν τα άνω και κάτω 5% εκατοστημόρια της κατανομής πιθανοτήτων όπως προέκυψε από το στοχαστικό μοντέλο.



Στο σενάριο αναφοράς, η διεξόδου των τεχνολογιών CCS περιορίζεται από την σχετικά χαμηλή τιμή άνθρακα στις περισσότερες περιοχές, η οποία δεν δίνει κίνητρα στους επενδυτές. Συνεπώς, το μέσο ποσοστό του CCS στην ηλεκτροπαραγωγή φτάνει σε 4.5% το 2050 (με διάμεσο μόλις 1%), ενώ η πιθανότητα το ποσοστό να ξεπεράσει το 20% εκτιμάται σε 6%. Αντίθετα, στο σενάριο συντονισμένης δράσης, οι υψηλοί φόροι άνθρακα οδηγούν σε μεγάλης κλίμακας ανάπτυξη των τεχνολογιών CCS, με το μέσο ποσοστό να αυξάνεται σε 32% το 2050 (διάμεσος 39%). Η εκτεταμένη διεξόδου των τεχνολογιών CCS σε σύντομο χρονικό διάστημα σημαίνει πρόωρη αποξήλωση μεγάλου μέρους εργοστασίων καύσης υδρογονανθράκων. Ωστόσο, το μοντέλο προσομοιάζει την διαδικασία επενδύσεων κράτησης διοξειδίου με CCS σε υπάρχοντα εργοστάσια με τις απαραίτητες μετασκευές (retrofitting), η οποία μειώνει σε μεγάλο βαθμό τα κόστη για τον ριζικό μετασχηματισμό του συστήματος παραγωγής ηλεκτρισμού.

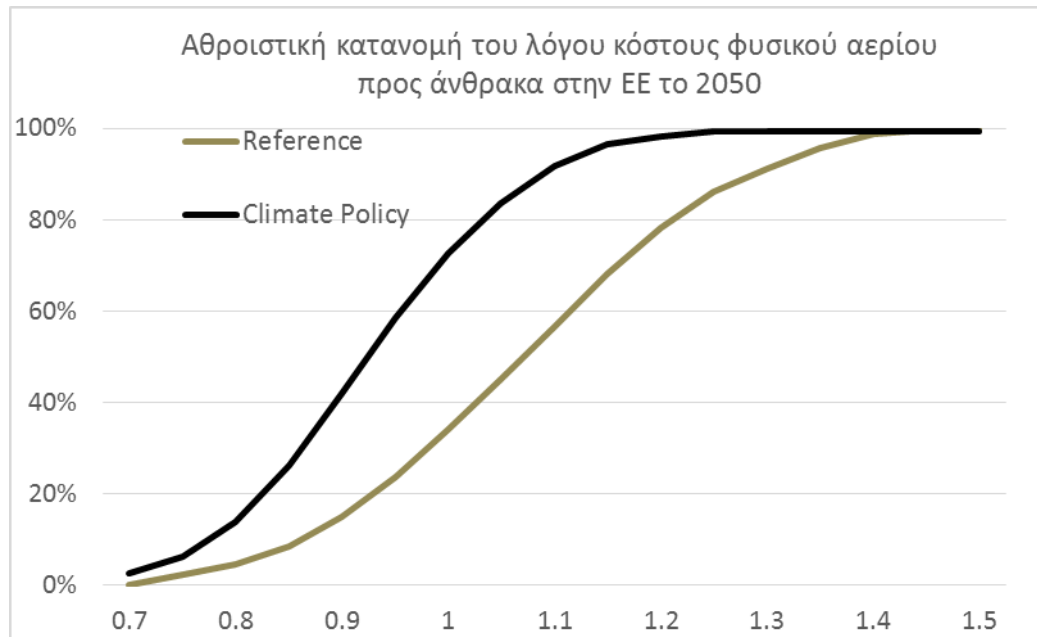
Το παρακάτω γράφημα δείχνει τον ιδιαίτερα σημαντικό ρόλο των κλιματικών πολιτικών για το μίγμα τεχνολογιών στην ηλεκτροπαραγωγή. Διαλέγοντας την Κίνα ως παράδειγμα, παρατηρώ ότι το 2030 στο σενάριο κλιματικής πολιτικής οι συντελεστές συσχέτισης μεταξύ της τιμής του διοξειδίου του άνθρακα και της παραγωγής από ΑΠΕ είναι ιδιαίτερα υψηλοί και συγκεκριμένα είναι 0.51 για την ηλιακή ενέργεια και 0.79 για τις ανεμογεννήτριες. Παρατηρώ ότι η συσχέτιση είναι υψηλότερη για την αιολική ενέργεια καθώς την περίοδο 2020-2030 είναι μια πλήρως ανταγωνιστική τεχνολογία και συνεπώς η επίδραση της τιμής εκπομπών άνθρακα είναι ιδιαίτερα υψηλή, ενώ η διείδυση της ηλιακής ενέργειας εξαρτάται αρκετά και από τις βελτιώσεις στα τεχνικά και οικονομικά χαρακτηριστικά της (μέσω του μηχανισμού τεχνολογικής προόδου). Από την άλλη πλευρά, παρατηρείται έντονα αρνητική συσχέτιση του φόρου άνθρακα και της παραγωγής ηλεκτρισμού από άνθρακα (συντελεστής συσχέτισης -0.84), ενώ η συσχέτιση με την διείδυση φυσικού αερίου είναι θετική με μικρή απόλυτη τιμή (0.15) καθώς το αέριο υποκαθιστά τον άνθρακα στην ηλεκτροπαραγωγή στις περιπτώσεις υψηλού φόρου στις εκπομπές εξαιτίας της μικρότερης έντασης εκπομπών. Στο σενάριο αναφοράς οι συσχετίσεις μεταξύ της τιμής εκπομπών άνθρακα και των τεχνολογιών είναι μικρότερες σε απόλυτη τιμή εξαιτίας των μικρότερων τιμών διοξειδίου του άνθρακα σε σύγκριση με το σενάριο κλιματικής πολιτικής. Στα παρακάτω γραφήματα διακρίνεται η δικόρυφη μορφή της κατανομής για το φόρο στο διοξείδιο του άνθρακα.



Γράφημα 7-22: Συσχετίσεις της διείδυσης τεχνολογιών στην ηλεκτροπαραγωγή στην Κίνα με την τιμή εκπομπών άνθρακα το 2030 με βάση το στοχαστικό μοντέλο για το σενάριο κλιματικής πολιτικής

Ο ανταγωνισμός των τεχνολογιών για την κάλυψη των αναγκών για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας διαμορφώνεται με κριτήριο το συνολικό τους κόστος, το οποίο περιλαμβάνει το κόστος κεφαλαίου, το σταθερό και μεταβλητό κόστος λειτουργίας, το κόστος καυσίμου και εκπομπών άνθρακα και το κόστος ενσωμάτωσης στο ηλεκτρικό δίκτυο. Οι δυο βασικές τεχνολογίες ορυκτών καυσίμων που ανταγωνίζονται για τις νέες επενδύσεις είναι ο συνδυασμένος κύκλος φυσικού αερίου και οι τεχνολογίες καύσης άνθρακα σε υπερ-κρίσιμη θερμοκρασίας. Στο στοχαστικό σενάριο αναφοράς, το κόστος του αερίου είναι κατά μέσο όρο 7% ακριβότερο από τον άνθρακα, ενώ το σενάριο κλιματικής πολιτικής επηρεάζει περισσότερο τον άνθρακα και συνεπώς το κόστος του φυσικού αερίου έχει 70% πιθανότητες να είναι χαμηλότερο από τον άνθρακα το 2050 (Γράφημα 7-23). Από την άλλη, το σενάριο της κλιματικής πολιτικής οδηγεί σε αυξημένες πιθανότητες το κόστος των ΑΠΕ να είναι χαμηλότερο από τον συνδυασμένο κύκλο φυσικού αερίου ο οποίος επηρεάζεται από την επιβολή υψηλού φόρου άνθρακα.

Γράφημα 7-23: Αθροιστική πιθανότητα του λόγου κόστους του συνδυασμένου κύκλου αερίου προς άνθρακα στην ΕΕ το 2050 στα 2 σενάρια με βάση τα αποτελέσματα του μοντέλου



Η διαρκώς αυξανόμενη παγκόσμια ζήτηση για ορυκτά καύσιμα στο σενάριο αναφοράς σε συνδυασμό με τον εξαντλήσιμο χαρακτήρα των κοιτασμάτων, τον ρόλο του ΟΠΕΚ στην διαμόρφωση της τιμής πετρελαίου και το υψηλό κόστος εξόρυξης των μη συμβατικών πόρων (σχιστολιθικό πετρέλαιο) οδηγεί σε αύξηση των παγκόσμιων τιμών ενέργειας. Συγκεκριμένα, η διεθνής τιμή του Brent αυξάνεται από 79.5 \$ 2010/βαρέλι το 2010 σε 90.1 \$ 2010/βαρέλι το 2030 και 99.4 \$ το 2050 (κατά μέσο όρο). Κατά την περίοδο 2010-2030, η μέση αύξηση των διεθνών τιμών υπολογίζεται σε 13% για το πετρέλαιο και 18% για τον άνθρακα, ενώ είναι σημαντικά υψηλότερη για το φυσικό αέριο (33%) κυρίως εξαιτίας της μεγαλύτερης αύξησης της παγκόσμιας κατανάλωσης αερίου και της σχετικά χαμηλής τιμής το 2010. Από την άλλη πλευρά, η εισαγωγή πιθανοτήτων συντονισμένης κλιματικής δράσης οδηγούν σε περιορισμένη

αύξηση των τιμών την περίοδο 2030-2050 (10% για το πετρέλαιο, 8% για το φυσικό αέριο και μόλις 1% για τον άνθρακα). Συνολικά, το σενάριο αναφοράς οδηγεί σε ιδιαίτερα υψηλές πιθανότητες αύξησης της διεθνούς τιμής των καυσίμων από τα επίπεδα του 2010 (72% για το πετρέλαιο, 76% για το αέριο και 65% για τον άνθρακα).

Από την άλλη πλευρά, η επιβολή υψηλότερων τιμών άνθρακα στο σενάριο κλιματικής πολιτικής οδηγεί σε μείωση της ζήτησης για ορυκτά καύσιμα και συνεπώς (μέσω του μηχανισμού διαμόρφωσης των διεθνών τιμών) σε μείωση των παγκόσμιων τιμών τους σε σύγκριση με το σενάριο αναφοράς. Καθ' όλη την διάρκεια της περιόδου, η τιμή του άνθρακα επηρεάζεται περισσότερο από τα υπόλοιπα καύσιμα καθώς

- Έχει μεγαλύτερο περιεχόμενο σε διοξείδιο του άνθρακα και συνεπώς ο ίδιο φόρος άνθρακα θα έχει μεγαλύτερη επίπτωση στις τιμές τελικού καταναλωτή
- Η παγκόσμια κατανάλωση άνθρακα μειώνεται περισσότερο (από τα επίπεδα του σεναρίου αναφοράς) σε σύγκριση με το πετρέλαιο και το φυσικό αέριο
- Η διεθνής τιμή του άνθρακα επηρεάζεται από την εξέλιξη της διεθνούς τιμής του Brent, η οποία επίσης μειώνεται από το σενάριο αναφοράς.

Σύμφωνα με τα παραπάνω, η διεθνής τιμή του άνθρακα μειώνεται κατά 20% το 2030 και 35% το 2050 (κατά μέσο όρο) σε σύγκριση με το σενάριο αναφοράς. Επιπλέον, η πιθανότητα η παγκόσμια τιμή του άνθρακα να είναι υψηλότερη από τα επίπεδα του 2010 εκτιμάται σε μόλις 26% το 2050 μειωμένη κατά 40 ποσοστιαίες μονάδες από το σενάριο αναφοράς. Όσον αφορά την διεθνή τιμή του πετρελαίου, το 2030 η πτώση από το σενάριο αναφοράς είναι σχετικά περιορισμένη (5% κατά μέσο όρο) και ακολουθεί την μείωση στην παγκόσμια ζήτηση πετρελαίου, που συγκεντρώνεται σε μεγάλο βαθμό στον τομέα των μεταφορών (60% της πρωτογενούς ζήτησης το 2010 και 70% το 2020), ο οποίος απ-ανθρακοποιείται κυρίως μετά το 2030. Συνεπώς, ο υψηλός φόρος άνθρακα επηρεάζει την κατανάλωση και συνεπώς την διεθνή τιμή μακροπρόθεσμα, κυρίως εξαιτίας της διεύθυνσης μη συμβατικών αυτοκινήτων με εναλλακτικά καύσιμα (ηλεκτρισμός, υδρογόνο). Έτσι το 2050, το μέσο ποσοστό ελάττωσης της διεθνούς τιμής του Brent από το σενάριο αναφοράς εκτιμάται σε 27%, ενώ η πιθανότητα αύξησης από την τιμή του 2010 είναι 43%, κατά 30 ποσοστιαίες μονάδες μειωμένη από το σενάριο αναφοράς. Το σενάριο συντονισμένης δράσης επιφέρει επίσης μείωση στην διεθνή τιμή του αερίου, η οποία όμως είναι χαμηλότερη σε σύγκριση με τα υπόλοιπα καύσιμα, καθώς το φυσικό αέριο χαρακτηρίζεται από χαμηλότερη ένταση άνθρακα και υψηλότερη ενεργειακή απόδοση και επίσης συνδυάζεται με τις τεχνολογίες CCS για ηλεκτροπαραγωγή. Συνεπώς, οι μεταβολές είναι χαμηλότερες σε σχέση με το πετρέλαιο και τον άνθρακα και η διεθνής τιμή του φυσικού αερίου μειώνεται κατά 20% το 2050 από το σενάριο αναφοράς (μέσος όρος). Τέλος, η πιθανότητα ότι μεταξύ 2010-2050 η τιμή αερίου θα αυξηθεί εκτιμάται σε 55%, δηλαδή κατά 21 ποσοστιαίες μονάδες χαμηλότερη από το σενάριο αναφοράς (Πίνακας 7-16).

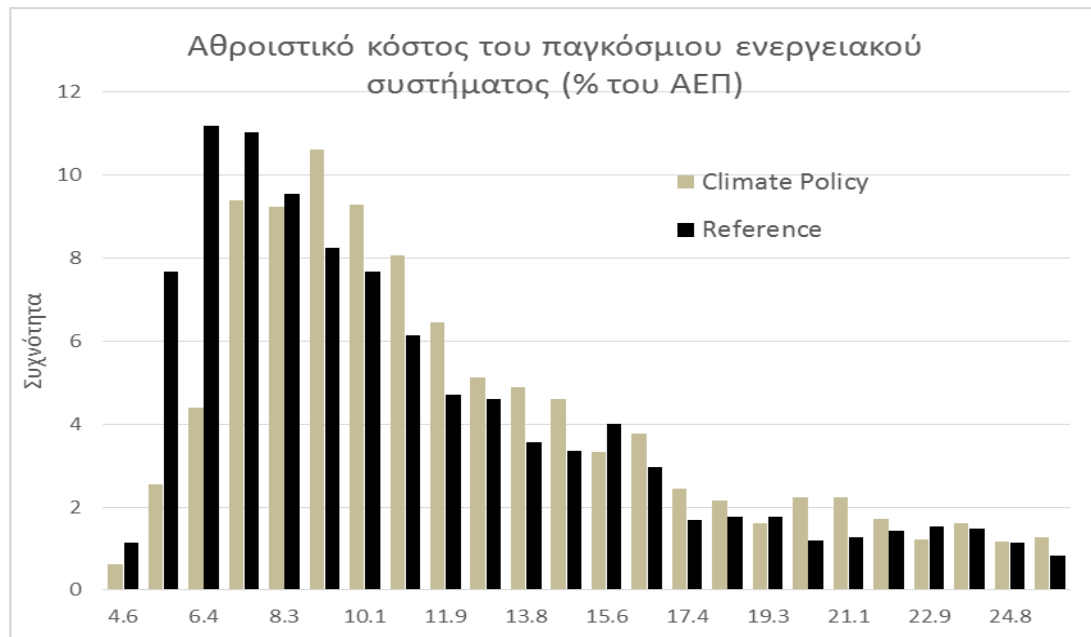
Πίνακας 7-16: Στοχαστικές προεκτάσεις του μοντέλου για τις διεθνείς τιμές των υδρογονανθράκων στα δυο εξεταζόμενα σενάρια το 2030 και το 2050

		2010	Σενάριο Αναφοράς		Σενάριο Κλιματικής Πολιτικής		% μεταβολή από σενάριο αναφοράς	
			2030	2050	2030	2050	2030	2050
Oil price (\$'10/boe)	Διάμεσος	79.5	90.1	99.4	85.4	72.9	-5%	-27%
	Άνω 10%		152.7	174.2	146.5	138.6	-4%	-20%
	Κάτω 10%		57.2	59.9	54.1	42.6	-5%	-29%
	Πιθανότητα υψηλότερης τιμής από 2010	-	65%	72%	59%	43%	-6%	-30%
Gas price (\$10/boe)	Διάμεσος	47.5	62.9	68.2	55.9	54.3	-11%	-20%
	Άνω 10%		93.2	108.6	82.3	89.8	-12%	-17%
	Κάτω 10%		42.9	42.3	36.9	33.0	-14%	-22%
	Πιθανότητα υψηλότερης τιμής από 2010	-	67%	76%	57%	55%	-10%	-21%
Coal price (\$ 10/tn)	Διάμεσος	85.8	101.9	103.0	81.2	66.9	-20%	-35%
	Άνω 10%		178.8	196.3	146.4	143.4	-18%	-27%
	Κάτω 10%		60.5	53.7	60.4	37.3	0%	-31%
	Πιθανότητα υψηλότερης τιμής από 2010	-	68%	65%	26%	26%	-43%	-39%

Το συνολικό κόστος του ενεργειακού συστήματος περιέχει τα κόστη κεφαλαίου για το σύνολο των επενδύσεων σε όλους τους κλάδους της ενέργειας (π.χ. μεταφορές, ηλεκτροπαραγωγή), τα μεταβλητά και σταθερά κόστη λειτουργίας, το κόστος για την αγορά καυσίμων, το κόστος για τις εκπομπές άνθρακα και το κόστος για επενδύσεις εξοικονόμησης ενέργειας. Το Γράφημα 7-24 παρουσιάζει τη κατανομή του αθροιστικού κόστους (περίοδος 2010-2050) για το παγκόσμιο ενεργειακό σύστημα σαν ποσοστό του ΑΕΠ. Στο σενάριο αναφοράς, το μέσο κόστος ανέρχεται σε 10.4% του παγκόσμιου ΑΕΠ, αυξημένο από το 7.8% το 2010 εξαιτίας της αύξησης της διεθνούς τιμής των υδρογονανθράκων, εκτεταμένων επενδύσεων για την κάλυψη της αύξησης της ζήτησης ενέργειας και ηλεκτρισμού (ειδικά στις αναπτυσσόμενες οικονομίες) και επενδύσεων σε καθαρές τεχνολογίες και υποδομές (οι οποίες είναι ακριβότερες από τις συμβατικές επιλογές). Το σενάριο κλιματικής πολιτικής οδηγεί σε αύξηση του μέσου κόστους του συστήματος κατά 0.8 ποσοστιαίες μονάδες του ΑΕΠ (11.2%). Η αύξηση προκαλείται εξαιτίας του αυξημένου φόρου άνθρακα που οδηγεί σε άνοδο κόστους των τεχνολογιών με καύση υδρογονανθράκων και εξαιτίας υποκαταστάσεων προς επιλογές χαμηλών εκπομπών αλλά με υψηλότερο κόστος (ΑΠΕ, βιοκαύσιμα, ενεργειακή εξοικονόμηση). Από την άλλη πλευρά, η αύξηση είναι σχετικά περιορισμένη εξαιτίας της μείωσης των

διεθνών τιμών των ορυκτών καυσίμων και της τεχνολογικής προόδου που οδηγεί σε μείωση του κόστους των ΑΠΕ από το σενάριο αναφοράς.

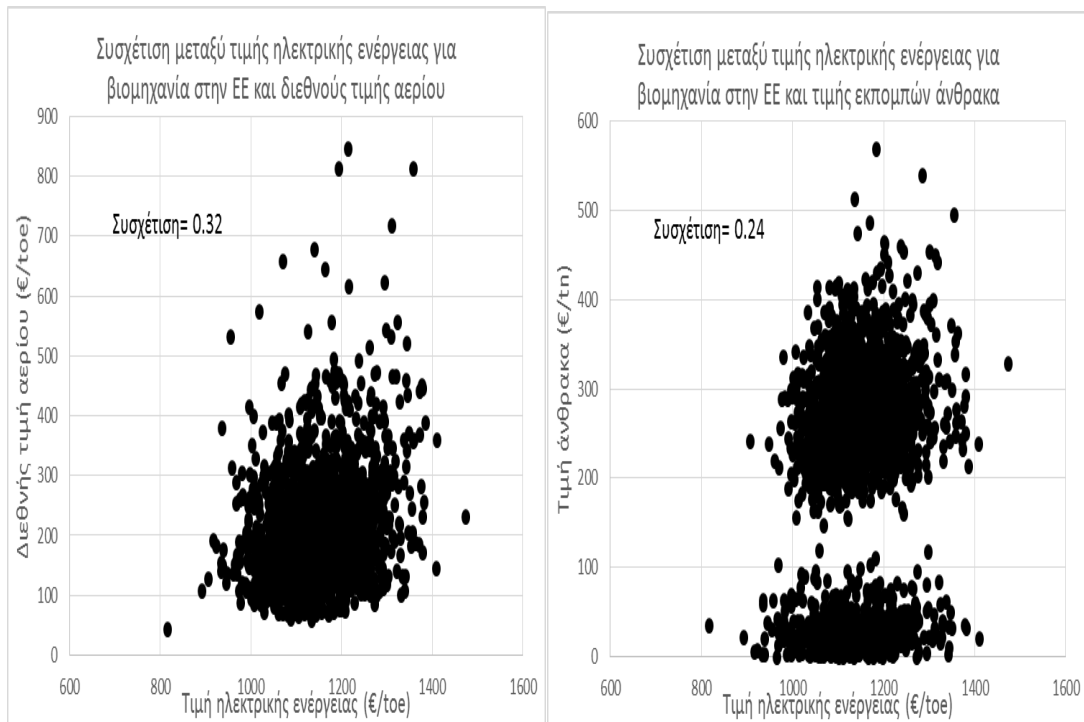
Επιπλέον, η ελάττωση της εξάρτησης του συνολικού κόστους του συστήματος από τις ιδιαίτερα μεγάλες διακυμάνσεις των διεθνών τιμών ενέργειας οδηγεί σε μείωση της τυπικής απόκλισης του κόστους του παγκόσμιου ενεργειακού συστήματος από 7.2 (σαν ποσοστό ΑΕΠ) στο σενάριο αναφοράς σε 5.8 στο σενάριο κλιματικής πολιτικής.



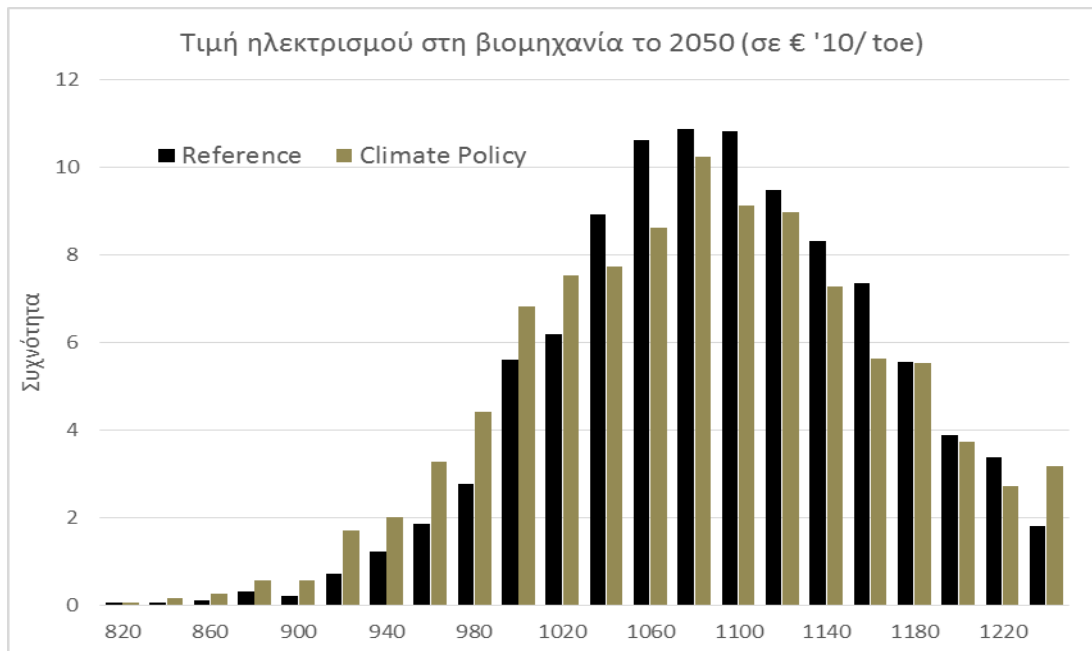
Γράφημα 7-24: Κατανομή αθροιστικού κόστους 2010-2050 του παγκόσμιου ενεργειακού συστήματος στα 2 σενάρια (σαν % του ΑΕΠ) όπως προέκυψε από την ανάλυση με το στοχαστικό μοντέλο

Η μέση τιμή πώλησης ηλεκτρικής ενέργειας στη βιομηχανία στην ΕΕ εξαρτάται από την εξέλιξη του μακροπρόθεσμου συνολικού μέσου κόστους των τεχνολογιών και από το χρησιμοποιούμενο μίγμα ηλεκτροπαραγωγής. Η στοχαστική ανάλυση με το μοντέλο κατέδειξε την μεγάλη σημασία δυο κυρίως παραγόντων που επηρεάζουν την τιμή πώλησης ηλεκτρικής ενέργειας στην ΕΕ (για βιομηχανικές χρήσεις). Αρχικά, η διεθνής τιμή πώλησης του φυσικού αερίου (καθώς η Ευρώπη είναι μεγάλος εισαγωγέας αερίου το οποίο χρησιμοποιείται εκτενώς στην ηλεκτροπαραγωγή) έχει υψηλή θετική συσχέτιση με την τιμή ηλεκτρισμού (0.32 στο σενάριο κλιματικής πολιτικής το 2050). Επίσης παρατηρώ ότι υπάρχει θετική συσχέτιση μεταξύ της τιμής ηλεκτρισμού και της τιμής των εκπομπών άνθρακα στην ΕΕ (0.24 το 2050). Το Γράφημα 7-25 παρουσιάζει τις συσχετίσεις μεταξύ των παραπάνω μεγεθών στα 2048 πειράματα του μοντέλου. Το σχήμα της τιμής του άνθρακα επηρεάζεται προφανώς από την θεωρούμενη δικόρυφη κατανομή που θεωρείται στην στοχαστική ανάλυση. Το σενάριο κλιματικής πολιτικής οδηγεί σε μικρή αύξηση της τιμής της ηλεκτρικής ενέργειας στην ΕΕ για βιομηχανικές χρήσεις κατά 0.5% μέσο όρο το 2050, ενώ παράλληλα μειώνεται η τυπική απόκλιση σε σύγκριση με το σενάριο αναφοράς, το οποίο είναι ιδιαίτερα σημαντικό για τους επενδυτές. Η κατανομή των τιμών για τα δυο σενάρια φαίνεται στο Γράφημα 7-26.

Κεφάλαιο 7



Γράφημα 7-25: Συσχέτιση μεταξύ της τιμής του ηλεκτρισμού για τη βιομηχανία στην ΕΕ, της διεθνούς τιμής αερίου (αριστερό γράφημα) και της τιμής εκπομπών άνθρακα (δεξιά)



Γράφημα 7-26: Κατανομή τιμής ηλεκτρισμού στην ΕΕ για βιομηχανικές χρήσεις όπως προέκυψε από την ανάλυση με το στοχαστικό μοντέλο (σε € 2010/toe)

7.8 Σενάριο εκμετάλλευσης του μη συμβατικού αερίου

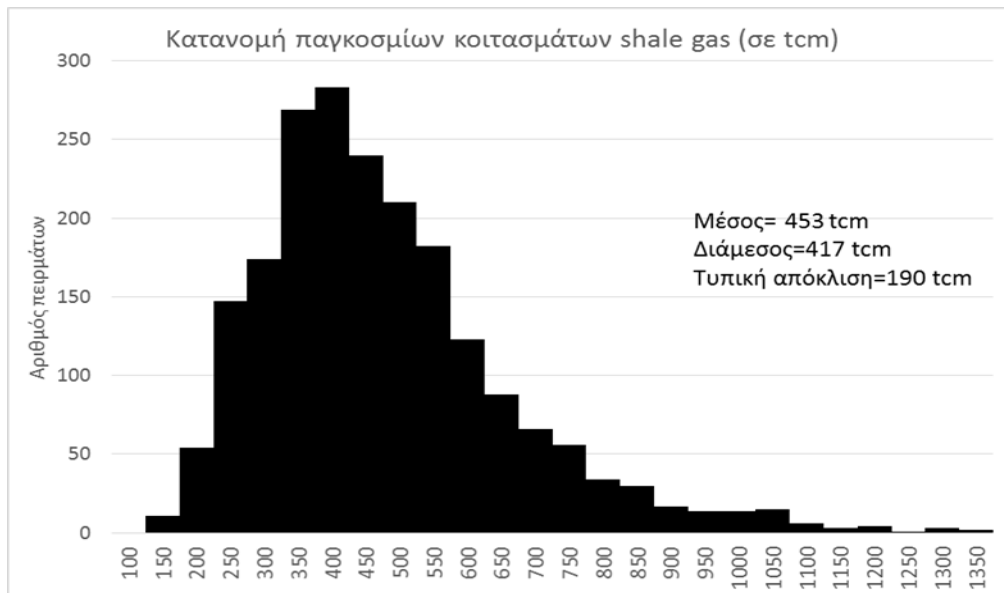
Η παρούσα ενότητα εξετάζει τις επιπτώσεις στο ενεργειακό σύστημα, στις τιμές των καυσίμων και τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα από ένα σενάριο υψηλής εκμετάλλευσης των παγκόσμιων κοιτασμάτων μη συμβατικού φυσικού αερίου. Το σενάριο αναφοράς υποθέτει παραγωγή μη συμβατικού αερίου μόνο στην Β. Αμερική (που ήδη παράγει σχετικά μεγάλες ποσότητες σχιστολιθικού αερίου). Αντίθετα, στο σενάριο του μη συμβατικού αερίου γίνεται η υπόθεση ότι όλες οι χώρες με κοιτάσματα επενδύουν στην παραγωγή σχιστολιθικού και έγκλειστου αερίου καθώς και σε μεθάνιο από κοιτάσματα άνθρακα μετά το 2015. Το σενάριο υποθέτει θετικές προσδοκίες σε παγκόσμιο επίπεδο για την διαθεσιμότητα και εκμετάλλευση του σχιστολιθικού αερίου και αντικατοπτρίζει τις αυξημένες δραστηριότητες εξερεύνησης και εκμετάλλευσης σε συνδυασμό με γρήγορη βελτίωση (και μείωση του κόστους) των τεχνολογιών εξόρυξης των μη συμβατικών κοιτασμάτων (υδραυλική ρωγμάτωση και οριζόντια γεώτρηση) και τις μειωμένες ανησυχίες της κοινής γνώμης για τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις της παραγωγής σχιστολιθικού αερίου.

Οι κατανομές πιθανοτήτων για τα κοιτάσματα του σχιστολιθικού, έγκλειστου και του μεθανίου στα κοιτάσματα άνθρακα περιγράφονται αναλυτικά στο κεφάλαιο 4. και εισάγονται στο μοντέλο με την ίδια λογική όπως τα συμβατικά κοιτάσματα, δηλαδή σε κάθε πείραμα Monte Carlo το μοντέλο ξεκινάει από μια διαφορετική κατάσταση του κόσμου όσον αφορά τους πόρους αερίου. Επιπλέον, σημαντικό ρόλο διαδραματίζουν οι συντελεστές ανάκτησης για κάθε κατηγορία αερίου, οι οποίοι γενικά παίρνουν τιμές μεταξύ 10-40% (επί των συνολικών κοιτασμάτων στο υπέδαφος) και εξαρτώνται από το κόστος εξόρυξης κοιτασμάτων, από μια ανώτατη τιμή-κατώφλι (που μεταβάλλεται ανά έτος και αντιπροσωπεύει την τεχνολογική βελτίωση) καθώς και από την διεθνή τιμή του φυσικού αερίου (όπως προσδιορίζεται ενδογενώς από το μοντέλο).

Το παρακάτω γράφημα παρουσιάζει την κατανομή πιθανοτήτων για τα παγκόσμια κοιτάσματα σχιστολιθικού φυσικού αερίου. Η μεθοδολογία κατασκευής των κατανομών βασίζεται σε οικονομετρικά δεδομένα και ένα πλήθος μελετών και δημοσιευμένων εκτιμήσεων. Οι κατανομές αυτές χρησιμοποιήθηκαν σαν σημείο έναρξης στο σενάριο εκμετάλλευσης των κοιτασμάτων μη συμβατικού αερίου. Με βάση την ανάλυση δεδομένων και μελετών, το σχιστολιθικό αέριο έχει τα υψηλότερα κοιτάσματα σε παγκόσμιο επίπεδο με μέσο όρο τα 453 τρισεκατομμύρια κυβικά μέτρα (tcm), ενώ οι πόροι έγκλειστου αερίου εκτιμώνται σε 213 tcm (κατά μέσο όρο) και αυτοί του μεθανίου σε κοιτάσματα άνθρακα σε 217 tcm.

Για την ανάλυση των σχετικών αβεβαιοτήτων που σχετίζονται με τα παγκόσμια κοιτάσματα μη συμβατικού αερίου, υπολογίζω τον συντελεστή μεταβλητότητας (ΣΜ) με βάση τον οποίο οι πόροι έγκλειστου αερίου χαρακτηρίζονται από την μικρότερη σχετική αβεβαιότητα (ΣΜ=0.28) καθώς η εξερεύνηση και η εκμετάλλευσή τους έχουν ξεκινήσει νωρίτερα. Από την άλλη πλευρά, οι πόροι μεθανίου από κοιτάσματα άνθρακα έχουν την μεγαλύτερη αβεβαιότητα (ΣΜ=0.61), προερχόμενη κυρίως από την ιδιαίτερα μεγάλη απόκλιση μεταξύ των διαφόρων μελετών και εξειδικευμένων εκτιμήσεων.

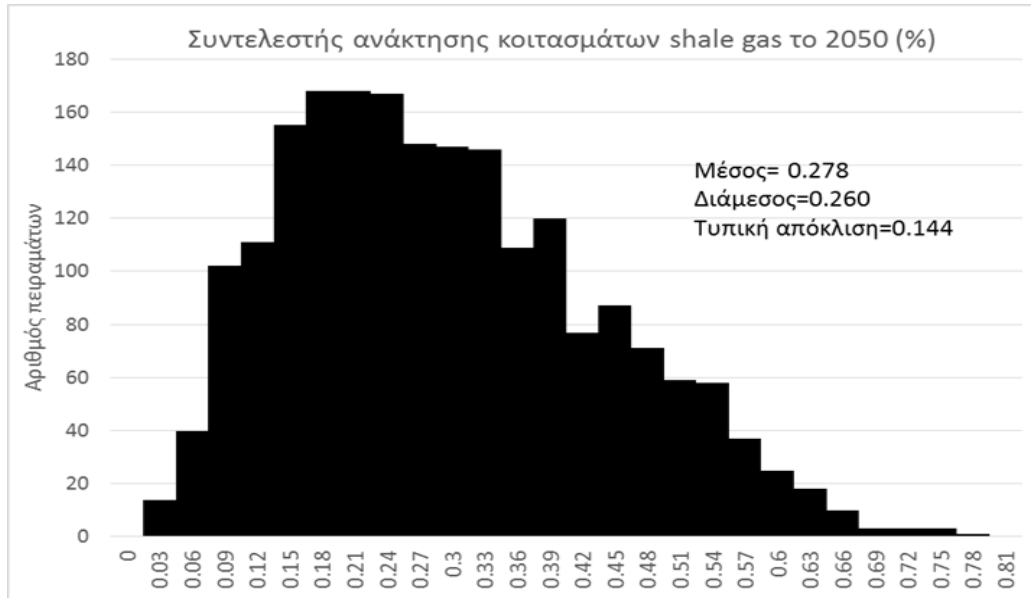
Γράφημα 7-27: Κατανομή των παγκόσμιων κοιτασμάτων σχιστολιθικού αερίου (δεδομένα εισόδου στο μοντέλο το έτος βάσης)



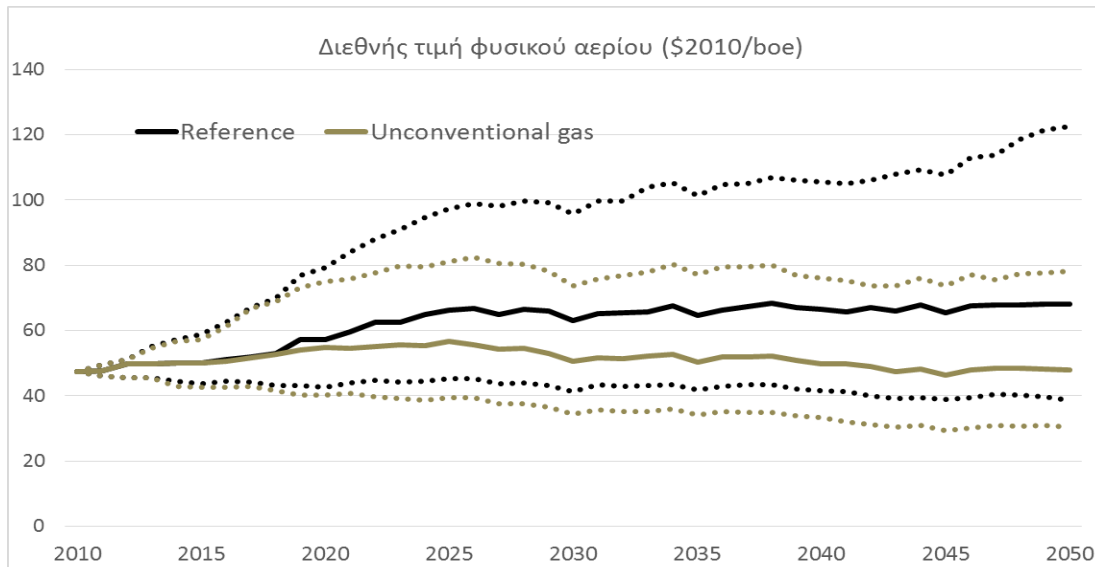
Το Γράφημα 7-28 παρουσιάζει την κατανομή του συντελεστή ανάκτησης για τα αποθέματα σχιστολιθικού αερίου το 2050 για το σενάριο υψηλής εκμετάλλευσης των μη συμβατικών κοιτασμάτων. Ο συντελεστής ανάκτησης λαμβάνει τιμές μεταξύ 10% και 40% (επί των συνολικών πόρων) και εξαρτάται από το κόστος εξόρυξης του αερίου, την βελτίωση των σχετικών τεχνολογιών και από την διεθνή τιμή αγοράς του φυσικού αερίου, η οποία υπολογίζεται ενδογενώς στο μοντέλο. Άρα, υπάρχει ανάδραση μεταξύ της παγκόσμιας τιμής του αερίου και του συντελεστή ανάκτησης, καθώς όσο αυξάνεται η παγκόσμια τιμή του αερίου, τόσο πιο συμφέρουσα γίνεται η εξόρυξη μεγαλύτερου μέρους των κοιτασμάτων σχιστολιθικού αερίου και συνεπώς αυξάνεται ο συντελεστής ανάκτησής του. Από την άλλη πλευρά, η μεγαλύτερη συνολική προσφορά φυσικού αερίου οδηγεί μέσω της εξίσωσης (16)-ενότητα 3.7 σε μείωση της διεθνούς τιμής (και συνεπώς σε σχετικά μικρότερο συντελεστή ανάκτησης). Τα συνολικά αποτελέσματα εξαρτώνται από ευρύτερες αναδράσεις μεταξύ παραγωγής, ζήτησης και τιμής των διαφόρων μορφών ενέργειας στα πλαίσια του ενεργειακού συστήματος σε παγκόσμιο επίπεδο. Σύμφωνα με Γράφημα 7-28, ο μέσος συντελεστής ανάκτησης σχιστολιθικού αερίου εκτιμάται σε 28% (διάμεσος=26%) τιμή η οποία βρίσκεται ιδιαίτερα κοντά στο μέσο των βιβλιογραφικών μελετών και αναλύσεων. Η τυπική απόκλιση του συντελεστή είναι ιδιαίτερα υψηλή (14.4%) εξαιτίας των εγγενών αβεβαιοτήτων που σχετίζονται με την τεχνολογική βελτίωση, το κόστος εξόρυξης και την διεθνή τιμή του αερίου. Τα 5% και 95% εκατοστημόρια του συντελεστή ανάκτησης βρίσκονται στις τιμές 0.075 και 0.53 αντίστοιχα. Ο μηχανισμός ανάδρασης παίζει εξισορροπητικό ρόλο και άρα οδηγεί σε μείωση της συνολικής αβεβαιότητας του συντελεστή ανάκτησης του σχιστολιθικού αερίου. Οι άλλες κατηγορίες μη συμβατικού αερίου έχουν γενικά μικρότερο συντελεστή ανάκτησης, αφού ο μέσος του έγκλειστου αερίου είναι 0.2 ενώ για το CBM μόλις 0.135

(13.5%) αντικατοπτρίζοντας το υψηλότερο κόστος εξόρυξης σε σύγκριση με το σχιστολιθικό αέριο και τις αυξημένες τεχνικές δυσκολίες.

Γράφημα 7-28: Κατανομή του συντελεστή ανάκτησης σχιστολιθικού αερίου το 2050, όπως προκύπτει από την στοχαστική ανάλυση του ΠΡΟΜΗΘΕΑ στο σενάριο μη συμβατικού αερίου



Το αποτέλεσμα της εισαγωγής σε μεγάλη κλίμακα μη συμβατικών κοιτασμάτων αερίου είναι η αύξηση προσφοράς αερίου σε παγκόσμιο επίπεδο καθώς τα κοιτάσματα εξερευνώνται και ένα κομμάτι μετατρέπεται σε βεβαιωμένα αποθέματα και σταδιακά παράγεται αν αυτό είναι οικονομικά αποδοτικό λαμβάνοντας υπόψη τις διεθνείς τιμές αερίου. Η αύξηση των παγκόσμιων αποθεμάτων και της προσφοράς αερίου οδηγεί σε μείωση της διεθνούς τιμής που εξαρτάται από την ισορροπία μεταξύ αποθεμάτων, παραγωγής και ζήτησης σε παγκόσμιο επίπεδο. Αυτό διακρίνεται στο Γράφημα 7-29, όπου η διάμεσος τιμή του αερίου στο σενάριο μη συμβατικού αερίου μειώνεται από τα επίπεδα αναφοράς κατά 20% το 2030 και κατά 30% το 2050 (από 68.2 \$ 2010/boe στο σενάριο αναφοράς σε μόλις 47.8 \$ 2010/boe στο σενάριο φυσικού αερίου). Η σχετική ποσοστιαία μείωση είναι παρόμοια και για τα άνω και κάτω 10% εκατοστημόρια της τιμής αερίου, εξαιτίας της εισαγωγής διαφοροποιημένων υποθέσεων μόνο στην αρχή της περιόδου προέκτασης του μοντέλου. Επιπλέον, το 2050 υπάρχει πιθανότητα 48% η διεθνής τιμή του φυσικού αερίου να είναι μικρότερη από το 2010, ενώ στο σενάριο αναφοράς η πιθανότητα αυτή εκτιμάται σε μόλις 24%.



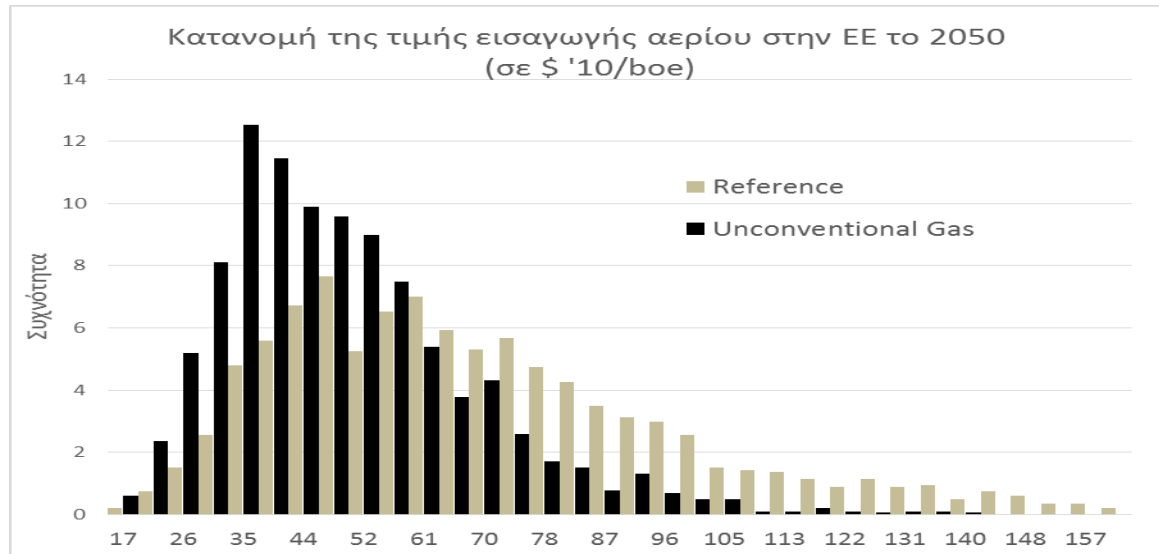
Γράφημα 7-29: Στοχαστικές προβολές του μοντέλου για την διάμεσο της διεθνούς τιμής αερίου για τα δυο εναλλακτικά σενάρια την περίοδο 2010-2050 (10% εκατοστημόρια με διακεκομμένη γραμμή)

Το Γράφημα 7-30 παρουσιάζει την κατανομή της τιμής εισαγωγής του φυσικού αερίου στην Ευρώπη το 2050 με βάση τη στοχαστική ανάλυση του μοντέλου. Είναι εμφανές ότι οι υποθέσεις για μεγάλη εκμετάλλευση των μη συμβατικών κοιτασμάτων αερίου οδηγεί σε αύξηση της παγκόσμιας προσφοράς και συνεπώς σε μείωση της τιμής εισαγωγής αερίου στην Ευρώπη, η οποία αγγίζει το 30% το 2050 σε σύγκριση με το σενάριο αναφοράς. Η κατανομή της τιμής δεν λαμβάνει κάποια προκαθορισμένη μορφή (κανονική) καθώς είναι αποτέλεσμα περίπλοκων αλληλεπιδράσεων και αναδράσεων μεταξύ προσφοράς, ζήτησης και τιμών ενέργειας στο πλαίσιο της λειτουργίας του παγκόσμιου ενεργειακού συστήματος υπό αβεβαιότητα. Οι κατανομές της τιμής όπως προκύπτουν από τα στοχαστικά αποτελέσματα του μοντέλου έχουν ασυμμετρία προς τα δεξιά (right skewed) με την μέση τιμή μεγαλύτερη από την αντίστοιχη διάμεση και το κομμάτι δεξιά του μέσου έχει περισσότερες παρατηρήσεις (μεγαλύτερες ουρές). Η δεξιά ασυμμετρία εξηγείται με βάση τις μικρές πιθανότητες για τιμές χαμηλότερες από μια τιμή ορίου δεδομένου ότι σε αυτές τις περιπτώσεις αυξάνεται σημαντικά η ζήτηση για αέριο και συνεπώς και η τιμή ισορροπίας στο παγκόσμιο επίπεδο.

Εκτός από μείωση της μέσης τιμής αερίου, τα μη συμβατικά κοιτάσματα οδηγούν σε σημαντική ελάττωση της διακύμανσης της κατανομής με τον συντελεστή μεταβλητότητας να μειώνεται από 0.49 στο σενάριο αναφοράς σε 0.39 στο σενάριο του μη συμβατικού αερίου. Επιπλέον, οι πιθανότητες η τιμή να ξεπεράσει το όριο των 100\$ 2010/ boe το 2050 μειώνονται από 30% στο σενάριο αναφοράς σε μόλις 4% στο σενάριο αερίου, καθώς η εκμετάλλευση των μη συμβατικών κοιτασμάτων σε παγκόσμιο επίπεδο δρα ως φρένο σε περιπτώσεις μεγάλων αυξήσεων των τιμών αερίου όπου ένα μεγάλο μέρος των παγκόσμιων μη συμβατικών κοιτασμάτων καθίσταται οικονομικά αποδοτικό να παραχθεί και άρα οδηγεί σε ελάττωση της τιμής.

Κεφάλαιο 7

Η παγκόσμια κατανάλωση αερίου του 2010 είναι κατά 17% μικρότερη από τον άνθρακα και 38% από το πετρέλαιο. Η στοχαστική ανάλυση δείχνει ότι στο σενάριο αναφοράς, ο μέσος ρυθμός αύξησης της ζήτησης αερίου είναι υψηλότερο από τα υπόλοιπα ορυκτά καύσιμα και συνεπώς η κατανάλωση αερίου έχει 84% πιθανότητα να ξεπεράσει τον άνθρακα και μόλις 2% το πετρέλαιο. Το σενάριο εκμετάλλευσης των μη συμβατικών κοιτασμάτων αερίου οδηγεί σε μεγαλύτερες πιθανότητες σε σύγκριση με το σενάριο αναφοράς (99% το αέριο να ξεπεράσει την κατανάλωση άνθρακα και 15% να ξεπεράσει το πετρέλαιο).

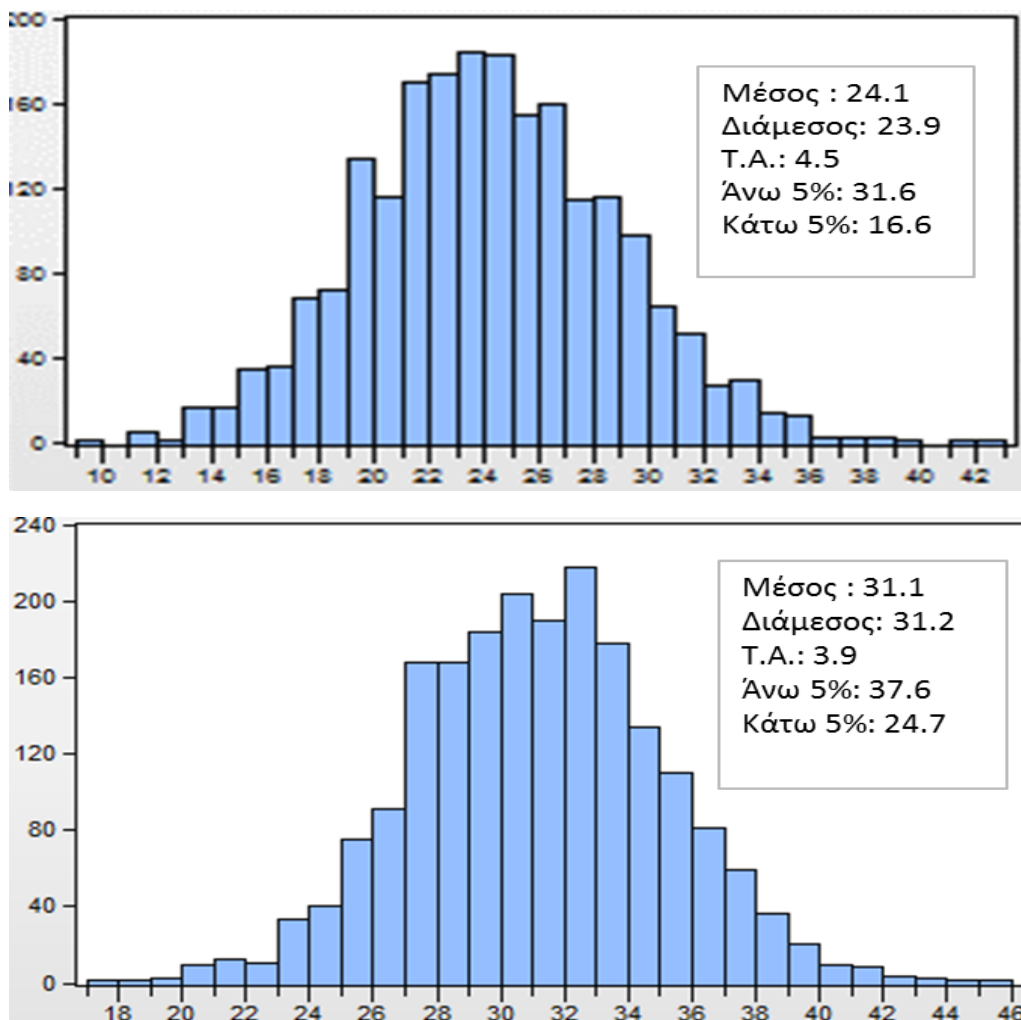


Γράφημα 7-30: Στοχαστικές προβολές του μοντέλου για την τιμή εισαγωγής αερίου στην Ευρώπη στα δυο εναλλακτικά σενάρια (σε \$ 2010/ boe)

Mtoe		2010	Σενάριο αναφοράς		Σενάριο μη συμβατικού αερίου		% μεταβολή	
			2030	2050	2030	2050	2030	2050
Gas	Mean	2670	4345	5612	4734	6850	8.9%	22.0%
	Median		4284	5513	4694	6738	9.6%	22.2%
	Low 10%		3537	4271	3836	5415	8.4%	26.8%
	Upper 10%		5214	7042	5668	8428	8.7%	19.7%
Oil	Mean	4281	5908	8753	5868	8707	-0.7%	-0.5%
	Median		5868	8690	5830	8631	-0.6%	-0.7%
	Low 10%		5117	6662	5086	6621	-0.6%	-0.6%
	Upper 10%		6732	10845	6695	10806	-0.6%	-0.4%
Coal	Mean	3235	4053	4116	3863	3779	-4.7%	-8.2%
	Median		4447	4214	4246	3851	-4.5%	-8.6%
	Low 10%		1766	2673	1682	2442	-4.8%	-8.7%
	Upper 10%		5363	5298	5099	4876	-4.9%	-8.0%

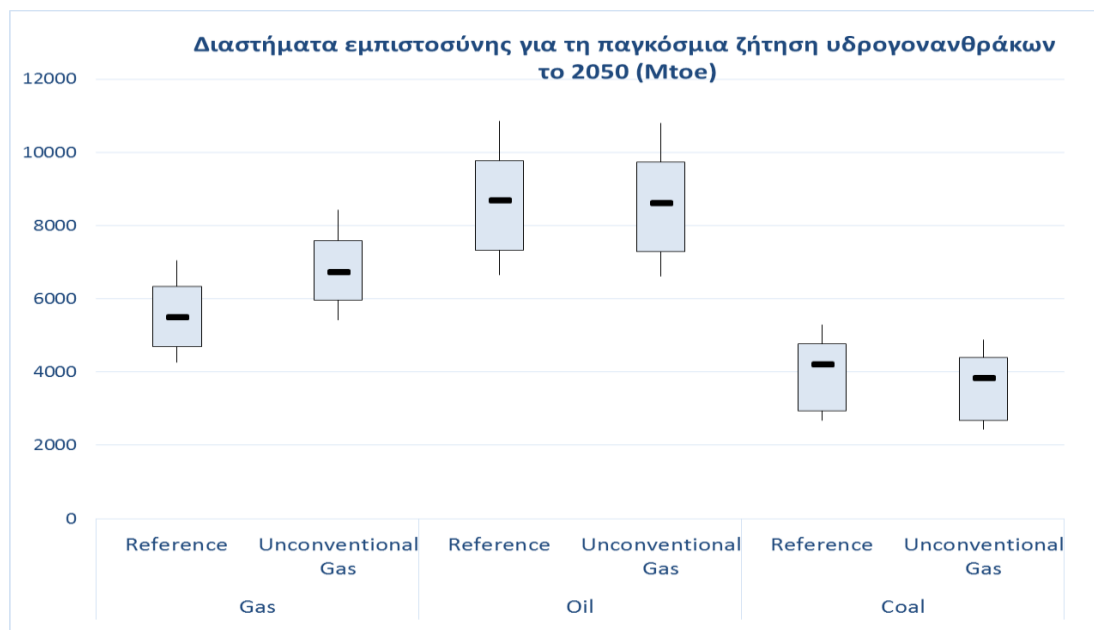
Πίνακας 7-17: Παγκόσμια ζήτηση για υδρογονάνθρακες με βάση τις στοχαστικές προεκτάσεις του μοντέλου στα δυο εναλλακτικά σενάρια το 2030 και το 2050 (σε Mtoe)

Το Γράφημα 7-31 παρουσιάζει την κατανομή πιθανοτήτων για το ποσοστό του φυσικού αερίου στην παγκόσμια ζήτηση ενέργειας το 2050 στα 2 εξεταζόμενα σενάρια. Το σενάριο του μη συμβατικού αερίου οδηγεί σε μεγαλύτερο ποσοστό αερίου με την μέση τιμή να αυξάνεται από 24.1% σε 31.1% το 2050. Αντίστοιχα αυξάνονται και τα υπόλοιπα χαρακτηριστικά της κατανομής (διάμεσος, εκατοστημόρια). Από την άλλη πλευρά, ο συντελεστής μεταβλητότητας (δηλαδή ο λόγος της τυπικής απόκλισης προς το μέσο της κατανομής) μειώνεται σημαντικά από 0.187 (σενάριο αναφοράς) σε 0.125 (σενάριο μη συμβατικού φυσικού αερίου). Οι εξισορροπητικοί παράγοντες που έχουν ενσωματωθεί στο μοντέλο με τις αναδράσεις και αλληλεπιδράσεις μεταξύ προσφοράς, ζήτησης και τιμών ενέργειας σε παγκόσμιο και εθνικό επίπεδο οδηγούν σε μείωση της αβεβαιότητας για την εξέλιξη της αγοράς αερίου. Επιπλέον, το μοντέλο υποθέτει ότι σε περίπτωση που η διεθνής τιμή του φυσικού αερίου αυξηθεί πάνω από ένα όριο, τότε η εκμετάλλευση μη συμβατικών κοιτασμάτων (που έχουν μεγαλύτερο κόστος εξόρυξης) αυξάνεται σημαντικά και συνεπώς η διεθνής τιμή μειώνεται.



Γράφημα 7-31: Στοχαστικές προβολές του μοντέλου για το ποσοστό φυσικού αερίου στη παγκόσμια ζήτηση ενέργειας στο σενάριο αναφοράς (πάνω γράφημα) και στο σενάριο μη συμβατικού αερίου (κάτω διάγραμμα)

Το Γράφημα 7-32 παρουσιάζει το διάστημα εμπιστοσύνης μεταξύ 10% και 90% εκατοστημορίων της κατανομής πιθανοτήτων για την παγκόσμια ζήτηση πετρελαίου, φυσικού αερίου και άνθρακα το 2050 στα δυο σενάρια που εξετάστηκαν. Διακρίνεται η μείωση του εύρους του διαστήματος και άρα η μείωση της διακύμανσης για το αέριο στο σενάριο των μη συμβατικών κοιτασμάτων. Ο συντελεστής μεταβλητότητας είναι μεγαλύτερος για την παγκόσμια ζήτηση άνθρακα η οποία εξαρτάται καθοριστικά από τις κλιματικές πολιτικές που υπόκεινται σε ιδιαίτερα μεγάλη αβεβαιότητα. Η αβεβαιότητα για την κατανάλωση πετρελαίου εξαρτάται κυρίως από την διακύμανση της διεθνούς τιμής του και από το βαθμό διείσδυσης μη συμβατικών αυτοκίνητων (ηλεκτρικά, υβριδικά κ.α.) στον παγκόσμιο στόλο μετά το 2030.



Γράφημα 7-32: Διαστήματα εμπιστοσύνης για την παγκόσμια ζήτηση υδρογονανθράκων το 2050 όπως προέκυψαν από την στοχαστική ανάλυση του μοντέλου στα δυο σενάρια

Σημείωση: το κουτί Box plot δηλώνει τα διάστημα μεταξύ 20% και 80% της κατανομής, η οριζόντια γραμμή αναπαριστά την διάμεσο ενώ οι κάθετες γραμμές τα 10% και 90% εκατοστημόρια

Ο Πίνακας 7-18 παρουσιάζει την επίδραση του σεναρίου εκμετάλλευσης του μη συμβατικού φυσικού αερίου στις διεθνείς τιμές των υδρογονανθράκων. Όπως ήδη αναφέρθηκε, η μείωση της τιμής του αερίου (από το σενάριο αναφοράς) εκτιμάται σε 20% το 2030 και 30% το 2050 κατά μέσο όρο, ενώ η ποσοστιαία μεταβολή είναι σχετικά η ίδια για τα άνω και κάτω 10% εκατοστημόρια. Η διεθνής τιμή του πετρελαίου επίσης μειώνεται (6% το 2050 μέσος όρος) εξαιτίας αφενός της μειωμένης παγκόσμιας ζήτησης πετρελαίου (που υποκαθίσταται από το φθηνότερο φυσικό αέριο) και της αύξησης της προσφοράς αφού υπάρχει συσχέτιση με τα παγκόσμια κοιτάσματα αερίου. Από την άλλη πλευρά, η μείωση των διεθνών τιμών του άνθρακα είναι σημαντική (17% κατά μέσο όρο το 2050) καθώς η παγκόσμια κατανάλωση άνθρακα είναι 8.5% μικρότερη σε σύγκριση με το σενάριο αναφοράς. Επιπλέον, η πτώση της διεθνούς τιμής

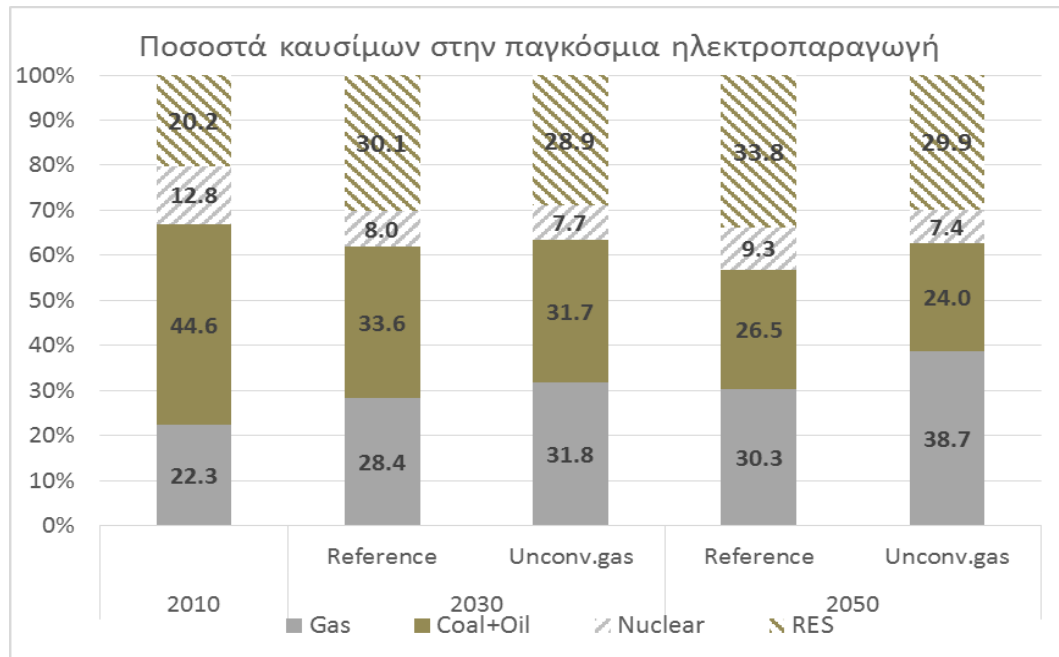
του πετρελαίου οδηγεί σε μείωση της τιμής άνθρακα, εξαιτίας του χαμηλότερου κόστους μεταφοράς μεταξύ των περιοχών. Ο ενδογενής μηχανισμός αναπαράστασης των αλληλεπιδράσεων και αλληλεξαρτήσεων μεταξύ της παγκόσμιας προσφοράς, ζήτησης και τιμών των υδρογονανθράκων λειτουργεί σαν ανάδραση («φρένο») που αμβλύνει τις επιπτώσεις από μεταβολές στις υποθέσεις του μοντέλου. Συγκεκριμένα, η μείωση των τιμών πετρελαίου και άνθρακα που προκαλείται από την μεγάλης κλίμακας εκμετάλλευση των μη συμβατικών κοιτασμάτων φυσικού αερίου οδηγεί σε σχετικά περιορισμένη μείωση της παγκόσμιας κατανάλωσής τους από τα επίπεδα του σεναρίου αναφοράς (συγκριτικά με την περίπτωση όπου οι διεθνείς τιμές είναι εξωγενείς).

		2010	Σενάριο αναφοράς		Σενάριο μη συμβατικού αερίου		% μεταβολή	
			2030	2050	2030	2050	2030	2050
Oil price (\$'10/boe)	Median	79.5	90.1	99.4	87.9	93.3	-2%	-6%
	Upper 10%		152.7	174.2	149.1	170.8	-2%	-2%
	Lower 10%		57.2	59.9	56.5	55.5	-1%	-7%
Gas price (\$10/boe)	Median	47.5	62.9	68.2	50.5	47.8	-20%	-30%
	Upper 10%		93.2	108.6	73.6	78.1	-21%	-28%
	Lower 10%		42.9	42.3	34.5	30.4	-20%	-28%
Coal price (\$ 10/tn)	Median	85.8	101.9	103.0	88.1	85.1	-14%	-17%
	Upper 10%		178.8	196.3	159.4	163.6	-11%	-17%
	Lower 10%		60.5	53.7	54.3	48.0	-10%	-11%

Πίνακας 7-18: Στοχαστικές προεκτάσεις του μοντέλου για τις διεθνείς τιμές των υδρογονανθράκων στα 2 εναλλακτικά σενάρια την περίοδο 2010-2050

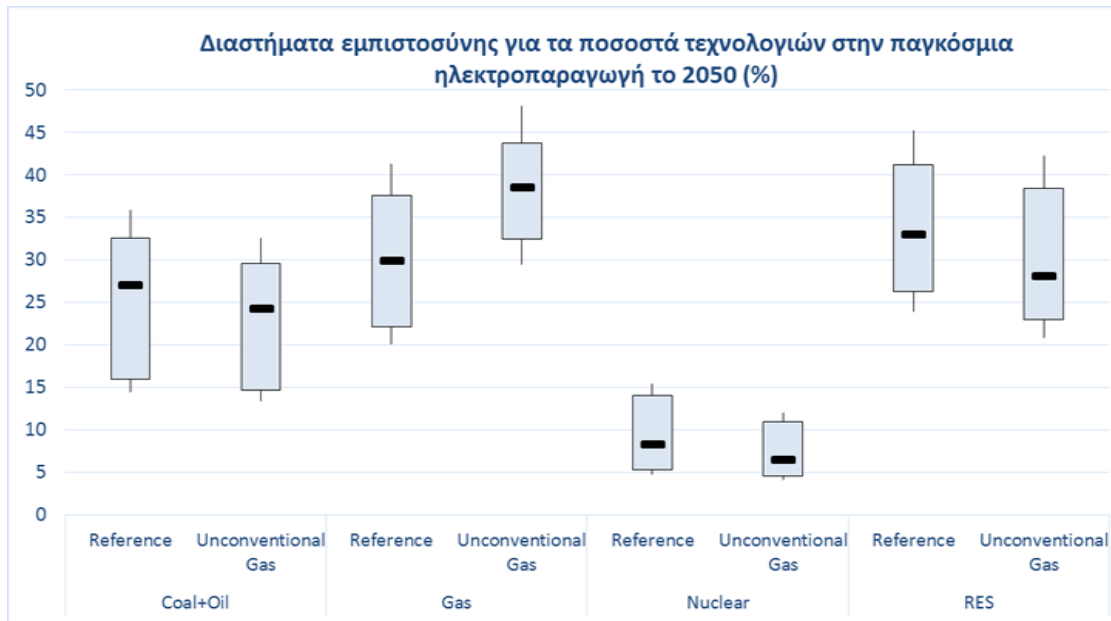
Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας αποτελεί έναν τομέα στον οποίο το σενάριο μη συμβατικού φυσικού αερίου έχει ιδιαίτερα μεγάλη επίδραση, εξαιτίας των πολλών εναλλακτικών τεχνολογικών επιλογών και της μεγάλης σημασίας του λόγου των τιμών φυσικού αερίου προς άνθρακα για τις επενδύσεις. Σύμφωνα με το Γράφημα 7-33, στο σενάριο αναφοράς το ποσοστό του φυσικού αερίου στην παγκόσμια παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας προβλέπεται να αυξηθεί από 22.3% το 2010 σε 28.4% το 2030 και 30.3% το 2050 (κατά μέσο όρο), με παράλληλη μείωση του ποσοστού του άνθρακα, του πετρελαίου και των πυρηνικών και αύξηση των ΑΠΕ. Στο σενάριο μη συμβατικού αερίου, το ποσοστό του αερίου στην παγκόσμια παραγωγή ηλεκτρισμού αυξάνεται από τα επίπεδα του σεναρίου αναφοράς εξαιτίας της μείωσης της διεθνούς τιμής, η οποία διαχέεται στους τελικούς καταναλωτές. Συγκεκριμένα, το 2030 το μέσο ποσοστό του αερίου αυξάνεται κατά 3.4% και το 2050 κατά 8.4%, ενώ το διάστημα εμπιστοσύνης μεταξύ των 10% και 90% εκατοστημορίων αυξάνεται από [20%, 40%] σε [30%, 48%]. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η κατανομή της μείωσης των άλλων καυσίμων μεσοπρόθεσμα και μακροπρόθεσμα. Την περίοδο 2020-2030 ο άνθρακας επηρεάζεται περισσότερο από την μείωση της τιμής του αερίου και συνεπώς το μέσο ποσοστό του μειώνεται κατά 1.7% το 2030 (ευθύνεται για περισσότερο από το 50% της αύξησης του ποσοστού του αερίου) εξαιτίας της μεγάλης σημασίας του στην ηλεκτροπαραγωγή και

του ανταγωνισμού του με το αέριο. Από την άλλη πλευρά, ο φόρος στο διοξείδιο του άνθρακα αυξάνεται μετά το 2030 ενώ οι ΑΠΕ είναι η κύρια μορφή παραγωγής στο σενάριο αναφοράς το 2050. Συνεπώς, το σενάριο του μη συμβατικού αερίου οδηγεί σε μεγάλη μείωση του ποσοστού των ΑΠΕ στο παγκόσμιο μίγμα ηλεκτροπαραγωγής το 2050 (4% κατά μέσο όρο), ενώ η επίπτωση είναι μικρότερη για τον άνθρακα (-2.2 ποσοστιαίες μονάδες κατά μέσο όρο) και για την πυρηνική ενέργεια (-1.9 μονάδες).



Γράφημα 7-33: Μέσα ποσοστά των τεχνολογιών στο παγκόσμιο μίγμα ηλεκτροπαραγωγής το 2030 και το 2050 (με βάση την στοχαστική ανάλυση με το μοντέλο για τα σενάρια που εξετάστηκαν)

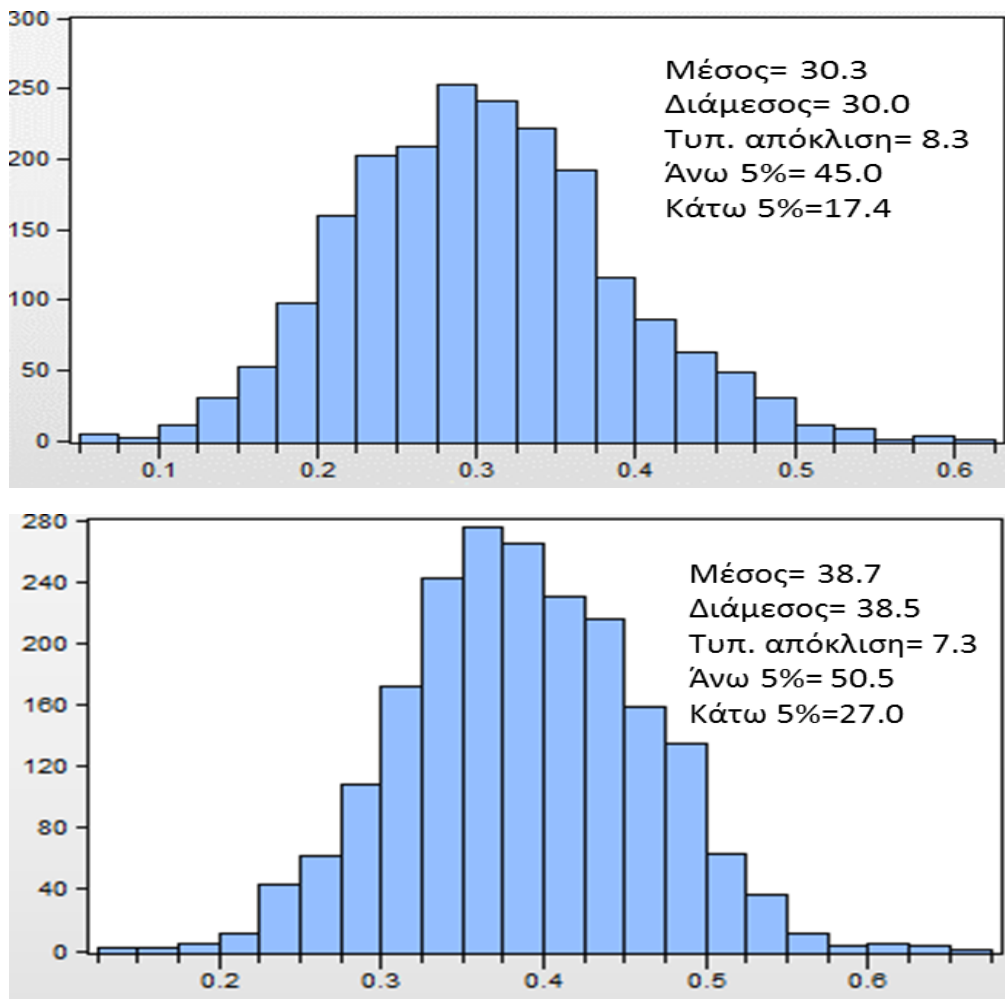
Στο Γράφημα 7-34 διακρίνονται τα 10%-90% διαστήματα εμπιστοσύνης των κατανομών για τα ποσοστά τεχνολογιών στην παγκόσμια ηλεκτροπαραγωγή το 2050 με εμφανή αύξηση του ποσοστού του αερίου από το σενάριο αναφοράς και μείωση της διακύμανσής του (όπως αναλύθηκε παραπάνω). Επιπλέον, τα ποσοστά των υπολοίπων τεχνολογιών ηλεκτροπαραγωγής μειώνονται από το σενάριο αναφοράς και ιδιαίτερα οι ΑΠΕ έχουν την μεγαλύτερη μέση μείωση το 2050 καθώς μακροπρόθεσμα ο κύριος ανταγωνιστής του συνδυασμένου κύκλου φυσικού αερίου είναι οι ΑΠΕ ειδικά σε περιπτώσεις υψηλών φόρων στο διοξείδιο του άνθρακα.



Γράφημα 7-34: Διαστήματα εμπιστοσύνης για τα ποσοστά τεχνολογιών στην παγκόσμια παραγωγή ηλεκτρισμού το 2050 όπως προέκυψαν από την στοχαστική ανάλυση στα δυο σενάρια

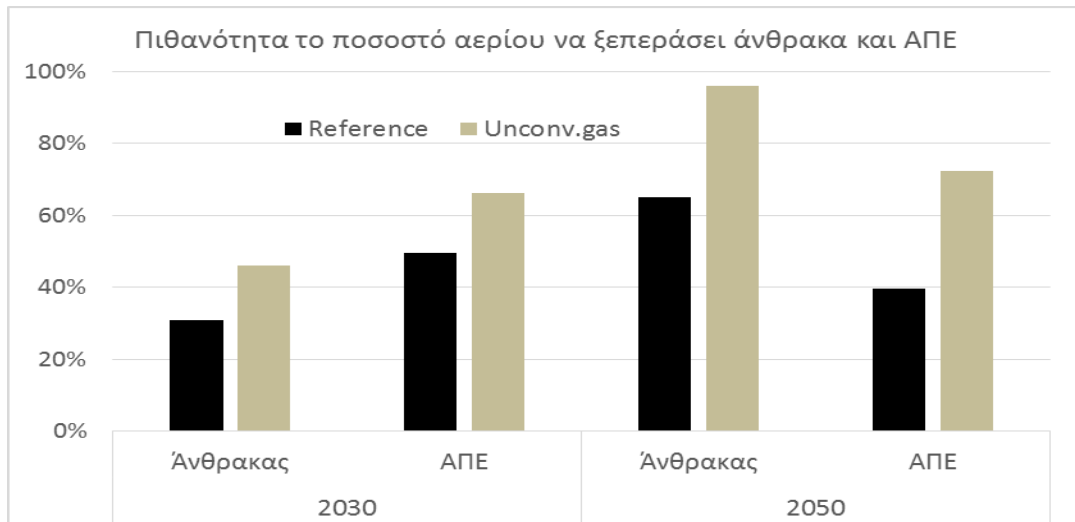
Σημείωση: το κουτί Box plot δηλώνει τα διάστημα μεταξύ 20% και 80% της κατανομής, η οριζόντια γραμμή αναπαριστά την διάμεσο ενώ οι κάθετες γραμμές τα 10% και 90% εκατοστημόρια

Το Γράφημα 7-35 παρουσιάζει τις κατανομές των ποσοστών φυσικού αερίου στην παγκόσμια ηλεκτροπαραγωγή το 2050 στα δυο εναλλακτικά σενάρια. Το σενάριο του μη συμβατικού αερίου οδηγεί σε σημαντική αύξηση όλης της κατανομής προς υψηλότερες τιμές. Συγκεκριμένα, ο μέσος αυξάνεται κατά 8.4 ποσοστιαίες μονάδες το 2050 (και η διάμεσος κατά 8.5 μονάδες). Η μεγαλύτερη εκμετάλλευση κοιτασμάτων φυσικού αερίου σε παγκόσμιο επίπεδο οδηγεί επίσης σε μείωση του συντελεστή της μεταβλητότητας της κατανομής ο οποίος μειώνεται από 0.274 στο σενάριο αναφοράς σε 0.19 στο σενάριο μη συμβατικού αερίου. Αυτό εξηγείται μέσω των μηχανισμών ανάδρασης μεταξύ των παραγόντων του ενεργειακού συστήματος (ζήτηση-προσφορά-τιμές), της ύπαρξης ορίου στην διείσδυση αερίου στο μίγμα ηλεκτροπαραγωγής (π.χ. εξαιτίας των ΑΠΕ με χαμηλά μεταβλητά κόστη, των πυρηνικών) και της μικρότερης απόκλισης στην διεθνή τιμή του αερίου (εξαιτίας του «φρένου» σε πολύ μεγάλες τιμές που προκαλείται από τα μη συμβατικά κοιτάσματα).



Γράφημα 7-35: Κατανομές ποσοτών φυσικού αερίου στην παγκόσμια ηλεκτροπαραγωγή το 2050 με βάση τη στοχαστική ανάλυση με το μοντέλο (πάνω: σενάριο αναφοράς, κάτω: σενάριο αερίου)

Στο σενάριο αναφοράς, η πιθανότητα ότι το φυσικό αέριο θα ξεπεράσει τον άνθρακα στην παγκόσμια ηλεκτροπαραγωγή αυξάνονται συνεχώς από 5% το 2020 σε 31% το 2030 και 64% το 2050 (Γράφημα 7-36). Στο σενάριο μη συμβατικού αερίου, οι πιθανότητες αυτές είναι ακόμα μεγαλύτερες και προσεγγίζουν το επίπεδο των 46% το 2030 και 96% το 2050 (σχεδόν βεβαιότητα). Η εισαγωγή κλιματικών πολιτικών (τιμής άνθρακα) σε συνδυασμό με την σταδιακή μείωση του κόστους των ΑΠΕ οδηγεί σε 60% πιθανότητα οι ΑΠΕ να ξεπεράσουν το φυσικό αέριο το 2050 (και 69% να ξεπεράσουν το ποσοστό του άνθρακα). Από την άλλη πλευρά, η μειωμένη διεθνής τιμή του αερίου στο σενάριο εκμετάλλευσης μη συμβατικών κοιτασμάτων σημαίνει ότι η πιθανότητα οι ΑΠΕ να ξεπεράσουν το ποσοστό του αερίου στην παγκόσμια ηλεκτροπαραγωγή μειώνεται δραστικά από 60% στο σενάριο αναφοράς σε μόλις 28% το 2050.



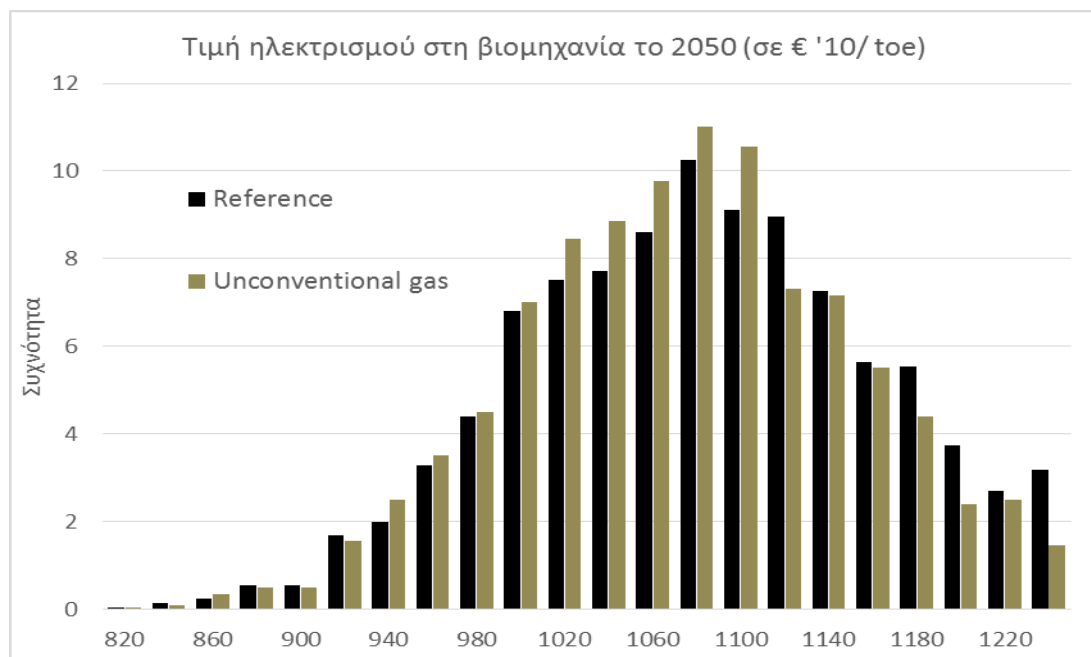
Γράφημα 7-36: Πιθανότητα το ποσοστό του αερίου να ξεπεράσει τα άλλα καύσιμα όπως προέκυψε από την στοχαστική ανάλυση του μοντέλου για τα δυο εξεταζόμενα σενάρια το 2030 και το 2050

Το σενάριο εκμετάλλευσης των μη συμβατικών κοιτασμάτων φυσικού αερίου οδηγεί σε μεταβολές του κόστους των τεχνολογιών ηλεκτροπαραγωγής εξαιτίας της μεταβολής των τιμών των καυσίμων καθώς και ευρύτερων αλλαγών στο ενεργειακό σύστημα (π.χ. χαμηλότερες τιμές ηλεκτρικής ενέργειας για καταναλωτές, μεταβολές μίγματος ηλεκτροπαραγωγής κ.α.). Στο σενάριο αναφοράς, η αύξηση των διεθνών τιμών άνθρακα σε συνδυασμό με την εισαγωγή φόρου άνθρακα (που επηρεάζει κυρίως τις τεχνολογίες καύσης άνθρακα και λιγνίτη) οδηγεί σε αυξημένη ανταγωνιστικότητα του αερίου, το οποίο έχει πιθανότητα 18% το 2020, 41% το 2030 και 63% το 2050 να είναι φθηνότερο από τον άνθρακα για κάλυψη μέσου φορτίου (Πίνακας 7-19). Από την άλλη πλευρά, οι τεχνολογίες μηδενικών εκπομπών άνθρακα επωφελούνται από την εισαγωγή κλιματικών πολιτικών και από την μείωση κόστους (κυρίως οι ΑΠΕ μέσω του μηχανισμού εκμάθησης) και η ανταγωνιστικότητά τους βελτιώνεται μακροπρόθεσμα σε σχέση με τις τεχνολογίες καύσης υδρογονανθράκων. Η μείωση της τιμής του αερίου στο σενάριο οδηγεί σε αύξηση των πιθανοτήτων η τεχνολογία συνδυασμένου κύκλου να έχει χαμηλότερο κόστος από τις ανταγωνιστικές επιλογές; Η βελτίωση είναι σχετικά ανάλογη με την μεταβολή της τιμής του φυσικού αερίου και συνεπώς είναι μεγαλύτερη μακροπρόθεσμα. Συγκεκριμένα, το 2050, το κόστος της τεχνολογίας αερίου έχει 76% πιθανότητα να είναι μικρότερο από τον άνθρακα και την ηλιακή ενέργεια, 63% από τις ανεμογεννήτριες και 58% από τους πυρηνικούς σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής.

		Άνθρακας	Πυρηνική	Αιολική	Ηλιακή
Σενάριο Αναφοράς	2030	41%	51%	71%	84%
	2050	63%	45%	51%	63%
Μη συμβατικό αέριο	2030	50%	60%	79%	93%
	2050	76%	58%	63%	76%

Πίνακας 7-19: Πιθανότητα το κόστος του συνδυασμένου κύκλου αερίου να είναι χαμηλότερο από ανταγωνιστικές τεχνολογίες με βάση τα στοχαστικά αποτελέσματα του μοντέλου

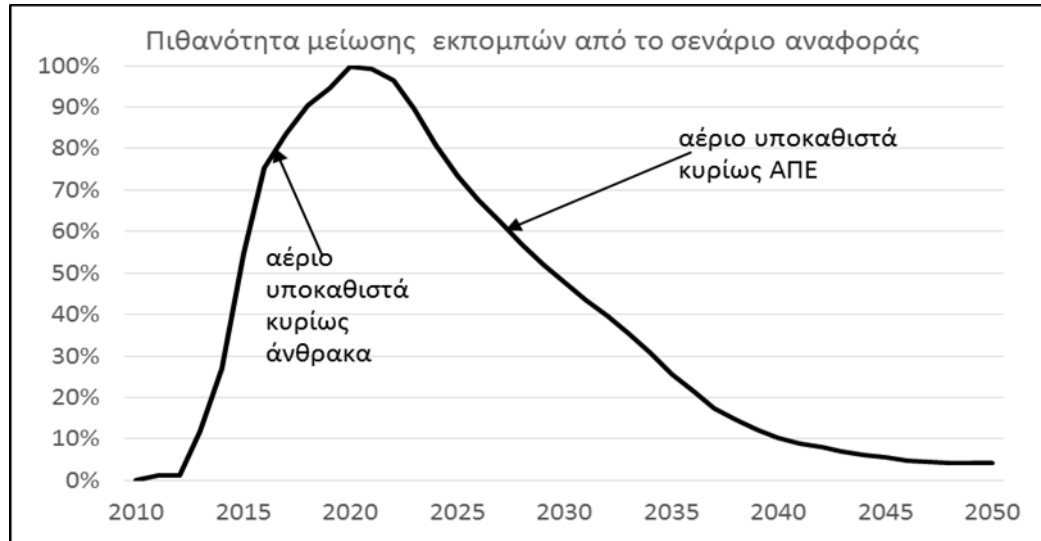
Το σενάριο υψηλής εκμετάλλευσης των μη συμβατικών κοιτασμάτων αερίου οδηγεί σε μείωση κατά 1.2% (κατά μέσο όρο) της τιμής πώλησης ηλεκτρισμού στην ΕΕ για βιομηχανικές χρήσεις σε σχέση με το σενάριο αναφοράς το 2050. Η μέση επίδραση είναι ορατή αλλά όχι ιδιαίτερα μεγάλη καθώς οι μεταβολές των τιμών των καυσίμων έχουν περιορισμένη επίπτωση στο κόστος παραγωγής ηλεκτρισμού (που επηρεάζει την εξέλιξη των τιμών πώλησης) το οποίο εξαρτάται από το μίγμα των τεχνολογιών και από το κόστος των επενδύσεων. Από την άλλη πλευρά, το σενάριο μη συμβατικού αερίου οδηγεί σε σημαντική μείωση της διακύμανσης της κατανομής πιθανοτήτων με τον συντελεστή μεταβλητότητας να ελαττώνεται κατά 10% από τα επίπεδα του σεναρίου αναφοράς.



Γράφημα 7-37: Κατανομή τιμής ηλεκτρικής ενέργειας στην ΕΕ για βιομηχανικές χρήσεις το 2050 στα δυο σενάρια που εξετάστηκαν

Η υψηλή εκμετάλλευση των μη συμβατικών κοιτασμάτων φυσικού αερίου έχει σημαντικές επιπτώσεις στις παγκόσμιες εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα εξαιτίας των αλλαγών στις διεθνείς τιμές καυσίμων και των μεταβολών στην δομή του ενεργειακού συστήματος, όπως αναλύθηκαν παραπάνω. Βραχυπρόθεσμα, η αύξηση της παγκόσμιας ζήτησης αερίου (εξαιτίας της αυξημένης προσφοράς σε παγκόσμιο επίπεδο) οδηγεί σε υποκαταστάσεις καυσίμων με υψηλότερη ένταση εκπομπών (άνθρακας και πετρέλαιο) σε όλους τους τομείς του ενεργειακού συστήματος (κυρίως στην ηλεκτροπαραγωγή και στην βιομηχανική ζήτηση). Συνεπώς, οι μέσες παγκόσμιες εκπομπές άνθρακα το 2020 μειώνονται κατά 1.1% σε σύγκριση με το σενάριο αναφοράς, ενώ η πιθανότητα χαμηλότερων εκπομπών προσεγγίζει το 100% (Γράφημα 7-38). Από την άλλη πλευρά, μακροπρόθεσμα η αυξημένη διείσδυση του φυσικού αερίου ιδιαίτερα στον τομέα της ηλεκτροπαραγωγής τείνει να υποκαθιστά ενεργειακές μορφές μηδενικών εκπομπών (ΑΠΕ και πυρηνική ενέργεια) καθώς οι διεθνείς τιμές του πετρελαίου και του άνθρακα

μειώνονται από τα επίπεδα αναφοράς μέσω του μηχανισμού ενδογενούς διαμόρφωσης των τιμών. Συνεπώς η πιθανότητα μείωσης των παγκόσμιων εκπομπών CO₂ από 100% το 2020 μειώνεται σε 49% το 2030, 10% το 2040 και μόλις 4% το 2050. Η μέση αύξηση των εκπομπών CO₂ στο σενάριο του μη συμβατικού αερίου σε σύγκριση με το σενάριο αναφοράς υπολογίζεται σε 0.1% το 2030, 1.3% το 2040 και 2.9% το 2050.



Γράφημα 7-38: Πιθανότητα οι παγκόσμιες εκπομπές CO₂ στο σενάριο του μη συμβατικού αερίου να ελαττωθούν σε σύγκριση με το σενάριο αναφοράς την περίοδο 2010-2050 (όπως προέκυψε από τα στοχαστικά αποτελέσματα του μοντέλου)

Η ντετερμινιστική ανάλυση με μοντέλα ενέργειας-οικονομίας δεν είναι η πλέον κατάλληλη μέθοδος για να ποσοτικοποιήσει θέματα ασφάλειας του ενεργειακού εφοδιασμού και συνήθως καταφεύγει σε έμμεσα μέτρα, όπως η διαφοροποίηση των καυσίμων και το ποσοστό εξάρτησης από εισαγωγές ενέργειας, ώστε να αξιολογήσει τις επιπτώσεις των εναλλακτικών σεναρίων στην ενεργειακή ασφάλεια. Είναι σαφές, ωστόσο, ότι η υψηλή εξάρτηση από τις εισαγωγές δεν είναι απαραίτητο να συνεπάγεται επιδείνωση στην ασφάλεια εφοδιασμού, η οποία εξαρτάται από τη σταθερότητα και την αξιοπιστία της περιοχής που εξάγει ενέργεια, καθώς οι μεγαλύτεροι εξαγωγείς πετρελαίου και φυσικού αερίου είναι περιοχές με μεγάλη οικονομική, κοινωνική και πολιτική αβεβαιότητα (Μέση Ανατολή, Β. Αφρική, Ρωσία, Κασπία). Επιπλέον, ακόμη και η εξάρτηση από επισφαλείς πηγές είναι δυνατό να αντιπροσωπεύει ένα σχετικά μικρό κίνδυνο στην περίπτωση που υπάρχει διαθεσιμότητα εναλλακτικών επιλογών σε εύλογο χρονικό διάστημα. Επίσης, η μικρή διαφοροποίηση των εναλλακτικών πηγών ενέργειας δεν αποτελεί πρόβλημα ασφαλείας όταν οι εισαγωγές συγκεντρώνονται σε σχετικά ασφαλείς πηγές (π.χ. προμήθεια αερίου της ΕΕ από την Νορβηγία).

Η έννοια του κινδύνου είναι κεντρικής σημασίας για τις εκτιμήσεις ασφαλείας του ενεργειακού εφοδιασμού και το στοχαστικό μοντέλο είναι το κατάλληλο εργαλείο για να αντιμετωπίσει τα ζητήματα αυτά, καθώς μπορεί να ποσοτικοποιήσει με ακρίβεια κατανομές πιθανοτήτων για σημαντικές μεταβλητές (π.χ. την πιθανότητα ότι η τιμή ενός εισαγόμενου καυσίμου ή το συνολικό κόστος εισαγωγής ενέργειας να αυξηθεί σε

συγκεκριμένο ποσοστό). Η ετήσια ανάλυση επιτρέπει την εξέταση κινδύνων σε ετήσια βάση, κάτι που δεν γίνεται στα περισσότερα μοντέλα ενέργειας-οικονομίας. Ωστόσο ακόμα και η ετήσια ανάλυση δεν είναι αντιπροσωπευτική των βραχυχρόνιων κινδύνων, οι οποίοι προκαλούνται από έντονες διακυμάνσεις στις τιμές των καυσίμων στην διάρκεια μιας χρονιάς. Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι το 2008 στην διάρκεια του οποίου η τιμή του Brent είχε ιδιαίτερα υψηλή μεταβλητότητα με υψηλότερη τιμή τα 144 \$ ανά βαρέλι, ενώ η χαμηλότερη τιμή ήταν μόλις τα 34 \$, ενώ κατά την διάρκεια του 2^{ου} εξαμήνου 2014 η τιμή του πετρελαίου έχασε περισσότερο από 50% της αξίας της.

Η στοχαστική ανάλυση με βάση τα αποτελέσματα του PROMHΘΕΑ μπορεί να συνθέσει τους κινδύνους που συνδέονται με την παγκόσμια και περιφερειακή ζήτηση καυσίμων, τις γεωλογικές αβεβαιότητες όσον αφορά το μέγεθος και την γεωγραφική κατανομή των κοιτασμάτων καυσίμων και τον κίνδυνο διαταραχών του ενεργειακού εφοδιασμού, που εκφράζεται σαν μειώσεις των παραγωγικών ικανοτήτων, κυρίως στις πολιτικά και κοινωνικά ασταθείς περιοχές. Το μέτρο ασφάλειας ενεργειακού εφοδιασμού που εξετάζεται είναι η μέγιστη αύξηση στην διεθνή τιμή του πετρελαίου και του φυσικού αερίου σε οποιαδήποτε περίοδο 3 ετών μέχρι το 2050. Στο σενάριο αναφοράς, η μέση τιμή της αύξησης των διεθνών τιμών σε περίοδο 3 ετών προβλέπεται να είναι 61 € '10, ενώ υπάρχει πιθανότητα 71% ότι η αύξηση θα είναι μεγαλύτερη από την αύξηση των τιμών κατά την περίοδο της πετρελαϊκής κρίσης 1979-1981; η αύξηση των τιμών στην εν λόγω περίοδο ήταν 48 € '10 ανά βαρέλι. Το σενάριο μη συμβατικού αερίου οδηγεί σε μείωση των διεθνών τιμών και άρα η παραπάνω πιθανότητα μειώνεται από 71% σε 56% (αύξηση ανά τριετία). Συνεπώς, η ασφάλεια ενεργειακού εφοδιασμού για τους εισαγωγείς ενέργειας (ΕΕ, Κίνα, Ιαπωνία, Ινδία) βελτιώνεται σε μεγάλο βαθμό σε σύγκριση με το σενάριο αναφοράς. Από την άλλη πλευρά, η στοχαστική προβολή αναφοράς οδηγεί σε υψηλότερες τιμές κατά μέσο όρο από την περίοδο του 1980. Σε όρους ποσοστιαίας μεταβολής, η κρίση της περιόδου '79 -'81 οδήγησε σε αύξηση 140% των διεθνών τιμών. Η πιθανότητα ότι αυτή η αύξηση θα ξεπεραστεί κάποια στιγμή μέχρι το 2050 εκτιμάται σε 17% στο σενάριο αναφοράς και σε μόλις 5% στο σενάριο εκμετάλλευσης του μη συμβατικού φυσικού αερίου.

Κεφάλαιο 8

8. Συμπεράσματα-Προοπτικές

8.1 Επιστημονικό Αντικείμενο της διατριβής

Το επιστημονικό αντικείμενο της παρούσας διατριβής αφορά το σχεδιασμό και την κατασκευή ενός πρωτότυπου παγκόσμιου στοχαστικού μοντέλου ενεργειακής και οικονομικής ανάλυσης με την ονομασία PROMHΘΕΑΣ. Στην διατριβή αναλύονται και υλοποιούνται εφαρμογές με σκοπό την ολοκληρωμένη ανάλυση της αβεβαιότητας για την εξέλιξη του παγκόσμιου ενεργειακού συστήματος και την αξιολόγηση κινδύνων για τις επενδύσεις στην ηλεκτροπαραγωγή.

Ο σκοπός του σχεδιασμού και της κατασκευής του μοντέλου αφορά κυρίως την εφαρμογή του στα θέματα ανάλυσης ενεργειακών και κλιματικών πολιτικών και διαμόρφωσης των διεθνών τιμών για τα ορυκτά καύσιμα τόσο στον βραχυπρόθεσμο όσο και μακροπρόθεσμο ορίζοντα. Η ανάλυση με βάση τον PROMHΘΕΑ έχει σκοπό την ενδεδειγμένη ποσοτικοποίηση των αβεβαιοτήτων για τις μελλοντικές προοπτικές του παγκόσμιου ενεργειακού συστήματος και την εξέταση των επιπτώσεων εναλλακτικών σεναρίων στα πλαίσια αντιμετώπισης της κλιματικής αλλαγής και διαφοροποιημένων υποθέσεων για τα κοιτάσματα υδρογονανθράκων. Η εφαρμογή του μοντέλου εξετάζει σημαντικούς μηχανισμούς για την εξέλιξη του παγκόσμιου ενεργειακού συστήματος και αναλύει το σύνολο των αλληλεπιδράσεων μεταξύ των της ενεργειακής ζήτησης, της παραγωγής ενέργειας, των διεθνών τιμών των καυσίμων, των μέτρων πολιτικής, των αποφάσεων των παραγόντων του ενεργειακού συστήματος, της τεχνολογικής προόδου και των σχετικών αβεβαιοτήτων στα πλαίσια μετασχηματισμού του συστήματος προς μια οικονομία χαμηλών εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα.

Η ανάπτυξη του μοντέλου συνίσταται σε μια σειρά διαδικασιών όπως η μαθηματική θεμελίωση, ο σχεδιασμός και συμπερίληψη των αλληλεπιδράσεων μεταξύ διαφορετικών συστατικών του μοντέλου, η συλλογή των αντίστοιχων δεδομένων, η προσαρμογή στο έτος βάσης, η εξέταση των ιδιοτήτων του μοντέλου και η ενδεδειγμένη ενσωμάτωση του συνόλου των αβεβαιοτήτων. Ο PROMHΘΕΑΣ είναι ένα ενεργειακό μοντέλο μερικής ισορροπίας που παράγει προεκτάσεις για την εξέλιξη του πλέγματος

«ενέργεια-περιβάλλον» μέχρι το 2050 και αποτελεί ένα εργαλείο για την παραγωγή στοχαστικών πληροφοριών (π.χ. κατανομές πιθανότητας) για τις βασικές μεταβλητές του ενεργειακού συστήματος. Το μοντέλο περιγράφει ενδογενώς το σύνολο των σχέσεων μεταξύ των βασικών ποσοτήτων στο πλαίσιο της ανάλυσης ενεργειακών συστημάτων καθώς και των δυναμικών της τεχνολογικής πρόοδου, κυρίως για τις τεχνολογίες χαμηλών εκπομπών άνθρακα. Το μοντέλο περιέχει ένα διαδοχικά δυναμικό μακρο-οικονομετρικό μοντέλο με ετήσια χρονική ανάλυση μέχρι το 2050 το οποίο έχει τριγωνική δομή έτσι ώστε να αποφύγει τον ταυτοχρονισμό μεταξύ των εξισώσεων. Το μοντέλο εκτός από τις οικονομικά εκτιμημένες εξισώσεις (ανηγμένη μορφή) που περιγράφουν την εξέλιξη των μεταβλητών εμπεριέχει και στοιχεία bottom-up τεχνικο-οικονομικής ανάλυσης και ενσωμάτωση στοιχείων μικροοικονομικής θεωρίας, οικονομικής βελτιστοποίησης των αποφάσεων των παραγόντων του συστήματος και ενσωμάτωση μη οικονομικών παραγόντων στις αποφάσεις των παραγόντων

Στον σχεδιασμό και υλοποίηση των εφαρμογών, δόθηκε ιδιαίτερη έμφαση στην ποσοτικοποίηση των επιπτώσεων από το εύρος και την φιλοδοξία των κλιματικών πολιτικών (φόρος στο διοξείδιο του άνθρακα, πολιτικές προώθησης ΑΠΕ, πολιτικές εξοικονόμησης ενέργειας) και από διαφοροποιημένες υποθέσεις σχετικά με τα κοιτάσματα και την εκμετάλλευση των υδρογονανθράκων (ειδικά του μη συμβατικού φυσικού αερίου). Η ανάλυση γίνεται στο πλαίσιο της μακροχρόνιας στρατηγικής μείωσης των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα καθώς και στις αλληλεπιδράσεις μεταξύ των διαφόρων κλάδων του ενεργειακού συστήματος (π.χ. ηλεκτροπαραγωγή, μεταφορές, τελική ζήτηση ανά κλάδο, παραγωγή υδρογονανθράκων, διεθνής και τοπική αγορά ενέργειας). Στο ολοκληρωμένο υπόδειγμα περιλαμβάνονται όλοι οι τομείς και οι ενεργειακές μορφές του ενεργειακού συστήματος και οι δυνατότητες υποκαταστάσεων μεταξύ τους, καθώς και οι αλληλοεπιδράσεις τους με τις κλιματικές (εκπομπές και συγκεντρώσεις αερίων του θερμοκηπίου) και οικονομικές μεταβλητές (κόστος ενεργειακού συστήματος, τιμές ενέργειας) καθώς και με τις απαραίτητες υποδομές (π.χ. βελτίωση ηλεκτρικού δικτύου, υποδομές επαναφόρτισης μπαταριών για τη διεύθυνση της ηλεκτρικής ενέργειας στο σύστημα των επιβατικών μεταφορών).

Στα πλαίσια της διατριβής, ο σχεδιασμός και η υλοποίηση του μοντέλου έχει ως κύριο στόχο την δημιουργία ενός αξιόπιστου και αποτελεσματικού εργαλείου για την ποσοτική μακροχρόνια ανάλυση του παγκόσμιου ενεργειακού συστήματος και την εξέταση των αβεβαιοτήτων που περιβάλλουν τις κυριότερες μεταβλητές του. Η εφαρμογή του μοντέλου και η ανάλυση αβεβαιότητας σε προβλήματα ενεργειακής και κλιματικής πολιτικής οδήγησε στην ενσωμάτωση σημαντικών πρωτοτυπιών σε σχέση με άλλα μοντέλα της βιβλιογραφίας. Οι σημαντικότερες πρωτοτυπίες που εισάγονται αφορούν την ενδεδειγμένη ποσοτικοποίηση του συνόλου των αβεβαιοτήτων για την εξέλιξη του συστήματος καθώς και την ενσωμάτωση σημαντικών χαρακτηριστικών που συνήθως λείπουν από μοντέλα ενεργειακής ανάλυσης στην διεθνή βιβλιογραφία.

Κατά την κατασκευή του στοχαστικού μοντέλου, η κύρια προσπάθεια είναι η ενδεδειγμένη ενσωμάτωση της αβεβαιότητας με την εισαγωγή της στην δημιουργία των κατανομών πιθανοτήτων για όλες τις παραμέτρους εισόδου και τις εξωγενείς

μεταβλητές του μοντέλου. Συνεπώς, στην κατασκευή του μοντέλου έγινε προσπάθεια ενσωμάτωσης των περισσότερων κατηγοριών αβεβαιοτήτων που αναγνωρίζονται στην διεθνή βιβλιογραφία και συγκεκριμένα:

- Αβεβαιότητα σχετικά με τις υποθέσεις και την εξέλιξη των εξωγενών μεταβλητών
- Διακύμανση στις μεταβλητές που δεν έχουν μοντελοποιηθεί ρητά καθώς δεν θεωρούνται σημαντικές, αλλά μπορούν αθροιστικά να προκαλέσουν αποκλίσεις
- Οι αβεβαιότητες που προκύπτουν από την ατελή γνώση του συστήματος και κυρίως από την τιμή των παραμέτρων που περιλαμβάνονται στο μοντέλο.
- Η αβεβαιότητα σχετικά με τον προσδιορισμό των εξισώσεων και την δομή του μοντέλου (που υλοποιείται με στοχαστικές μεταβάσεις).
- Στατιστικά σφάλματα κατά την ποσοτικοποίηση των δεδομένων και των παρατηρήσεων (π.χ. υπολογιστικά σφάλματα, αριθμητικές προσεγγίσεις κλπ.

Όλα τα παραπάνω εισάγονται στο μοντέλο με τη μορφή των κατανομών πιθανοτήτων. Το αντίστροφο της ισοδύναμης αθροιστικής αυτών των κατανομών χρησιμοποιείται στη συνέχεια για να παράγει πειραματικές τιμές με την ευρέως χρησιμοποιούμενη μέθοδο "Monte Carlo". Η παραγωγή των κατανομών για αυτές τις παραμέτρους αποτελεί τον κεντρικό σκοπό της έρευνας που σχετίζεται με τον σχεδιασμό, την κατασκευή και τη χρήση του στοχαστικού μοντέλου ΠΡΟΜΗΘΕΑΣ.

Αναλυτικά, οι πρωτοτυπίες στο μεθοδολογικό πλαίσιο αφορούν:

- Η πλέον σημαντική συνεισφορά αποτελεί η ενσωμάτωση της αβεβαιότητας που περιβάλλει την εξέλιξη του ενεργειακού συστήματος. Η πρωτοτυπία του μοντέλου είναι η εισαγωγή λεπτομερούς κάλυψης της αβεβαιότητας σε ένα ολοκληρωμένο μεγάλης κλίμακας μοντέλο του παγκόσμιου ενεργειακού συστήματος. Η εκτίμηση πιθανοτήτων αποτελεί κρίσιμη παράμετρο στον σχεδιασμό και στην διαμόρφωση αποτελεσματικών πολιτικών και επενδυτικών στρατηγικών. Συνεπώς, η ολοκληρωμένη ποσοτικοποίηση του κινδύνου είναι στρατηγικής σημασίας και αποτελεί τον κύριο στόχο κατά την κατασκευή και εφαρμογή του μοντέλου.
- Η ανάλυση των στοχαστικών αποτελεσμάτων του μοντέλου προσθέτει μια καινούργια διάσταση στην συνηθισμένη ποσοτική ανάλυση με μοντέλα ενέργειας-οικονομίας, ενώ παράλληλα ενισχύει την αξιοπιστία και την αποδοχή της. Επιπλέον, ο ΠΡΟΜΗΘΕΑΣ μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ποσοτικοποίηση πιθανολογικών εκτιμήσεων για την εξέλιξη σημαντικών μεταβλητών του συστήματος με έναν αξιόπιστο και συνεπή τρόπο. Η συνδιακύμανση μεταξύ παραμέτρων διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στον προσδιορισμό της κατανομής των ενδογενών μεταβλητών του μοντέλου. Ενώ αναγνωρίζεται ο εγγενής υποκειμενικός χαρακτήρας ορισμένων υποθέσεων, η προσπάθεια στην δημιουργία τόσο του μοντέλου όσο και των κατανομών για τα δεδομένα εισόδου υπήρξε πάντοτε προς την απόκτηση αμερόληπτων μέτρων αβεβαιότητας στον βαθμό που τα ιστορικά στοιχεία και η εξειδικευμένη κρίση των εμπειρογνομόνων το επιτρέπουν.

- Εκτενής χρήση οικονομετρικών μεθόδων και εκτιμήσεων για την παραγωγή των κατάλληλων κατανομών για τις παραμέτρους και τις υποθέσεις που εισάγονται στο μοντέλο. Οι οικονομετρικές εκτιμήσεις παρέχουν ένα στοιχείο αντικειμενικότητας, αναγκάζουν τον αναλυτή να διερευνήσει τη φύση και την έκταση των στοχαστικών στοιχείων και επιδέχονται την ανάλυση της συνδιακύμανσης για τις εκτιμημένες παραμέτρους. Επιπλέον, η μέθοδος δεν παράγει συστηματική μεροληψία, ενώ οι οικονομετρικές εκτιμήσεις πραγματοποιούνται σε μακριές χρονολογικές σειρές, που περιλαμβάνουν περιόδους αλλαγών στο παγκόσμιο ενεργειακό σύστημα. Συνεπώς, η αβεβαιότητα που προέρχεται από τις εκτιμήσεις δεν υποεκτιμά την μεταβλητότητα που έχει παρατηρηθεί ιστορικά και οι εκτιμώμενες παράμετροι αναπαριστούν με συνεπή τρόπο την αβεβαιότητα για την εξέλιξη του ενεργειακού συστήματος σε συνδυασμό με πιθανότητες για γρήγορες και ριζικές αλλαγές.
- Ενσωμάτωση εναλλακτικών μεθόδων για την ανάλυση αβεβαιοτήτων και την κατασκευή κατανομών πιθανοτήτων για τα δεδομένα εισόδου. Ιδιαίτερη φροντίδα δίνεται στην συμπερίληψη ενός ευρέος φάσματος επιστημονικής και πολιτικής εμπειρογνωμοσύνης ώστε να αποκτηθούν όσο το δυνατό αμερόληπτες εκτιμήσεις για την διακύμανση και συνδιακύμανση των παραμέτρων εισόδου. Η αβεβαιότητα για τις υποθέσεις βασίζεται είτε σε εξειδικευμένες μελέτες (π.χ. κοιτάσματα υδρογονανθράκων, τεχνολογική πρόοδος, δυναμικότητα ΑΠΕ) είτε σε μεθόδους Delphi (χρήση ερωτηματολογίων) για τον καθορισμό των κλιματικών πολιτικών.
- Ποσοτικοποίηση των αλληλεπιδράσεων μεταξύ διαφόρων κλάδων του ενεργειακού συστήματος στο πλαίσιο της ανάλυσης της εγγενούς αβεβαιότητας. Συγκεκριμένα, μοντελοποιούνται και αναπαρίστανται οι σχέσεις και οι αλληλεξαρτήσεις μεταξύ της παγκόσμιας ζήτησης και προσφοράς ενέργειας και των διεθνών τιμών, μεταξύ κλιματικών πολιτικών και μίγματος καυσίμων και μεταξύ τεχνολογικής προόδου και διεύθυνσης τεχνολογιών χαμηλού άνθρακα.
- Ενσωμάτωση πλήθους τεχνολογικών λεπτομερειών για τις διάφορες ενεργειακές τεχνολογίες, εναλλακτικά καύσιμα και ενεργειακές μορφές, γεγονός που καθιστά το μοντέλο ικανό για την διερεύνηση διαφοροποιημένων μετασχηματισμών του παγκόσμιου ενεργειακού συστήματος. Επιπλέον, το μοντέλο έχει την ικανότητα αναπαράστασης εναλλακτικών ενεργειακών και κλιματικών πολιτικών και διαφοροποιημένων υποθέσεων για μια σειρά από σημαντικές παραμέτρους (π.χ. εξέλιξη του ΑΕΠ και του πληθυσμού, κοιτάσματα και παραγωγή υδρογονανθράκων, τεχνολογική πρόοδος, διεύθυνση τεχνολογιών χαμηλού άνθρακα). Συνεπώς, το μοντέλο μπορεί να εξετάσει ενδελεχώς τις επιπτώσεις των παραπάνω στην εξέλιξη του παγκοσμίου ενεργειακού συστήματος (τόσο στην προσφορά όσο και στην ζήτηση καυσίμων), στις εκπομπές και ατμοσφαιρικές συγκεντρώσεις αερίων του θερμοκηπίου, στην διαμόρφωση των διεθνών τιμών των ορυκτών καυσίμων καθώς και το συνολικό κόστος προσαρμογής του συστήματος.

- Οι αποφάσεις των ενεργειακών καταναλωτών εξαρτώνται τόσο από οικονομικούς (όπως στα περισσότερα μοντέλα) όσο και από μη οικονομικούς παράγοντες. Οι τελευταίοι αναπαρίστανται συνήθως με την εισαγωγή κατάλληλων συντελεστών στον μηχανισμό απόφασης για νέες επενδύσεις, οι οποίοι αντανακλούν την σχετική «ωριμότητα» κάθε τεχνολογίας και ετοιμότητα των καταναλωτών να την υιοθετήσουν. Συνεπώς, ο βαθμός διείσδυσης των τεχνολογιών εξαρτάται άμεσα τόσο από οικονομικούς (κόστος κεφαλαίου, κόστος καυσίμου, απόδοση), όσο και από μη οικονομικούς παράγοντες, συμπεριλαμβανομένων του μιμητισμού, διάχυση της πληροφορίας, του διεθνούς εμπορίου, ανάπτυξη υποδομών και αποτελεσμάτων δικτύου (“*network effects*”). Συνεπώς, το μοντέλο προσομοιώνει με μεγαλύτερο ρεαλισμό τις αποφάσεις των καταναλωτών, οι οποίες στην πραγματικότητα δεν βασίζονται αποκλειστικά σε οικονομική ανάλυση κόστους, αλλά επηρεάζονται καθοριστικά από ένα πλήθος παραγόντων, που πρέπει να ληφθούν υπόψη.

8.2 Συμπεράσματα

Η παρούσα ενότητα παρουσιάζει τα κυριότερα συμπεράσματα που εξάγονται από την διδακτορική διατριβή και την κατασκευή και εφαρμογή του ΠΡΟΜΗΘΕΑ.

8.2.1 Ο ρόλος των κλιματικών πολιτικών και τεχνολογικών επιλογών για την μετάβαση σε οικονομία χαμηλών εκπομπών

Στη διάρκεια των τελευταίων δεκαετιών, το φαινόμενο της κλιματικής αλλαγής αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα παγκόσμια προβλήματα, καθώς αναγνωρίζεται ότι η κλιματική αλλαγή μπορεί να οδηγήσει σε καταστροφικές επιπτώσεις στις ανθρώπινες κοινωνίες και στο περιβάλλον. Η δραστική μείωση των εκπομπών των αερίων του θερμοκηπίου αποτελεί ιδιαίτερα φιλόδοξο στόχο και απαιτεί παγκόσμια συντονισμένη δράση. Η συνεχιζόμενη αύξηση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα οφείλεται τόσο στην ραγδαία αύξηση της ζήτησης ενέργειας όσο και στο χρησιμοποιούμενο μείγμα καυσίμων, που κυριαρχείται από τα ορυκτά καύσιμα. Η αύξηση της ζήτησης ενέργειας είναι αποτέλεσμα της παγκόσμιας οικονομικής μεγέθυνσης, της αύξησης του πληθυσμού και της τάσης αστικοποίησης ιδιαίτερα στις αναδυόμενες οικονομίες. Από την άλλη πλευρά, η υλοποίηση κλιματικών πολιτικών θα έχει επιπτώσεις τόσο στην ενεργειακή ζήτηση όσο και στην διάρθρωση του παγκόσμιου ενεργειακού συστήματος. Η σταδιακή υποκατάσταση των ορυκτών καυσίμων με ενεργειακές μορφές χαμηλού άνθρακα συμβάλει στην ικανοποίηση του στόχου περιορισμού της κλιματικής αλλαγής. Ωστόσο, η αναδιάρθρωση του παγκόσμιου ενεργειακού συστήματος συνεπάγεται περίπλοκες διαδικασίες λήψης αποφάσεων με διαφορετικούς εμπλεκόμενους φορείς, όπως οι ενεργειακοί καταναλωτές, οι φορείς χάραξης πολιτικής, η κατασκευαστική βιομηχανία, η βιομηχανία υποδομών και καυσίμων και το κράτος.

Η αποτελεσματική αντιμετώπιση της κλιματικής αλλαγής προϋποθέτει την επίτευξη παγκόσμιας δεσμευτικής συμφωνίας μείωσης των εκπομπών άνθρακα σε παγκόσμιο επίπεδο ώστε η αύξηση της μέσης παγκόσμιας θερμοκρασίας να παραμείνει μικρότερη από 2°C σε σύγκριση με τα προ-βιομηχανικά επίπεδα. Παρά τις σημαντικές

κοινωνικές και πολιτικές δυσκολίες υλοποίησης μιας παγκόσμιας συμφωνίας, η εκμετάλλευση της φθηνότερης επιλογής μείωσης των εκπομπών σε όλες τις χώρες και κλάδους με βάση το οριακό κόστος είναι η βέλτιστη οικονομικά πολιτική και οδηγεί σε ελαχιστοποίηση του συνολικού κόστους μείωσης των εκπομπών άνθρακα. Το μοντέλο χρησιμοποιήθηκε για να εξετάσει ένα σενάριο μετάβασης σε οικονομία χαμηλών εκπομπών το 2050. Προκειμένου να εξασφαλισθεί ελάχιστο κόστος και η μεγαλύτερη αποτελεσματικότητα των πολιτικών, το σενάριο υποθέτει την εκμετάλλευση των φθηνότερων επιλογών μείωσης του CO₂ και συνεπώς έναν ενιαίο παγκόσμιο φόρο άνθρακα, ο οποίος φτάνει στα επίπεδα των 103 €/2010/ tn CO₂ το 2030 και στα 368 €/2010/ tn CO₂ το 2050. Η επιβολή υψηλών τιμών άνθρακα οδηγεί σε μείωση των παγκόσμιων εκπομπών κατά 63% το 2050 σε σχέση με το σενάριο αναφοράς, εξαιτίας της μείωσης της ενεργειακής ζήτησης, της αύξησης του ποσοστού των τεχνολογιών χαμηλού και μηδενικού άνθρακα στο ενεργειακό μίγμα και την υποκατάσταση ορυκτών καυσίμων από ηλεκτρισμό τόσο σε στατικές εφαρμογές όσο και στις μεταφορές (διείσδυση ηλεκτρικών αυτοκινήτων). Η χαμηλότερη ζήτηση για ορυκτά καύσιμα οδηγεί σε μείωση των διεθνών τιμών τους από το σενάριο αναφοράς, σε ποσοστά 40-50% το 2050. Οι μειώσεις στις εκπομπές είναι μεγαλύτερες για τις αναπτυσσόμενες χώρες, καθώς έχουν δυνατότητες για χαμηλού κόστους υποκαταστάσεις (π.χ. μείωση κατανάλωσης άνθρακα στα νοικοκυριά, εξοικονόμηση ενέργειας, υποκατάσταση πετρελαίου στην ηλεκτροπαραγωγή), ενώ στο σενάριο αναφοράς οι τιμές ενέργειας είναι μικρές και συνεπώς η επιβολή παγκόσμιου φόρου έχει μεγαλύτερες επιπτώσεις συγκριτικά με τις αναπτυγμένες χώρες. Η ανάλυση δείχνει ότι οι αναπτυσσόμενες περιοχές ευθύνονται για το 81% της μείωσης των παγκόσμιων εκπομπών CO₂ με την Κίνα και την Ινδία να αντιπροσωπεύουν το 52% καταδεικνύοντας την σημασία των αναπτυσσόμενων χωρών για την προσπάθεια μετριασμού της κλιματικής αλλαγής.

Η υλοποίηση κλιματικών πολιτικών συνεπάγεται επιπλέον κόστος για το ενεργειακό σύστημα εξαιτίας του αυξημένου κόστους των ορυκτών καυσίμων και των υποκαταστάσεων υπέρ των ακριβότερων επιλογών χαμηλού άνθρακα. Το αθροιστικό κόστος μείωσης υπολογίζεται σε 1.1% του παγκόσμιου ΑΕΠ την περίοδο 2010-2050. Το κόστος ανά περιοχή εξαρτάται πρωταρχικά από την προσπάθεια μείωσης των εκπομπών CO₂, ενώ το κόστος είναι σχετικά χαμηλό στους εισαγωγείς ενέργειας εξαιτίας της μείωσης στις διεθνείς τιμές των υδρογονανθράκων. Οι μεγάλης κλίμακας υποκαταστάσεις στο ενεργειακό μίγμα και οι επενδύσεις σε εξοικονόμηση ενέργειας και ανάπτυξη των ΑΠΕ οδηγούν σε μεγάλη αύξηση του ενεργειακού κόστους κατά 2.2% σαν ποσοστό του ΑΕΠ στην Κίνα και κατά 1.3-1.8 στις υπόλοιπες αναπτυσσόμενες χώρες. Τέλος, πρέπει να επισημανθεί ότι στην παρούσα ανάλυση ο ΠΡΟΜΗΘΕΑΣ δεν εξετάζει μηχανισμούς κατανομής των βαρών μεταξύ περιοχών, καθώς σκοπός είναι η ποσοτικοποίηση του ελάχιστου κόστους μετριασμού της κλιματικής αλλαγής.

Η ΕΕ ηγείται της παγκόσμιας προσπάθειας για τον μετριασμό της κλιματικής αλλαγής, καθώς έχει υιοθετήσει συγκεκριμένους φιλόδοξους στόχους μείωσης των εκπομπών CO₂ και διείσδυσης των ΑΠΕ για το 2020, εφαρμόζει μια σειρά πολιτικών για την ενέργεια και το κλίμα και έχει επιβεβαιώσει το μακροπρόθεσμο στόχο για μείωση

των εκπομπών κατά τουλάχιστον 80% το 2050. Παράλληλα, η σχετικά αργή πρόοδος στις διεθνείς διαπραγματεύσεις έχει προκαλέσει σκεπτικισμό για την υλοποίηση μιας συνεργατικής, φιλόδοξης και δεσμευτικής διεθνούς συμφωνίας για το κλίμα συμβατή με τον στόχο των 2°C. Δεδομένου του διεθνούς πλαισίου, το μοντέλο χρησιμοποιήθηκε για να εξετάσει τις επιπτώσεις της φιλόδοξης μονομερούς δράσης της ΕΕ για δραστική μείωση των εκπομπών CO₂, προσομοιώνοντας την αύξηση του φόρου άνθρακα στους τομείς ΣΕΔΕ, εισαγωγή κλιματικών πολιτικών στους υπόλοιπους τομείς, αυστηρότερα πρότυπα εκπομπών CO₂ για τα επιβατικά αυτοκίνητα, μέτρα βελτίωσης ενεργειακής απόδοσης σε όλους τους κλάδους σε συνδυασμό με επενδύσεις στην βελτίωση του δικτύου μεταφοράς ηλεκτρισμού και στις υποδομές επαναφόρτισης μπαταριών.

Η απανθρακοποίηση του ενεργειακού συστήματος της ΕΕ οδηγεί σε ισχυρή τάση αποσύνδεσης της ζήτησης ενέργειας από την αύξηση του ΑΕΠ σαν αποτέλεσμα των αυξήσεων στις τιμές ενέργειας, των πολιτικών εξοικονόμησης και της διείσδυσης ενεργειακά αποδοτικών τεχνολογιών. Οι φιλόδοξες κλιματικές πολιτικές οδηγούν σε υψηλή διείσδυση των τεχνολογιών ΑΠΕ και CCS στο ενεργειακό σύστημα, ανάπτυξη εναλλακτικών υποδομών και εκτεταμένη υποκατάσταση ορυκτών καυσίμων από ηλεκτρισμό. Η απανθρακοποίηση της οικονομίας εξαρτάται από τον αποτελεσματικό και έγκαιρο συντονισμό των παραγόντων του ενεργειακού συστήματος (καταναλωτές εταιρείες ενέργειας) και της οικονομίας (κατασκευαστές τεχνολογιών, κράτος, πάροχοι υποδομών) για την αντιμετώπιση τόσο οικονομικών όσο και μη-οικονομικών εμποδίων (πρόσβαση σε κεφάλαια, αβεβαιότητα, απροθυμία υιοθέτησης νέων τεχνολογιών) τα οποία εμποδίζουν τις επενδύσεις σε ενεργειακές μορφές χαμηλού άνθρακα.

Η υλοποίηση κλιματικών πολιτικών διαφορετικής φιλοδοξίας ανά περιοχή μειώνουν την αποτελεσματικότητα των μέτρων, εξαιτίας της διαρροής άνθρακα, μέσω δυο καναλιών: (1) μετεγκατάσταση των ενεργοβόρων βιομηχανιών μακριά από την ΕΕ εξαιτίας της αύξησης κόστους παραγωγής και (2) το ενεργειακό κανάλι, μέσω μείωσης των διεθνών τιμών των καυσίμων όταν μια περιοχή υιοθετεί κλιματικές πολιτικές. Είναι προφανές ότι λόγω του περιορισμένου μεγέθους της ΕΕ στο παγκόσμιο σύστημα, η υλοποίηση μονομερών πολιτικών δεν επιλύει το πρόβλημα της κλιματικής αλλαγής. Τα αποτελέσματα του μοντέλου δείχνουν ότι η μονομερής κλιματική δράση της ΕΕ οδηγεί σε μείωση των διεθνών τιμών των καυσίμων (περίπου 5% το 2050) και συνεπώς σε αύξηση ζήτησης ορυκτών καυσίμων και εκπομπών άνθρακα στις περιοχές εκτός ΕΕ. Το ποσοστό διαρροής άνθρακα εκτιμάται σε 21.2% την περίοδο 2010-2050; Το σχετικά υψηλό ποσοστό διαρροής άνθρακα εξηγείται από την αναπαράσταση του μηχανισμού διαμόρφωσης των διεθνών τιμών στο μοντέλο και την ευαισθησία των παγκόσμιων τιμών σε διακυμάνσεις της ζήτησης υδρογονανθράκων. Το 63% της διαρροής άνθρακα προκαλείται από την Κίνα και τις αναδυόμενες οικονομίες, που έχουν υψηλή ένταση άνθρακα ανά μονάδα ΑΕΠ και μεγάλη αύξηση της κατανάλωσης υδρογονανθράκων και των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα την περίοδο 2010-2050.

8.2.2 Επιπτώσεις των κοιτασμάτων υδρογονανθράκων για την εξέλιξη του ενεργειακού συστήματος και των διεθνών τιμών καυσίμων

Οι διεθνείς τιμές των ορυκτών καυσίμων επηρεάζονται από την ισορροπία μεταξύ παγκόσμιας ζήτησης και προσφοράς καυσίμων, από τα κοιτάσματα και το κόστος εξόρυξης των υδρογονανθράκων και από τις πολιτικές. Το μοντέλο εμπεριέχει μηχανισμό διαμόρφωσης των διεθνών τιμών, οι οποίες εξαρτώνται από την παγκόσμια ενεργειακή ζήτηση, την παραγωγή από συμβατικά κοιτάσματα, τα συμβατικά και μη συμβατικά αποθέματα και κοιτάσματα υδρογονανθράκων και τις διεθνείς συνθήκες των αγορών (πχ ρόλος του ΟΠΕΚ), ενώ η εξάρτηση των τιμών αερίου και άνθρακα από την τιμή του πετρελαίου έχει ενσωματωθεί. Η σημασία των υποθέσεων όσον αφορά τα κοιτάσματα υδρογονανθράκων για την εξέλιξη του ενεργειακού συστήματος και για την διαμόρφωση των διεθνών τιμών ενέργειας αξιολογείται με εναλλακτικά σενάρια με διαφοροποιημένες υποθέσεις για τα παγκόσμια κοιτάσματα καυσίμων και για τις προοπτικές παραγωγής τους και κυρίως την εκμετάλλευση μη συμβατικού αερίου. Το σενάριο αναφοράς χρησιμοποιεί τις υποθέσεις για τα κοιτάσματα από τις «μέσες» εκτιμήσεις της διεθνούς βιβλιογραφίας, ενώ στα σενάρια χρησιμοποιούνται υποθέσεις που αντανakλούν το χαμηλότερο 10% και το υψηλότερο 10% εκατοστημόριο των εκτιμήσεων του USGS [101, 102].

Οι αβεβαιότητες σχετικά με το μέγεθος των κοιτασμάτων αφορούν κυρίως την εξόρυξη μη συμβατικών κοιτασμάτων αερίου καθώς οι πολιτικές και οι τεχνολογίες που σχετίζονται με την εκμετάλλευση του είναι ακόμα αβέβαιες με εξαίρεση την Β. Αμερική. Υποθέτοντας διαφορετικά επίπεδα διαθεσιμότητας και αξιοποίησης μη συμβατικών κοιτασμάτων αερίου, οι τιμές των ορυκτών καυσίμων μεταβάλλονται. Η απόκλιση αυτή είναι υψηλότερη για το φυσικό αέριο σε σύγκριση με το πετρέλαιο και τον άνθρακα; Ο σημαντικότερος λόγος είναι η μεγαλύτερη αβεβαιότητα σχετικά με τα παγκόσμια κοιτάσματα αερίου σε σύγκριση με τα κοιτάσματα πετρελαίου και ειδικά όσον αφορά τους πόρους του μη συμβατικού φυσικού αερίου που χαρακτηρίζονται από ιδιαίτερα μεγάλη αβεβαιότητα (για τα κοιτάσματα και τους συντελεστές ανάκτησης).

Η ανάλυση δείχνει ότι οι μεταβολές στις διεθνείς τιμές του πετρελαίου είναι σχετικά περιορισμένες, εξαιτίας της χαμηλότερης αβεβαιότητας που περιβάλλει τα παγκόσμια κοιτάσματα πετρελαίου (σε σχέση με το φυσικό αέριο). Επιπλέον, η ποσότητα των βεβαιωμένων αποθεμάτων πετρελαίου είναι μεγαλύτερη σε σχέση με τους τεχνικά και οικονομικά απολήψιμους πόρους οι οποίοι χαρακτηρίζονται από εγγενή αβεβαιότητα, ενώ η έρευνα και η εξερεύνηση στις περισσότερες περιοχές του κόσμου έχει αναπτυχθεί σε πολύ μεγαλύτερο βαθμό σε σύγκριση με το φυσικό αέριο. Ο λόγος της τιμής του φυσικού αερίου προς την τιμή του πετρελαίου (και του άνθρακα) είναι υψηλότερος στο σενάριο «υψηλών τιμών» και χαμηλότερος στο σενάριο «χαμηλών τιμών» σε σύγκριση με το σενάριο αναφοράς, καθώς οι τιμές του φυσικού αερίου επηρεάζονται περισσότερο από τις εναλλακτικές υποθέσεις των σεναρίων και η αβεβαιότητα για την εκμετάλλευση μη συμβατικών κοιτασμάτων αερίου είναι υψηλή.

Οι μεταβολές στις σχετικές διεθνείς τιμές των ορυκτών καυσίμων οδηγούν σε σημαντικές αλλαγές στο παγκόσμιο ενεργειακό σύστημα. Συγκεκριμένα, το σενάριο υψηλών τιμών οδηγεί σε υποκατάσταση του φυσικού αερίου από πηγές ενέργειας μηδενικού άνθρακα (κυρίως ΑΠΕ) και από τα υπόλοιπα ορυκτά καύσιμα (πετρέλαιο, άνθρακας) των οποίων η τιμή αυξάνεται λιγότερο σε σύγκριση με το φυσικό αέριο. Αντίθετα, στο σενάριο χαμηλών τιμών, η τιμή του φυσικού αερίου μειώνεται ενώ η ανταγωνιστικότητά του σε σχέση με τις υπόλοιπες ενεργειακές μορφές αυξάνεται και το αέριο γίνεται το σημαντικότερο καύσιμο στην παγκόσμια ενεργειακή αγορά το 2050. Συνεπώς, η ανάλυση καταδεικνύει την ιδιαίτερα μεγάλη σημασία των υποθέσεων για τα κοιτάσματα των καυσίμων και του μεγέθους της εκμετάλλευσης του μη συμβατικού φυσικού αερίου σε παγκόσμιο επίπεδο για την εξέλιξη του παγκόσμιου ενεργειακού συστήματος και την διάρθρωση του ενεργειακού μίγματος.

8.2.3 Η σημασία της αβεβαιότητας για την προσομοίωση του ενεργειακού συστήματος

Η αβεβαιότητα σχετικά με την εξέλιξη του παγκόσμιου ενεργειακού συστήματος είναι ιδιαίτερα μεγάλη, εξαρτάται από πολλαπλούς παράγοντες και είναι το κυριότερο πρόβλημα για την ανάλυση των επιπτώσεων εναλλακτικών πολιτικών. Αυτή η αβεβαιότητα είναι διάχυτη στο ενεργειακό σύστημα, δεν περιορίζεται στις πιο διαδεδομένες περιπτώσεις, όπως η κλιματική αλλαγή [23], και δεν ανάγεται απλώς στην αβεβαιότητα σχετικά με μια σειρά βασικών παραμέτρων. Τα αιτιοκρατικά μοντέλα παρέχουν έναν αξιόπιστο τρόπο μελέτης του ενεργειακού συστήματος, αλλά αντιμετωπίζουν την αβεβαιότητα μόνο έμμεσα μέσω εξέτασης σεναρίων και ανάλυσης ευαισθησίας στις τιμές κάποιων παραμέτρων. Ωστόσο, οι τρόποι αυτοί δεν μπορούν να μελετήσουν το συνολικό εύρος της αβεβαιότητας και δεν παρέχουν καμία ποσοτική ένδειξη για την πιθανότητα εναλλακτικών ενδεχομένων.

Τα τελευταία χρόνια έχουν πραγματοποιηθεί αρκετές αναλύσεις αβεβαιότητας με μεγάλης κλίμακας μοντέλα ενέργειας-οικονομίας. Ωστόσο, τα μοντέλα αναλύουν την διακύμανση που προκαλείται στις ενδογενείς μεταβλητές μόνο από κάποιες αβέβαιες παραμέτρους, που επιλέχθηκαν με υποκειμενικό τρόπο είτε για τη συνολική σημασία τους ή προκειμένου να εξεταστεί ο ρόλος τους στον καθορισμό της αβεβαιότητας μιας σημαντικής ενδογενούς μεταβλητής, και όχι από το σύνολο των αβέβαιων δεδομένων εισόδου. Συνολικά, η κατασκευή κατανομών για περιορισμένο αριθμό παραμέτρων τείνει να οδηγήσει σε μικρότερο εύρος αβεβαιότητάς για τις ενδογενείς μεταβλητές και στη μη ακριβή αναπαράσταση των προτύπων αβεβαιότητας του συστήματος και άρα σε μεροληψία των πιθανοτικών εκτιμήσεων του μοντέλου. Επιπλέον, οι κατανομές των παραμέτρων εισόδου βασίζονται σε καθαρά υποκειμενικές εκτιμήσεις των ερευνητών (guesstimates) και δεν είναι αμερόληπτες, ενώ πολύ μικρή σημασία έχει δοθεί στην συνδιακύμανση των κατανομών καθώς σχεδόν όλα τα μοντέλα υποθέτουν ότι οι κατανομές πιθανοτήτων των παραμέτρων είναι ανεξάρτητες μεταξύ τους. Τέλος, οι ντετερμινιστικοί περιορισμοί που επιβάλλονται στα μοντέλα σημαίνουν την αδυναμία της ανάλυσης να εξετάσει την πιθανότητα να τεθούν στόχοι αλλά να μην επιτευχθούν.

Συνολικά, παρόλο που οι αναλύσεις αβεβαιότητας με μοντέλα ενέργειας-οικονομίας παρέχουν σημαντικές γνώσεις για τη σημασία συγκεκριμένων τύπων αβεβαιότητας, εντούτοις οι πιθανοτικές κατανομές των αποτελεσμάτων δεν αντικατοπτρίζουν το εύρος της αβεβαιότητας και εξαρτώνται από υποκειμενικές εκτιμήσεις για τις αβέβαιες παραμέτρους εισόδου χωρίς να λαμβάνουν υπόψη την συνδιακύμανση μεταξύ τους.

Η κύρια προσπάθεια κατά την έρευνα και κατασκευή του μοντέλου ήταν η συστηματική ενσωμάτωση της αβεβαιότητας σε όλους τους παράγοντες από τους οποίους εξαρτάται η προβολή στο μέλλον του ενεργειακού συστήματος. Η λεπτομερής κάλυψη της αβεβαιότητας σε ένα ολοκληρωμένο μεγάλης κλίμακας μοντέλο του παγκόσμιου ενεργειακού συστήματος επιτρέπει την αξιόπιστη ποσοτικοποίηση όλων των αποτελεσμάτων και προβολών με τη μορφή κατανομών πιθανοτήτων που παράγονται ενδογενώς από το μοντέλο και οι οποίες δεν λαμβάνουν προ-καθορισμένη μορφή (αλλά καθορίζονται από τις κατανομές των παραμέτρων εισόδου και από τις σχέσεις που περιλαμβάνονται στο μοντέλο). Το ενδιαφέρον αποτέλεσμα του μοντέλου είναι ακριβώς η μορφή της κατανομής πιθανοτήτων που το μοντέλο παράγει για κάθε μέγεθος που προβάλλεται στο μέλλον. Η μορφή αυτή μπορεί να αξιολογηθεί από τον χρήστη του μοντέλου ώστε να προκύψουν συμπεράσματα σχετικά με το εύρος της αβεβαιότητας για κάθε προβολή στο μέλλον. Για παράδειγμα, το μοντέλο παράγει πιθανολογικές εκτιμήσεις για την εξέλιξη σημαντικών μεταβλητών του συστήματος (π.χ. η πιθανότητα ότι οι παγκόσμιες εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα θα υπερβούν ένα συγκεκριμένο όριο το 2050 ή πιθανότητα ότι η διεθνής τιμή του πετρελαίου θα είναι μεγαλύτερη από 100\$ το βαρέλι) ως αποτέλεσμα της λειτουργίας του ενεργειακού συστήματος υπό αβεβαιότητα. Η πληροφορία σχετικά με την αβεβαιότητα των προβολών στο μέλλον αποτελεί κρίσιμη παράμετρο στον σχεδιασμό αποτελεσματικών πολιτικών και επομένως η ολοκληρωμένη ποσοτικοποίηση του κινδύνου που παρέχει το μοντέλο είναι στρατηγικής σημασίας για τους φορείς χάραξης πολιτικής και για τους επενδυτές στο ενεργειακό σύστημα (π.χ. σε τεχνολογίες ηλεκτροπαραγωγής).

Κατά την κατασκευή του στοχαστικού μοντέλου, η κύρια προσπάθεια είναι η ενδεδειγμένη κάλυψη της αβεβαιότητας με την εισαγωγή της στην δημιουργία των κατανομών πιθανοτήτων για όλες τις παραμέτρους εισόδου. Συνεπώς, το μοντέλο ενσωματώνει με ρητό και αμερόληπτο τρόπο τις κυριότερες κατηγορίες αβεβαιοτήτων που αναγνωρίζονται στην διεθνή βιβλιογραφία και συγκεκριμένα την έλλειψη γνώσης για την εξέλιξη των εξωγενών υποθέσεων του μοντέλου, την αβεβαιότητα από ατελή γνώση του συστήματος για την τιμή των παραμέτρων του μοντέλου (παραμετρική αβεβαιότητα) και την διακύμανση από μεταβλητές που δεν έχουν ενσωματωθεί ρητά στο μοντέλο (υπολείμματα εξισώσεων). Τα παραπάνω εισάγονται με τη μορφή κατανομών πιθανοτήτων. Το αντίστροφο της ισοδύναμης αθροιστικής των κατανομών χρησιμοποιείται στη συνέχεια για να παράγει πειραματικές τιμές με την μέθοδο "Monte Carlo" και το μοντέλο επιλύεται για 2000 πειράματα παρέχοντας τις κατανομές πιθανοτήτων για ενδογενείς μεταβλητές. Επιπλέον, η μέθοδος διαστρωματοποιημένης δειγματοληψίας Latin Hypercube χρησιμοποιείται για να βελτιώσει την ακρίβεια της στατιστικής δειγματοληψίας για ορισμένες σημαντικές παραμέτρους του συστήματος

που επηρεάζουν καθοριστικά τις προεκτάσεις του μοντέλου στο μέλλον (συγκεκριμένα οι παράμετροι που καθορίζουν την αύξηση του ΑΕΠ στις αναπτυσσόμενες οικονομίες, τα κοιτάσματα των υδρογονανθράκων στο έτος βάση, τις επενδύσεις σε Έρευνα και Ανάπτυξη για τις ενεργειακές τεχνολογίες και τις διεθνείς τιμές ενέργειας).

Για την παραγωγή των κατάλληλων κατανομών για τις παραμέτρους και τις υποθέσεις που εισάγονται στο μοντέλο, χρησιμοποιούνται εκτενώς οικονομετρικές εκτιμήσεις με βάση ιστορικά δεδομένα και παρατηρημένες χρονολογικές σειρές, οι οποίες συλλέχθηκαν. Η στατιστική επεξεργασία παρέχει βάση για την επιλογή των κατανομών, αντικειμενικότητα (αφού βασίζεται σε ιστορικά στοιχεία) και ανάλυση διακύμανσης και συνδιακύμανσης. Οι εκτιμήτριες των παραμέτρων βασίζονται σε μεθόδους αμερόληπτης εκτίμησης με χρήση κατάλληλων μεθόδων παλινδρόμησης και στατιστικού μετασχηματισμού χρονοσειρών. Η ανάλυση δίνει ιδιαίτερη προσοχή στη στατιστική εξάρτηση των παραμέτρων που εισάγονται στο μοντέλο, δεδομένου ότι η συνδιακύμανση διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στον προσδιορισμό της κατανομής των ενδογενών μεταβλητών και ιδιαίτερα των αθροιστικών. Σε περιπτώσεις όπου είναι αδύνατος ο προσδιορισμός των κατανομών πιθανοτήτων των παραμέτρων εισόδου, χρησιμοποιούνται εναλλακτικές μέθοδοι ενσωμάτωσης της αβεβαιότητας (μελέτες, εμπειρογνώμονες, ερωτηματολόγια). Σε όλες τις περιπτώσεις, ενσωματώθηκε ευρύ φάσμα εμπειρογνωμοσύνης ώστε να περιοριστεί η μεροληψία. Ενώ αναγνωρίζονται οι δυσκολίες στον καθορισμό της μεταβλητότητας των παραμέτρων εισόδου και του υποκειμενικού χαρακτήρα ορισμένων υποθέσεων, η προσπάθεια στην δημιουργία τόσο του μοντέλου όσο και των κατανομών για τις παραμέτρους βασίστηκε σε αμερόληπτα μέτρα αβεβαιότητας στον βαθμό που τα ιστορικά στοιχεία χρονοσειρών το επιτρέπουν.

8.2.4 Εξέλιξη του παγκόσμιου ενεργειακού συστήματος υπό αβεβαιότητα

Η μελέτη του παγκόσμιου ενεργειακού συστήματος και του φαινομένου της κλιματικής αλλαγής υπόκεινται σε εκτεταμένη αβεβαιότητα, η οποία μελετάται με τον σχεδιασμό στοχαστικών σεναρίων με το μοντέλο και την ποσοτικοποίηση πιθανοτικών εκτιμήσεων για μελλοντικά ενδεχόμενα. Η στοχαστική ανάλυση των προεκτάσεων του μοντέλου γίνεται με το σενάριο αναφοράς στο οποίο ενσωματώνονται ενδελεχώς οι τάσεις του ενεργειακού συστήματος, τα αποτελέσματα οικονομετρικών εκτιμήσεων και η αβεβαιότητα για την εξέλιξη των εξωγενών μεταβλητών. Οι κατανομές που προκύπτουν δεν λαμβάνουν προκαθορισμένη μορφή και το ενδιαφέρον αποτέλεσμα είναι ακριβώς η μορφή της κατανομής πιθανοτήτων που το μοντέλο παράγει για κάθε μέγεθος που προβάλλεται στοχαστικά στο μέλλον. Οι μορφές των κατανομών μπορούν να αξιολογηθούν ώστε να προκύψουν συμπεράσματα σχετικά με το εύρος και την δομή της αβεβαιότητας για κάθε προβολή στο μέλλον.

Σύμφωνα με το στοχαστικό σενάριο αναφοράς, υπάρχουν υψηλές πιθανότητες επιβράδυνσης της αύξησης της ζήτησης ενέργειας σε σύγκριση με τα ιστορικά δεδομένα σε όλες τις περιοχές. Οι βασικοί λόγοι είναι βελτιώσεις στην ενεργειακή αποδοτικότητα, η εισαγωγή πιο αποδοτικών τεχνολογιών, η προβλεπόμενη αύξηση των διεθνών τιμών των καυσίμων, η συνέχιση των διαρθρωτικών αλλαγών με κύριο χαρακτηριστικό την

αποβιομηχάνιση της οικονομίας και οι πιθανότητες για εισαγωγή κλιματικών πολιτικών. Η κατανάλωση ενέργειας στις αναπτυσσόμενες περιοχές αυξάνεται κατά μέσο όρο πολύ πιο γρήγορα σε σύγκριση με τις αναπτυγμένες οικονομίες και το 2050 υπάρχει 61% πιθανότητα να ξεπεράσει το 75% της παγκόσμιας ενεργειακής κατανάλωσης. Η στοχαστική προβολή οδηγεί σε σταδιακή μείωση του ρόλου του άνθρακα στο παγκόσμιο ενεργειακό μίγμα εξαιτίας των κλιματικών πολιτικών και της υποκατάστασής του από πιο οικονομικές, και ενεργειακά αποδοτικές ενεργειακές μορφές. Συνεπώς, η πιθανότητα η παγκόσμια ζήτηση αερίου να ξεπεράσει τον άνθρακα αυξάνεται από 11% το 2020 85% το 2050. Επιπλέον, η σημασία των ΑΠΕ στο παγκόσμιο σύστημα αυξάνεται συνεχώς εξαιτίας της τεχνολογικής προόδου (μείωση κόστους), της αύξησης των τιμών υδρογονανθράκων και της υλοποίησης κλιματικών πολιτικών, που οδηγούν σε τριπλασιασμό (κατά μέσο όρο) του ποσοστού των ΑΠΕ στο παγκόσμιο ενεργειακό μίγμα την περίοδο 2010-2050.

Ο τομέας των μεταφορών είναι ιδιαίτερα σημαντικός καθώς ο αριθμός των οχημάτων προβλέπεται να αυξηθεί σημαντικά στις αναπτυσσόμενες περιοχές, ενώ προβλέπεται κορεσμός στις οικονομίες ΟΟΣΑ με βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης. Το παγκόσμιο απόθεμα αυτοκινήτων προβλέπεται να αυξηθεί κατά 3.1% ετησίως την περίοδο 2010-2050, ενώ η πιθανότητα ο αριθμός των επιβατικών αυτοκινήτων να υπέρ-τριπλασιαστεί είναι 98%. Η ανάλυση υποδηλώνει τεράστια δυνατότητα αύξησης της παγκόσμιας αγοράς αυτοκινήτων με υψηλό βαθμό βεβαιότητας οδηγούμενη από αναπτυσσόμενες χώρες παράλληλα με την άνοδο των εισοδημάτων τους. Ωστόσο, η πιθανότητα ότι τα ποσοστά ιδιοκτησίας αυτοκινήτων στις αναπτυσσόμενες περιοχές θα φθάσουν στα σημερινά Ευρωπαϊκά επίπεδα το 2050 είναι μηδενική. Καινούργιες τεχνολογίες με μικρότερες εκπομπές CO₂ προβλέπεται να εισέλθουν στην αγορά μετά το 2030 με τα plug-in υβριδικά να αποτελούν τη κύρια δύναμη για ανάπτυξη υποδομών επαναφόρτισης μπαταριών ανοίγοντας το δρόμο για διείσδυση ηλεκτρικών οχημάτων.

Ο τομέας της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας έχει μεγάλες πιθανότητες να διαδραματίσει σημαντικό ρόλο στην εξέλιξη των ενεργειακών και κλιματικών στρατηγικών. Σύμφωνα με τις στοχαστικές προεκτάσεις του μοντέλου, η παγκόσμια παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας θα συνεχίσει να αυξάνεται με υψηλό ρυθμό εξαιτίας της αύξησης του ΑΕΠ, της ιδιοκτησίας ηλεκτρικών συσκευών, της αύξησης ποσοστού του ηλεκτρισμού στην βιομηχανία, της ανθεκτικότητας του κόστους παραγωγής στις αυξήσεις των τιμών των υδρογονανθράκων και του σταδιακού εξηλεκτρισμού των μεταφορών μετά το 2030. Την περίοδο 2010-2050, η παγκόσμια ηλεκτροπαραγωγή αναμένεται να αυξηθεί κατά ένα συντελεστή 3.7 κατά μέσο όρο. Το μελλοντικό μίγμα παραγωγής ηλεκτρισμού έχει μεγάλη πιθανότητα να είναι πιο διαφοροποιημένο σε σύγκριση με το 2010 με μαζική διείσδυση των ΑΠΕ και την ανάπτυξη τεχνολογιών που δεν είναι ακόμα διαθέσιμες σε μεγάλη κλίμακα (CCS, υδρογόνο, ηλιακά θερμικά). Ο άνθρακας αποτελεί σήμερα το κυρίαρχο καύσιμο στην παγκόσμια ηλεκτροπαραγωγή, αλλά μακροπρόθεσμα το ποσοστό του θα μειωθεί κυρίως εξαιτίας των κλιματικών πολιτικών. Από την άλλη πλευρά, η τεχνολογία συνδυασμένου κύκλου με φυσικό αέριο καλύπτει το μεγαλύτερο μέρος νέων επενδύσεων μέχρι το 2030, ενώ μακροπρόθεσμα

προβλέπεται εκτεταμένη διείσδυση των ΑΠΕ (η παγκόσμια ηλεκτροπαραγωγή από ΑΠΕ το 2050 έχει πιθανότητα 60% να υπερβεί την παραγωγή από άνθρακα).

Το πρόβλημα της κλιματικής αλλαγής επιδεινώνεται στο σενάριο αναφοράς με αύξηση των συγκεντρώσεων CO₂ εξαιτίας της αύξησης της ενεργειακής κατανάλωσης και του χρησιμοποιούμενου μίγματος καυσίμων. Η στοχαστική προβολή αναφοράς δίνει μόλις 15% πιθανότητα σταθεροποίησης των εκπομπών CO₂, ενώ η πιθανότητα ότι οι εκπομπές CO₂ υπερδιπλασιάζονται εκτιμάται σε 32%. Η ανάλυση δείχνει ότι υπάρχει πιθανότητα 50% οι εκπομπές CO₂ να βρίσκονται στο εύρος μεταξύ 42.5 και 56.5 Gtp το 2050, με τη μέση στοχαστική προβολή του μοντέλου να βρίσκεται κοντά στα αποτελέσματα δημοσιευμένων έγκριτων μελετών. Η παράμετρος που καθορίζει τις κλιματικές πολιτικές είναι η τιμή άνθρακα που έχει ιδιαίτερα υψηλή θετική συσχέτιση μεταξύ των περιοχών και μεγάλη ασυμμετρία, εξαιτίας της εισαγωγής πιθανοτήτων συντονισμένης κλιματικής δράσης που δίνουν μορφή δικόρυφης (bi-modal) κατανομής στις τιμές άνθρακα. Οι εκπομπές CO₂ βραχυπρόθεσμα σχετίζονται σε μεγάλο βαθμό με την αύξηση του ΑΕΠ, ωστόσο, μακροπρόθεσμα η ένταση της κλιματικής πολιτικής παίζει ιδιαίτερα σημαντικό ρόλο και το 2050 η συσχέτισή των εκπομπών CO₂ με το ΑΕΠ είναι μόλις 0.26, ενώ η συσχέτιση με την παγκόσμια τιμή του άνθρακα είναι -0.71.

Η αβεβαιότητα που περιβάλλει την εξέλιξη των διεθνών τιμών καυσίμων είναι ιδιαίτερα σημαντική εξαιτίας της αβεβαιότητας για την εξάντληση των αποθεμάτων, την εξέλιξη του παγκόσμιου συστήματος, τη ζήτηση ενέργειας και του ρόλου του ολιγοπωλιακού καρτέλ-ΟΠΕΚ. Με βάση την στοχαστική ανάλυση, η πιθανότητα ότι η τιμή του πετρελαίου θα υπερβεί τα 100 €/βαρέλι το 2050 είναι 51%, ενώ η αντίστοιχη πιθανότητα για το αέριο εκτιμάται σε 29% και η πιθανότητα ότι η τιμή του άνθρακα θα είναι υψηλότερη από τα επίπεδα του 2010 είναι 61%. Οι διεθνείς τιμές πετρελαίου και αερίου έχουν μεγάλο βαθμό συσχέτισης μεταξύ τους, εξαιτίας γεωλογικών λόγων για τον σχηματισμό υδρογονανθράκων και τη διατήρησή τους σε ιζηματογενείς λεκάνες, της κοινής εξάρτησης από την εξέλιξη του παγκόσμιου ΑΕΠ (εξάντληση κοιτασμάτων), και της αγοράς αερίου με τιμαριθμική αναπροσαρμογή των συμβολαίων με βάση τη διεθνή τιμή του πετρελαίου, ενώ η εξερεύνηση για πετρέλαιο αυξάνει την πιθανότητα για ανακαλύψεις αερίου. Η συσχέτιση μεταξύ των τιμών αερίου και άνθρακα οφείλεται κυρίως στον ανταγωνισμό τους στον τομέα της ηλεκτροπαραγωγής για την κάλυψη της αυξανόμενης παγκόσμιας ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας.

Το στοχαστικό σενάριο κλιματικής πολιτικής υποθέτει αυξημένη ένταση των κλιματικών δράσεων σε παγκόσμιο επίπεδο και συνεπώς οδηγεί σε σημαντική μείωση των παγκόσμιων εκπομπών από το σενάριο αναφοράς, ενώ υπάρχει 87% πιθανότητα μείωσης των παγκοσμίων εκπομπών μεταξύ 2010-2050. Αντίστοιχα, η ατμοσφαιρική συγκέντρωση CO₂ μειώνεται το 2050 από 525 ppm (σενάριο αναφοράς) σε 483 ppm. Η αυξημένη πιθανότητα κλιματικών πολιτικών οδηγεί σε μεταβολές στο ενεργειακό σύστημα με υποκατάσταση της καύσης υδρογονανθράκων από τεχνολογίες χαμηλών εκπομπών και μείωση της κατανάλωσης ενέργειας. Στο σενάριο αναφοράς υπάρχει μόλις 3% πιθανότητα να μειωθεί η κατανάλωση υδρογονανθράκων μεταξύ 2012-2030, ενώ η αντίστοιχη πιθανότητα στο σενάριο κλιματικής δράσης είναι 45%. Η επιβολή

φόρου άνθρακα οδηγεί σε αλλαγές στο μίγμα ηλεκτροπαραγωγής, με τις τεχνολογίες χαμηλών εκπομπών να υποκαθιστούν ορυκτά καύσιμα. Η ανάλυση επιβεβαιώνει ότι μια οικονομικά αποδοτική στρατηγική για τον περιορισμό της κλιματικής αλλαγής είναι η απ-ανθρακοποίηση της ηλεκτροπαραγωγής σε συνδυασμό με την υποκατάσταση ορυκτών καυσίμων από ηλεκτρισμό στους τομείς που δεν είναι ευέλικτοι (νοικοκυριά, μεταφορές). Συνεπώς, το ποσοστό του ηλεκτρισμού στην παγκόσμια τελική ζήτηση ενέργειας αυξάνεται το 2050 κατά μέσο όρο από 28% στο σενάριο αναφοράς σε 34.3%. Το σενάριο κλιματικής δράσης οδηγεί σε αυξημένη (κατά μέσο όρο) διείσδυση των ΑΠΕ στο μίγμα ηλεκτροπαραγωγής, η οποία όμως περιορίζεται μακροπρόθεσμα από το περιορισμένο δυναμικό σε αρκετές περιοχές και από το υψηλό κόστος ενσωμάτωσης ΑΠΕ διακοπτόμενης ισχύος στο δίκτυο όταν καλύπτουν μεγάλο μέρος της ηλεκτρικής ζήτησης. Αντίθετα, οι υψηλοί φόροι άνθρακα οδηγούν σε μεγάλης κλίμακας ανάπτυξη των τεχνολογιών CCS με oxyfuel (32% μέσο ποσοστό το 2050), που δεσμεύουν το 95-99% των εκπομπών και είναι αξιόπιστες επιλογές για κάλυψη του φορτίου βάσης. Από την άλλη πλευρά, η παγκόσμια ζήτηση για ορυκτά καύσιμα μειώνεται οδηγώντας σε μείωση των διεθνών τιμών από το σενάριο αναφοράς, ενώ η τιμή και η ζήτηση του άνθρακα επηρεάζονται περισσότερο εξαιτίας του υψηλότερου συντελεστή εκπομπών CO₂ σε σύγκριση με τους υπόλοιπους υδρογονάνθρακες. Η παγκόσμια ζήτηση για πετρέλαιο επηρεάζεται μακροπρόθεσμα εξαιτίας διείσδυσης εναλλακτικών καυσίμων (ηλεκτρισμός, υδρογόνο). Τέλος, οι μεταβολές για το φυσικό αέριο είναι χαμηλότερες σε σύγκριση με τα υπόλοιπα καύσιμα εξαιτίας της χαμηλότερης έντασης άνθρακα και της υψηλότερης ενεργειακής απόδοσης και του συνδυασμού με τεχνολογίες CCS.

Το σενάριο μη συμβατικού αερίου υποθέτει εκμετάλλευση των κοιτασμάτων μη συμβατικού αερίου σε παγκόσμιο επίπεδο σε συνδυασμό με γρήγορη βελτίωση των τεχνολογιών εξόρυξης (υδραυλική ρωγμάτωση και οριζόντια γεώτρηση) και μειωμένες ανησυχίες για περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Οι κατανομές πιθανοτήτων για κοιτάσματα σχιστολιθικού, έγκλειστου και του μεθανίου από άνθρακα εισάγονται αμερόληπτα στο μοντέλο και σε κάθε πείραμα το μοντέλο ξεκινάει από διαφορετική τιμή. Οι συντελεστές ανάκτησης για κάθε κατηγορία αερίου γενικά παίρνουν τιμές μεταξύ 10-40% και εξαρτώνται από το κόστος εξόρυξης κοιτασμάτων, από την τεχνολογική βελτίωση και τη διεθνή τιμή του φυσικού αερίου. Η αύξηση της παγκόσμιας προσφοράς αερίου οδηγεί σε μείωση της διεθνούς τιμής του με την μέση τιμή να μειώνεται κατά 30% από το σενάριο αναφοράς το 2050 (από 68.2 \$/boe στο σενάριο αναφοράς σε 47.8 \$/boe στο σενάριο). Η μείωση τιμής του φυσικού αερίου επηρεάζει το παγκόσμιο ενεργειακό σύστημα με την παγκόσμια κατανάλωση αερίου να αυξάνεται κατά 22% το 2050 κατά μέσο όρο από το σενάριο αναφοράς, ενώ η ζήτηση για άνθρακα μειώνεται κυρίως στον τομέα της ηλεκτροπαραγωγής. Επιπλέον ο περιορισμένος ανταγωνισμός μεταξύ αερίου και πετρελαίου στο ενεργειακό σύστημα οδηγεί σε μικρή μείωση της παγκόσμιας ζήτησης πετρελαίου, ενώ η διεθνής τιμή Brent μειώνεται κατά 6% το 2050.

Το σενάριο έχει σημαντική επίδραση στον τομέα της παραγωγής ηλεκτρισμού εξαιτίας της σημασίας του λόγου τιμών αερίου προς άνθρακα για τις νέες επενδύσεις. Το ποσοστό του φυσικού αερίου στην παγκόσμια ηλεκτροπαραγωγή αυξάνεται από

22% το 2010 σε 38.7% το 2050 (μέσος όρος), δηλαδή κατά 8.4% υψηλότερο από το σενάριο αναφοράς εξαιτίας της μείωσης της τιμής του αερίου. Την περίοδο 2020-2030 το φυσικό αέριο υποκαθιστά κυρίως τεχνολογίες άνθρακα, ενώ μετά το 2030 οδηγεί σε μείωση το ποσοστό των ΑΠΕ. Η πιθανότητα ότι το αέριο θα ξεπεράσει τον άνθρακα στην παραγωγή ηλεκτρισμού το 2050 είναι 64% στο σενάριο αναφοράς και 96% στο σενάριο αερίου εξαιτίας των αυξημένων πιθανοτήτων το κόστος του συνδυασμένου κύκλου να είναι χαμηλότερο από το κόστος καύσης άνθρακα. Συνολικά, το κόστος της τεχνολογίας συνδυασμένου κύκλου το 2050 έχει 76% πιθανότητα να είναι μικρότερο από τον άνθρακα και την ηλιακή ενέργεια και 58% από τους πυρηνικούς σταθμούς.

Η εκμετάλλευση των μη συμβατικών κοιτασμάτων αερίου έχει σημαντικές επιπτώσεις στις παγκόσμιες εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα εξαιτίας των αλλαγών στις διεθνείς τιμές των καυσίμων και των μεταβολών στην δομή του ενεργειακού συστήματος. Βραχυπρόθεσμα, η αύξηση της παγκόσμιας ζήτησης αερίου οδηγεί σε υποκαταστάσεις καυσίμων με υψηλότερη ένταση εκπομπών (άνθρακα και πετρέλαιο) σε όλους τους τομείς του συστήματος (κυρίως στην ηλεκτροπαραγωγή). Συνεπώς, οι μέσες παγκόσμιες εκπομπές άνθρακα το 2020 μειώνονται κατά 1.1% σε σύγκριση με το σενάριο αναφοράς, ενώ η πιθανότητα χαμηλότερων εκπομπών προσεγγίζει το 100%. Ωστόσο, μακροπρόθεσμα η αυξημένη διείσδυση του αερίου ιδιαίτερα στον τομέα της ηλεκτροπαραγωγής τείνει να υποκαθιστά ενεργειακές μορφές χαμηλών εκπομπών (ΑΠΕ και πυρηνική ενέργεια) καθώς οι διεθνείς τιμές του πετρελαίου και του άνθρακα μειώνονται από τα επίπεδα. Συνεπώς η πιθανότητα μείωσης παγκόσμιων εκπομπών CO₂ από 100% το 2020 μειώνεται σε 49% το 2030, 10% το 2040 και μόλις 4% το 2050. Η μέση αύξηση των παγκόσμιων εκπομπών στο σενάριο φυσικού αερίου σε σύγκριση με το σενάριο αναφοράς υπολογίζεται σε 0.1% το 2030, 1.3% το 2040 και 2.9% το 2050.

8.2.5 Βέλτιστες επενδύσεις στην ηλεκτροπαραγωγή υπό αβεβαιότητα

Οι επενδύσεις στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας αποτελούν μια από τις πιο σημαντικές αποφάσεις στο πλαίσιο του μακροχρόνιου ενεργειακού σχεδιασμού και συνήθως λαμβάνουν υπόψη τους μια σειρά από πολιτικές και στόχους (βιωσιμότητα επενδύσεων, ελαχιστοποίηση κόστους, μείωση εισαγωγών, ασφάλεια τροφοδοσίας και μείωση εκπομπών διοξειδίου άνθρακα). Το χαρτοφυλάκιο των σταθμών παραγωγής σε ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας είναι καθοριστικός παράγοντας της εξέλιξης του μακροπρόθεσμου κόστους της βιομηχανίας. Γενικά, οι επενδύσεις στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας είναι μεγάλης κλίμακας, μη αναστρέψιμες, έχουν μακρά διάρκεια ζωής, μεγάλη ένταση κεφαλαίου και μεγάλη διάρκεια κατασκευής (ιδίως όσον αφορά τους πυρηνικούς σταθμούς). Οι αβεβαιότητες για το κόστος και μη αντιστρεψιμότητα των επενδύσεων τείνουν να οδηγήσουν τους επενδυτές προς ευέλικτες τεχνολογίες παραγωγής ηλεκτρισμού μικρής κλίμακας με βραχυπρόθεσμη απόσβεση της αρχικής επένδυσης και σύντομο χρόνο κατασκευής. Από την άλλη, οι οικονομίες κλίμακας ενθαρρύνουν τους επενδυτές προς μεγάλης κλίμακας εγκαταστάσεις ηλεκτρικής ενέργειας (πυρηνικά, σταθμοί άνθρακα), οι οποίες συνήθως είναι οι καταλληλότερες για την κάλυψη το φορτίου βάσης.

Οι έννοιες της αβεβαιότητας και του κινδύνου είναι στρατηγικά σημαντικές στην διαδικασία λήψης επενδυτικών αποφάσεων, καθώς οι επενδυτές στον τομέα της ηλεκτροπαραγωγής λειτουργούν υπό αβεβαιότητα για τις μελλοντικές συνθήκες της αγοράς, τις πολιτικές και τα κόστη. Το προτεινόμενο μοντέλο ενσωματώνει την έννοια του κινδύνου στην λήψη των αποφάσεων, αφού αποφασίζεται η βέλτιστη κατανομή των επενδύσεων με βάση την μεγιστοποίηση της πιθανότητας το ποσοστό απόδοσης του χαρτοφυλακίου να ξεπεράσει μια ορισμένη τιμή κατωφλίου (ελαχιστοποίηση του κινδύνου) με την προϋπόθεση ότι οι υπόλοιποι στόχοι ικανοποιούνται ως περιορισμοί αιτιοκρατικοί (μέση απόδοση) είτε πιθανοτικοί. Η ανάλυση χρησιμοποιεί απευθείας τα στοχαστικά αποτελέσματα του PROMHΘΕΑ και συνεπώς λαμβάνονται υπόψη οι συστημικές αβεβαιότητες και αλληλεξαρτήσεις των μεταβλητών και σύνθετα πρότυπα διακύμανσης και συνδιακύμανσης. Η ανάλυση χρησιμοποιεί πολυκριτηριακό Μικτό Ακέραιο Προγραμματισμό και κύριο πλεονέκτημά της έναντι της βιβλιογραφίας είναι ότι προσφέρει πλήρη ευελιξία για την αναπαράσταση των κατανομών των αποδόσεων των τεχνολογιών μαζί με μη συμμετρικές κατανομές, ενώ οι αναλύσεις χρησιμοποιούν κυρίως απλοποιημένες ανεξάρτητες κανονικές κατανομές.

Η ανάλυση θεωρεί αβέβαια τα συστατικά του κόστους των εναλλακτικών τεχνολογιών (κόστος κεφαλαίου, απόδοση, κόστος λειτουργίας), την εξέλιξη των κλιματικών πολιτικών, την τιμή πώλησης ηλεκτρισμού στους καταναλωτές και την διάρκεια κατασκευής των επενδύσεων. Η ανάλυση απέδειξε ότι στην περίπτωση που οι επενδυτές αποστρέφονται τον κίνδυνο (risk averse) τείνουν να προτιμούν τεχνολογίες με χαμηλές αβεβαιότητες και μικρό μέσο ποσοστό απόδοσης (π.χ. πυρηνικά). Από την άλλη πλευρά, η τεχνολογία φυσικού αερίου συνδυασμένου κύκλου είναι η τεχνολογία με την υψηλότερη αναμενόμενη απόδοση (εξαιτίας του μικρού κόστους κεφαλαίου), αλλά με την μεγαλύτερη διακύμανση, η οποία προέρχεται από την εξάρτησή της από τις αβεβαιότητες για τις κλιματικές πολιτικές (φόρος στις εκπομπές διοξειδίου άνθρακα) και την εξέλιξη της τιμής του φυσικού αερίου. Η ανάλυση έδειξε όμως ότι ο συνδυασμός της τεχνολογίας συνδυασμένου κύκλου με ανεμογεννήτριες (για ισορροπία) ή/και CCS προσφέρει μια επιλογή αντιστάθμισης κινδύνου για την απόδοση της επένδυσης και δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα για ένα μεγάλο πλήθος τιμών κατωφλίου (όρια αποτυχίας, επιτυχίας και αναμενόμενη απόδοση), ενώ γενικά προσδίδει στο σύστημα ευελιξία, η οποία είναι απαραίτητη ειδικά στο πλαίσιο εκτεταμένης διείσδυσης ΑΠΕ μεταβλητής ισχύος και γι' αυτό προτιμάται από τους επενδυτές ειδικά στην ΕΕ.

8.3 Σύνοψη και μελλοντικές προοπτικές

Η κλιματική αλλαγή αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα προβλήματα σε παγκόσμιο επίπεδο, καθώς ο περιορισμός της οδηγεί σε δραστικό περιορισμό των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου, επιτάχυνση της ενεργειακής εξοικονόμησης σε όλους τους κλάδους, εκτεταμένη διείσδυση ενεργειακών μορφών με χαμηλές εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα, ριζικό μετασχηματισμό του ενεργειακού συστήματος και επιτυχή συντονισμό των παραγόντων του ενεργειακού συστήματος. Η ανάλυση έδειξε την ιδιαίτερα μεγάλη σημασία των παραπάνω συστατικών για την οικονομικά

αποδοτική μετάβαση προς μια παγκόσμια οικονομία χαμηλών εκπομπών. Η επιβολή ενιαίου παγκόσμιου φόρου στις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα (εξίσωση οριακού κόστους μείωσης των εκπομπών σε όλες τις χώρες και τους τομείς) οδηγεί σε σχετικά χαμηλά κόστη για τον περιορισμό της κλιματικής αλλαγής, τα οποία κυμαίνονται από 0.5-2% του ΑΕΠ ανά περιοχή. Το κόστος εξαρτάται από την διάρθρωση της οικονομίας και του ενεργειακού συστήματος κάθε περιοχής, την ένταση άνθρακα ανά μονάδα ΑΕΠ, τις τιμές ενέργειας στο σενάριο αναφοράς και από τις τρέχουσες κλιματικές πολιτικές. Επιπλέον, τα κοιτάσματα των υδρογονανθράκων έχουν σημαντικές επιπτώσεις στην εξέλιξη του ενεργειακού συστήματος, στο μίγμα καυσίμων και στην εξέλιξη των διεθνών τιμών πετρελαίου, φυσικού αερίου και άνθρακα. Η ενεργειακή εξάρτηση των περιοχών επηρεάζει σημαντικά το κόστος μείωσης των εκπομπών καθώς η κλιματική δράση οδηγεί σε μείωση των διεθνών τιμών ενέργειας, το οποίο ωφελεί τους μεγάλους εισαγωγείς καυσίμων (ΕΕ, Ιαπωνία).

Η ανάλυση κατέδειξε την μεγάλη σημασία της ενσωμάτωσης της αβεβαιότητας σε ένα ολοκληρωμένο μεγάλης κλίμακας μοντέλο ενέργειας-οικονομίας, καθώς η κύρια προσπάθεια της έρευνας είναι η συστηματική ενσωμάτωση της αβεβαιότητας σε όλους τους παράγοντες από τους οποίους εξαρτάται η προβολή στο μέλλον του ενεργειακού συστήματος. Η λεπτομερής κάλυψη της αβεβαιότητας σε ένα ολοκληρωμένο μεγάλης κλίμακας μοντέλο του παγκόσμιου ενεργειακού συστήματος επιτρέπει την ποσοτικοποίηση όλων των αποτελεσμάτων και προβολών με τη μορφή κατανομών πιθανοτήτων που παράγονται ενδογενώς από το μοντέλο και οι οποίες δεν λαμβάνουν προ-καθορισμένη μορφή. Το ενδιαφέρον αποτέλεσμα του μοντέλου είναι ακριβώς η μορφή της κατανομής πιθανοτήτων που το μοντέλο παράγει για κάθε μέγεθος που προβάλλεται στο μέλλον. Η μορφή αυτή μπορεί να αξιολογηθεί από τον χρήστη του μοντέλου ώστε να προκύψουν συμπεράσματα σχετικά με το εύρος της αβεβαιότητας για κάθε προβολή στο μέλλον. Για παράδειγμα το μοντέλο παράγει πιθανολογικές εκτιμήσεις για την εξέλιξη σημαντικών μεταβλητών του συστήματος (π.χ. η πιθανότητα ότι οι παγκόσμιες εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα δεν θα υπερβούν ένα συγκεκριμένο όριο το 2050) ως αποτέλεσμα της λειτουργίας του ενεργειακού συστήματος υπό αβεβαιότητα. Η πληροφορία σχετικά με την αβεβαιότητα των προβολών στο μέλλον αποτελεί κρίσιμη παράμετρο στον σχεδιασμό αποτελεσματικών πολιτικών και επομένως η ολοκληρωμένη ποσοτικοποίηση του κινδύνου που παρέχει το μοντέλο είναι στρατηγικής σημασίας.

Κατά την κατασκευή του στοχαστικού μοντέλου, η κύρια προσπάθεια είναι η ενδεδειγμένη κάλυψη της αβεβαιότητας με την εισαγωγή της στην δημιουργία των κατανομών πιθανοτήτων για όλες τις παραμέτρους εισόδου. Συνεπώς, το μοντέλο ενσωματώνει με ρητό και αμερόληπτο τρόπο τις κυριότερες κατηγορίες αβεβαιοτήτων που αναγνωρίζονται στην διεθνή βιβλιογραφία και συγκεκριμένα την έλλειψη γνώσης για την εξέλιξη των εξωγενών υποθέσεων του μοντέλου, την αβεβαιότητα από ατελή γνώση του συστήματος για την τιμή των παραμέτρων του μοντέλου (παραμετρική αβεβαιότητα) και την διακύμανση από μεταβλητές που δεν έχουν ενσωματωθεί ρητά στο μοντέλο (υπολείμματα εξισώσεων). Τα παραπάνω εισάγονται με τη μορφή

κατανομών πιθανοτήτων, ενώ η ανάλυση βασίζεται στην μεθοδολογία "Monte Carlo" με 2000 πειράματα παρέχοντας κατανομές πιθανοτήτων για ενδογενείς μεταβλητές. Για την παραγωγή των κατάλληλων κατανομών για τις παραμέτρους και τις υποθέσεις που εισάγονται στο μοντέλο, χρησιμοποιούνται εκτενώς οικονομετρικές εκτιμήσεις με βάση παρατηρημένες χρονολογικές σειρές. Οι εκτιμήτριες των παραμέτρων βασίζονται σε μεθόδους αμερόληπτης εκτίμησης με χρήση κατάλληλων μεθόδων παλινδρόμησης και στατιστικού μετασχηματισμού χρονοσειρών. Η ανάλυση δίνει ιδιαίτερη προσοχή στη στατιστική εξάρτηση των παραμέτρων που εισάγονται στο μοντέλο, δεδομένου ότι η συνδιακύμανση διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στον προσδιορισμό της κατανομής των ενδογενών μεταβλητών και ιδιαίτερα των αθροιστικών.

Η αβεβαιότητα διαδραματίζει καθοριστικό ρόλο για τις προεκτάσεις στο μέλλον των μοντέλων ενέργειας-οικονομίας και είναι αναγκαία η ενδεδειγμένη ενσωμάτωσή της. Η ανάλυση αβεβαιότητας επιτρέπει την διερεύνηση των σημαντικότερων παραμέτρων εισόδου στα στοχαστικά αποτελέσματα του μοντέλου: ο ρυθμός αύξησης του ΑΕΠ στις αναπτυσσόμενες χώρες, οι κλιματικές πολιτικές, τα παγκόσμια κοιτάσματα ορυκτών καυσίμων (ιδιαίτερα τα κοιτάσματα σχιστολιθικού μη συμβατικού αερίου), το πρότυπο καθιέρωσης των επιβατικών αυτοκινήτων στις αναπτυσσόμενες οικονομίες (καθώς αυξάνει το ΑΕΠ τους) και η τεχνολογική πρόοδος στις τεχνολογίες ΑΠΕ για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας (κυρίως ανεμογεννήτριες και φωτοβολταϊκά). Η αβεβαιότητα αυξάνεται μακροπρόθεσμα για τις μεταβλητές του ενεργειακού συστήματος, ενώ οι αθροιστικές κατανομές τείνουν να έχουν μικρότερη διακύμανση. Από την άλλη πλευρά, η διακύμανση τείνει να είναι υψηλότερη σε μεταβλητές για τις οποίες υπάρχει εγγενής όπως η διείδυση τεχνολογιών που δεν είναι ακόμα εμπορικά διαθέσιμες σε μεγάλη κλίμακα (CCS, ηλεκτρικά αυτοκίνητα, κυψέλες υδρογόνου, ηλιακά θερμικά). Επιπλέον, οι διεθνείς τιμές αγοράς των καυσίμων έχουν ιδιαίτερα υψηλή διακύμανση (που είναι σύμφωνο με τα ιστορικά δεδομένα) εξαιτίας της επίδρασης πολλαπλών αβέβαιων παραγόντων (ζήτηση ενέργειας, κλιματικές πολιτικές, κόστος εξόρυξης ανά περιοχή, αποθέματα, εκμετάλλευση μη συμβατικών κοιτασμάτων) αλλά και της διακριτής πιθανότητας για διαταραχή εφοδιασμού στην περιοχή του Περσικού Κόλπου. Τέλος, εξετάστηκε η βέλτιστη κατανομή των επενδύσεων σε τεχνολογίες ηλεκτροπαραγωγής υπό καθεστώς αβεβαιότητας με βάση την ελαχιστοποίηση του κινδύνου υποθέτοντας ότι οι επενδυτές αποστρέφονται το ρίσκο. Η μοντελοποίηση βασίστηκε σε μεθόδους στοχαστικού μικτού ακεραίου γραμμικού προγραμματισμού, ενώ τα δεδομένα για την αβεβαιότητα τροφοδοτούνται από το στοχαστικό ενεργειακό μοντέλο. Η ανάλυση έδειξε την σημασία του συνδυασμού των τεχνολογιών αερίου συνδυασμένου κύκλου με ανεμογεννήτριες καθώς αποτελεί μια επιλογή με σχετικά χαμηλά κόστη επένδυσης, μικρές αβεβαιότητες και μεγάλη ευελιξία ως προς πιθανές μελλοντικές διαμορφώσεις του συστήματος ηλεκτροπαραγωγής (κλιματικές πολιτικές, τιμές καυσίμων, ευστάθεια στο δίκτυο σε περιπτώσεις μεγάλης διείδυσης ΑΠΕ διακοπτόμενης ισχύος).

Τα σημεία που δεν κάλυψε αναλυτικά η παρούσα διατριβή και παρουσιάζουν ερευνητικό ενδιαφέρον και αποτελούν πιθανό αντικείμενο μελλοντικών προεκτάσεων αφορούν κυρίως την πιο αναλυτική αναπαράσταση του ενεργειακού συστήματος.

Συγκεκριμένα, το μοντέλο ηλεκτροπαραγωγής μπορεί να επεκταθεί με πιο αναλυτική προσομοίωση της καμπύλης διάρκειας φορτίου, ενσωμάτωση περισσότερων επιλογών και ενσωμάτωση μεταβλητότητας των ΑΠΕ διακοπτόμενης ισχύος (αιολική και ηλιακή ενέργεια) μέσω εισαγωγής τεχνικών περιορισμών και τεχνολογιών αποθήκευσης. Η διαφοροποίηση του κόστους κεφαλαίου μεταξύ περιοχών θα οδηγήσει σε πιο ακριβή αναπαράσταση της διάχυσης της γνώσης για ενεργειακές τεχνολογίες. Η βελτίωση της σύνδεσης της ανάπτυξης υποδομών με την διείσδυση τεχνολογιών (π.χ. υποδομές επαναφόρτισης μπαταριών με διείσδυση ηλεκτρικών αυτοκινήτων, ανάπτυξη δικτύου παράλληλα με την εισαγωγή ΑΠΕ διακοπτόμενης ισχύος) παρέχει ένα πιο συνεκτικό πλαίσιο μελέτης των ριζικών μετασχηματισμών του ενεργειακού συστήματος.

Στα μοντέλα καθορισμού της ενεργειακής ζήτησης οι πιο σημαντικές βελτιώσεις αφορούν την βελτίωση της αναπαράστασης της ενεργειακής εξοικονόμησης και την ρητή σύνδεσή του με επενδύσεις (π.χ. μόνωση κτιρίων) και την εισαγωγή κλάσεων καταναλωτών με βάση το κατά κεφαλή εισόδημα, η οποία θα προσδώσει μεγαλύτερο ρεαλισμό στην προσομοίωση αποφάσεων ανά τύπο καταναλωτή. Σε άμεση συνάφεια με την εξέταση κλιματικών πολιτικών, βρίσκεται η ενσωμάτωση καμπυλών οριακού κόστους για την μείωση των εκπομπών για τα αέρια του θερμοκηπίου εκτός από το διοξείδιο του άνθρακα (CH₄, N₂O, F-gases).

Παρά την προφανή σημασία των παραπάνω προτεινόμενων επεκτάσεων, η ενσωμάτωσή τους στον ΠΡΟΜΗΘΕΑ αποτελεί μια ιδιαίτερα πολύπλοκη διαδικασία και πρόκληση καθώς η αβεβαιότητα για όλες τις παραμέτρους εισόδου εισάγεται ρητά με βάση οικονομετρικές εκτιμήσεις, στατιστική επεξεργασία ιστορικών δεδομένων και ευρύ φάσμα εμπειρογνωμοσύνης ώστε να αποφευχθεί η μεροληψία.

Δημοσιεύσεις σε διεθνή επιστημονικά περιοδικά

- **P Fragkos**, N Kouvaritakis, P Capros, Incorporating Uncertainty into World Energy Modelling: the PROMETHEUS Model, Environmental Modelling & Assessment, Springer, Oct. 2015, Vol. 20, Issue 5, pp. 549-569
- **P Fragkos**, N Kouvaritakis, P Capros, Model-based analysis of the future strategies for the MENA energy system, Energy Strategy Reviews, Elsevier, Vol. 2, Issue 1, June 2013, pp. 59-70
- Paroussos L., **Fragkos P.**, Capros P., Fragkiadakis K., "Assessment of carbon leakage through the industry channel: The EU perspective", Technological Forecasting and Social Change, Elsevier, January 2015, Vol. 90-A, pp. 204-219
- Marcucci A., **Fragkos P.**, "Drivers of regional decarbonisation through 2100: A multi-model decomposition analysis", Energy Economics, Elsevier, Vol. 51, Sept. 2015, pp. 111-124
- Capros, P., De Vita A., **Fragkos P.**, Kouvaritakis N., Paroussos L., Fragkiadakis K., Tasios N., Siskos P. The impact of hydrocarbon resources and GDP growth assumptions for the evolution of the EU energy system, Energy Strategy Reviews, Elsevier, Vol. 6, January 2015, Pages 64-79
- Capros P., Paroussos L., **Fragkos P.**, Tsani S., Boitier B., Wagner F., Busch S., Resch G., Blesl M., Bollen J., "European decarbonisation pathways under alternative technological and policy choices: A multi-model analysis", Energy Strategy Reviews, Elsevier, Volume 2, Issues 3-4, February 2014, Pages 231-245
- Capros P., Paroussos L., **Fragkos P.**, Tsani S., Boitier B., Wagner F., Busch S., Resch G., Blesl M., Bollen J., "Description of models and scenarios used to assess European decarbonisation pathways", Energy Strategy Reviews, Volume 2, Issues 3-4, Elsevier, February 2014, Pages 220 - 230
- Karkatsoulis P., P. Capros, **Fragkos P.**, L. Paroussos, S. Tsani, First -Mover Advantages of the European Union's Climate Change Mitigation Strategy, Wiley, International Journal of Energy Research, 2016, DOI: 10.1002/er.3487

Δημοσιεύσεις σε πρακτικά συνεδρίων

- Karkatsoulis P., L. Paroussos, **P. Fragkos** & P. Capros, Using a general equilibrium model to evaluate first mover advantage in climate policy, ENVECON, 2014, "Οικονομική των φυσικών πόρων και του περιβάλλοντος: κλιματική αλλαγή", Μάρτιος 2014, Βόλος

Κεφάλαια σε επιστημονικά βιβλία

- P. Capros, **P. Fragkos**, N. Kouvaritakis, "Analysis of future common strategies between the South and East Mediterranean area and the EU in the energy sector", MEDREG Book, "Regulation & Investments in Energy Markets, Elsevier, 2015
- Helmreich, S. and Keller, H. (Eds.) with contributions from various authors

(2011). *FREIGHTVISION - "Sustainable European Freight Transport 2050"*. 1st Edition January 2011, ISBN: 978-3-642-13370-1, Springer

Άλλες μελέτες/ τεχνικές εκθέσεις

- **Fragkos P.**, Kouvaritakis N., Capros P., (2013), "Prospects for Energy Supply and Demand in the Southern Mediterranean: Scenarios for 2010-2030", MEDPRO technical report No. 22, December 2012.
- **Fragkos P.**, Paroussos, L., Capros, P., Boitier B., Report on impacts for Europe of incomplete carbon markets, AMPERE study (2013), Available at: <http://ampere-project.eu/web/>
- Capros P., De Vita A., Tasios N., Chanioti X., Kouvaritakis N., **Fragkos P.**, (2011), "Energy Roadmap 2050 - Impact assessment and scenario analysis", European Commission-Directorate General for Energy
- Capros, P., Mantzos, L., Tasios, N., Chanioti, X., De Vita, A., Paroussos, L., Kouvaritakis, N., **Fragkos P.**, (2011). "Long-term energy outlook: The challenges for the energy sector in Greece until 2050". Foundation for Economic and Industrial Research.
- Capros P., Karkatsoulis P., Kouvaritakis, N., **Fragkos, P.**, Paroussos, L., Boitier B., Report on potential co-benefits of mitigation for Europe, AMPERE study (2013), Available at: <http://ampere-project.eu/web/>
- E. Kriegler, K. Riahi, N. Petermann, V. Bosetti, P. Capros, D. P. van Vuuren, P. Criqui, C. Egenhofer, **P. Fragkos**, N. Johnson, L. Paroussos, A. Behrens, O. Edenhofer. Assessing Pathways toward Ambitious Climate Targets at the Global and European Levels A synthesis of results from the AMPERE project, 2014, Available at: <http://ampere-project.eu/web/>
- Spencer, T., Pierfederici, R., with contributions from various authors (2015). Beyond the numbers: understanding the transformation induced by INDCs, Study N°05/15, IDDRI-MILES Project Consortium, Paris, France, 80 p
- Karkatsoulis P., Kouvaritakis N., Paroussos L., **Fragkos P.**, Capros P., (March 2014), "Modification of GEM-E3 technological innovation module", SIMPATIC working paper 18, Available at: <http://simpatic.eu/category/publications/working-papers/>
- Karkatsoulis P., **Fragkos P.**, Kouvaritakis N., Paroussos L., Capros P., (July 2014), "Simulation tests on GEM-E3", SIMPATIC working paper No 20, Available at: <http://simpatic.eu/category/publications/working-papers/>
- Karkatsoulis P., **Fragkos P.**, Kouvaritakis N., Paroussos L., Capros P., (September 2014), "Policy Assessment with NEMESIS and GEM-E3 in the state of the art modelling", SIMPATIC working paper No 22, Available at: <http://simpatic.eu/category/publications/working-papers/>
- Karkatsoulis P., **Fragkos P.**, Kouvaritakis N., Paroussos L., Capros P., (February 2015), "Policy Assessment with GEM-E3 using the model development realised in SIMPATIC", SIMPATIC working paper No 35b, <http://simpatic.eu/category/publications/working-papers/>

Βιβλιογραφία

- [1] KYOTO PROTOCOL TO THE UNITED NATIONS FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATE CHANGE, United Nations, 1998
- [2] IPCC, Climate change 2007: Mitigation, B. Metz, O.R. Davidson, P.R. Bosch, R. Dave, L.A. Meyer (Eds.), Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Inter-governmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge, UK (2007)
- [3] UNFCCC, Report of the Conference of the Parties on its Seventeenth Session, held in Durban from 28 November to 11 December 2011, In: Addendum Part Two Action Taken by the Conference of the Parties at Its Seventeenth Session, UN Framework Convention on Climate Change (2011) (FCCC/CP/2011/9/Add.1)
- [4] Hudson E. A., & Dale W. Jorgenson, 1974. "Energy Policy and U.S. Economic Growth" American Economic Review, 1978, Vol. 68, issue 2, pp 118-123
- [5] Manne, A. S., (1976): "ETA: A Model for Energy Technology Assessment," Bell Journal of Economics, also appears as ch. 12c in M. D. Intrilligator (ed.), Frontiers of Quantitative Economics, vol. IIIB, 1977, North-Holland, Amsterdam.
- [6] Stern., N., 2006, The economics of climate change: The Stern review, Technical report, Cambridge University Press, Cambridge, UK, 2006
- [7] Kriegler, E, Riahi, K, et al, Making or breaking climate targets: The AMPERE study on staged accession scenarios for climate policy, Technological Forecasting and Social Change, Volume 90, Part A, January 2015, Pages 24–44
- [8] European Commission, Energy Roadmap 2050, Impact Assessment and Scenario Analyses (2011), Available at: http://ec.europa.eu/energy/energy2020/roadmap/doc/roadmap2050_ia_2_0120430_en.pdf
- [9] Kann, A. and Weyant, J., 2000, Approaches for performing uncertainty analysis in large-scale energy/economic policy models, Environmental Modeling and Assessment, Vol. 5, pp. 29-46.
- [10] Luderer, G., Bertram, C., Calvin, K., De Cian, E., Kriegler, E. Implications of weak near-term climate policies on long-term mitigation pathways. DOI 10.1007/s10584-013-0899-9
- [11] Kouvaritakis N. and Panos V., 2005, Stochastic Outlook using PROMETHEUS, SAPIENTIA project, Detailed Final Report, p. 329-355 & 458-468
- [12] Metropolis, N. and S. Ulam. "The Monte Carlo Method", Journal of the American Statistical Association, Volume 44, Number 247, September 1949, pp 335-341
- [13] Metropolis, N., The beginning of the Monte Carlo method, Los Alamos Science Special Issue 1987

- [14] John von Neumann, "Various techniques used in connection with random digits," National Bureau of Standards Applied Mathematics Series, vol. 12 (Washington, D.C.: U.S. Government Printing Office, 1951): pp. 36-38.
- [15] Fishman, G. S. (1995). Monte Carlo: Concepts, Algorithms, and Applications. New York: Springer. ISBN 0-387-94527-X.
- [16] J. M. Hammersley, D. C. Handscomb, Monte Carlo Methods, 1964, London: Methuen & CO LTD
- [17] Knuth, D. E. (1997). The Art of Computer Programming, Volume 2, Semi-numerical Algorithms, 3rd edition,
- [18] L'Ecuyer, P. (1999). "Good Parameters and Implementations for Combined Multiple Recursive Random Number Generators," Operations Research, 47(1), 159-164
- [19] Glasserman, P. (2003). Monte Carlo Methods in Financial Engineering, Springer-Verlag, New York.
- [20] Wilkie, A.D. (1984), Steps towards a comprehensive stochastic model. Occasional Actuarial Research Discussion Paper, The Institute of Actuaries, London, 36:1-231
- [21] S.P. Whitten and R.G. Thomas, A Non-Linear Stochastic Asset Model for Actuarial Use, British Actuarial Journal, Volume 5, Issue 05, 1999, pp 919-953
- [22] Lempert, R. J., D. G. Groves, et al. (2006). "A General, Analytic Method for Generating Robust Strategies and Narrative Scenarios" Management Science 52(4): 514-528.
- [23] Pindyck R., 2007, Uncertainty in Environmental Economics, Review of Environmental Economics and Policy, Volume 1, 45-65
- [24] Dietz, S. and Fankhauser, S., 2010, Environmental prices, uncertainty, and learning, Oxford Review of Economic Policy, 26:2, pp. 270-284.
- [25] Peterson, S., 2006, Uncertainty and economic analysis of climate change: a survey of approaches and findings, Environmental modelling & assessment, ISSN 1420-2026, Vol. 11, Iss. 1, pp. 1-17
- [26] Zapert, R., Gaertner, P. S., Filar, J. A., Uncertainty Propagation within an Integrated Model of Climate Change, Energy Economics, Vol. 20, No. 5-6, December 1998.
- [27] IPCC, Climate Change 2001, Impacts, Adaptation and Vulnerability (Cambridge University Press, New York, USA, 2001).
- [28] Tversky, A. and D.Kahneman, Judgment under Uncertainty: Heuristics and Biases, Science, Vol. 185, September 1974.
- [29] Braddock, R. D., J. A. Filar and R. Zapert, Stochasticity in the Image Greenhouse Model, Mathematical Computer Modelling, Vol. 22, No. 10-12, 1995.
- [30] Parson, Edward A. and Fisher-Vanden, Karen, Integrated Assessment of Global Climate Change, Annual Review of Energy and the Environment, Volume 22, 1997.

- [31] Alberth, S. and Hope, C., 2006, Climate modeling with endogenous technical change: Stochastic learning and optimal greenhouse gas abatement in the PAGE2002 model, *Energy Policy*, 35(3): 1795-1807
- [32] M. Manning and M. Petit, A concept paper for the AR4 cross cutting theme: uncertainty and risk, 2003
- [33] Tol, R.S.J. (2003), 'Is the Uncertainty about Climate Change Too Large for Expected Cost-Benefit Analysis?', *Climatic Change*, 56 (3), 265-289.
- [34] Nordhaus, W. and Yohe, G., 1983, Future paths of energy and carbon dioxide emissions, *Changing Climate: Report of the Carbon Dioxide Assessment Committee*, National Research Council, National Academy Press, Washington DC, USA.
- [35] Edmonds, J.A., Reilly, J.M., Gardner, R.H. and Brenkert, A., Uncertainty in Future Global Energy Use and Fossil Fuel CO₂ Emission 1975 to 2075, Report TR036, DO3/NBB-0081 Dist. Category UC-11 (National Technical Information Service, U.S. Department of Commerce, Washington, DC, USA).
- [36] Reilly J.M., J.A. Edmonds, R.H. Gardner, and A.L. Brenkert (1987). Uncertainty analysis of the IEA/ORAU CO₂ emissions model, *The Energy Journal* 8 1-29 pp. (ISSN: 0195-6574).
- [37] IEA, World energy model, IEA, Tech. Rep., 2012. [Online]. Available: <http://www.iea.org/publications/worldenergyoutlook/weomodel/>
- [38] IEA, World Energy Outlook 2012
- [39] IPTS (Institute for Prospective Technological Studies), Prospective Outlook on Long-Term Energy Systems-POLES Manual, Version 6.1, European Commission Joint Research Centre (2010), http://ipts.jrc.ec.europa.eu/activities/energy-and-transport/documents/POLES_description.pdf, last accessed March 2014
- [40] O'Neill BC, Kriegler E, Riahi K, Ebi K, Hallegatte S, Carter TR, Mathur R, van Vuuren DP (2013). A new scenario framework for climate change research: The concept of shared socio-economic pathways, *Climatic Change* (2014) 122:387-400
- [41] Kriegler, E., Petermann, N., et al, Diagnostic indicators for integrated assessment models of climate policy, *Technological Forecasting and Social Change*, Volume 90, Part A, January 2015, Pages 45-61
- [42] Donella H. Meadows, Dennis L. Meadows, Jørgen Randers and William W. Behrens III, 1972, *The Limits to Growth*
- [43] Capros, P., Paroussos, L., Fragkos, P., Tsani, S., Boitier, B., Wagner, F., Busch, S., Resch, G., Blesl, M., Bollen, J., Description of models and scenarios used to assess European decarbonisation pathways, *Energy Strategy Reviews*, vol 2, issue 3/4, pp 220-230
- [44] P. Capros, D. Van Regemorter, L. Paroussos, P. Karkatsoulis, GEM-E3 Model Manual, 2012, <http://www.e3mlab.ntua.gr/e3mlab/GEM%20-%20E3%20Manual/Manual%20of%20GEM-E3.pdf>

- [45] Babiker, M.H., J.M. Reilly, M. Mayer, R.S. Eckaus, I.S. Wing, and R.C. Hyman (2001), The MIT Emissions Prediction and Policy Analysis (EPPA) Model: Revisions, Sensitivities, and Comparisons of Results, MIT Joint Program on the Science and Policy of Global Change.
- [46] Sassi, O., Crassous, R., Hourcade, J-C., Gitz, V., Waisman, H. and Guivarch, C. (2010) 'IMACLIM-R: a modelling framework to simulate sustainable development pathways', *Int. J. Global Environmental Issues*, Vol. 10, Nos. 1/2, pp.5-24
- [47] Parson, Edward A. and Fisher-Vanden, Karen, *Integrated Assessment of Global Climate Change*, Annual Review of Energy and the Environment, Volume 22, 1997.
- [48] European Union, Decision No 406/2009/EC of the European Parliament and the Council of 23 April 2009 on the efforts of Member States to reduce their greenhouse gas emissions to meet the Community's greenhouse gas emission reduction commitment up to 2020, *Official Journal of the European Union* L140 (2009) 136-148.
- [49] PRIMES Model, 2013-2014, Detailed model description, Available at: <http://www.e3mlab.eu/e3mlab/PRIMES%20Manual/The%20PRIMES%20MODEL%202013-2014.pdf>
- [50] DOE/Energy Information Administration, The National Energy Modeling System: An Overview, 2009, Available at: [http://www.eia.gov/oiaf/aeo/overview/pdf/0581\(2009\).pdf](http://www.eia.gov/oiaf/aeo/overview/pdf/0581(2009).pdf)
- [51] Loulou, R., Remne, U., Kanudia, A., Lehtila, A., Goldstein, G., 2005. Documentation for the TIMES Model – Part I
- [52] Joint Global Change Research Center, Global Change Assessment Model, www.globalchange.umd.edu/models/gcam
- [53] A.F. Bouwman, T. Kram, K. Klein Goldewijk, *Integrated Modelling of Global Environmental Change-An Overview of IMAGE 2.4*, Netherlands Environmental Assessment Agency (MNP), Bilthoven, The Netherlands, 2006
- [54] M. Leimbach, N. Bauer, L. Baumstark, M. Lueken, O. Edenhofer, *Technological Change and International Trade-insights from ReMIND-R*, *The Energy Journal* 31(2) (2010) 109-136.
- [55] V. Bosetti, C. Carraro, M. Galeotti, E. Massetti, M. Tavoni, *WITCH: A World Induced Technical Change Hybrid Model*, *The Energy Journal* 27(Special Issue 2) (2006) 13-38.
- [56] K. Riahi, A. Grübler, N. Nakicenovic, *Scenarios of long-term socio-economic and environmental development under climate stabilization*, *Technological Forecasting and Social Change* 74(7) (2007) 887-935.
- [57] Yohe, Gary W., *Selecting "interesting" scenarios with which to analyze policy response to potential climate change*, *Climate Research*, December 1991.
- [58] Karkatsoulis P., Fragkos P., Kouvaritakis N., Paroussos L., Capros P., (2014), "Simulation tests on GEM-E3", SIMPATIC project, Working paper

- [59] Bankes, Steve C., *Exploratory Modeling for Policy Analysis*, Operations Research, Vol. 41, No 3, May-June 1993.
- [60] Blanford, G. J.; Kriegler, E.; Tavoni, M., 2014, Harmonization vs. fragmentation: overview of climate policy scenarios in EMF27, *Climatic Change*, April 2014, Volume 123, Issue 3-4, pp 383-396
- [61] W. Nordhaus and D. Popp, What is the value of scientific knowledge? An application to global warming using the PRICE model, *Energy J.* 18 (1997), pp. 1-46
- [62] Der Kiureghian A., Ditlevsen O., Aleatory or epistemic? Does it matter?, *Structural Safety*, 31 (2009) 105–112
- [63] Spiegelhalter, D.J. & Riesch, H., 2011. Don't know, can't know: embracing deeper uncertainties when analysing risks. *Philosophical transactions. Series A, Mathematical, physical, and engineering sciences*, 369(1956), pp.4730–50.
- [64] Walker, W.E. et al., 2003. Defining Uncertainty: A Conceptual Basis for Uncertainty Management in Model-Based Decision Support. *Integrated Assessment*, 4(1), pp.5–17. Available at: <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1076/iaij.4.1.5.16466>
- [65] Stainforth, D. A., M. R. Allen, et al. (2007). "Confidence, uncertainty and decision-support relevance in climate predictions." *Philosophical Transactions of the Royal Society A* 365(1857): 2145-2161.
- [66] Medhi, J., *Stochastic Models in Queueing Theory*, 2003, Elsevier, ISBN: 978-0-12-487462-6, <http://www.sciencedirect.com/science/book/9780124874626>
- [67] de Finetti, B. (1974), *Theory of Probability*, Vol. 1. New York: John Wiley and Sons
- [68] Ellsberg, D. (1961). "Risk, ambiguity and the Savage axiom." *Quarterly Journal of Economics* 75(4): 643-669.
- [69] J. Gjerde, S. Grepperud and S. Kverndokk, Optimal climate policy in the possibility of a catastrophe, *Resour. Energy Econ.* 21 (1999) 289Y317
- [70] Mastrandrea MD, Mach KJ (2011) Treatment of uncertainties in IPCC assessment reports: past approaches and considerations for the fifth assessment report. *Clim Change* 108(4):659–673. Doi: 10.1007/s10584-011-0177-7
- [71] D.L. Kelly and C.D. Kolstad, Integrated assessment models for climate change control, in: *International Yearbook of Environmental and Resource Economics 1999/2000: A Survey of Current Issues*, eds. H. Folmer and T. Tietenberg (Cheltham, UK, 1999) pp. 171-197
- [72] W. Nordhaus, *Managing the Global Commons* (MIT Press, Cambridge, 1994)
- [73] A.C. Fisher and U. Narain, Global warming, endogenous risk, and irreversibility, *Environ. Resour. Econ.* 25 (2003) 395-416
- [74] Pizer, W.A., 1999, The optimal choice of climate change policy in the presence of uncertainty, *Resource and Energy Economics*, vol.21, pp.255-287

- [75] Webster, M. D., Babiker, M., Mayer, M., Reilly, J. M., et al., 2002, Uncertainty in emissions projections for climate models, *Atmospheric Environment*, 36 (22), 3659-3670.
- [76] Webster, M., Paltsev, S., Parsons, J., Reilly, J., & Jacoby, H. (2008). Uncertainty in greenhouse emissions and costs of atmospheric stabilization. Technical report, Joint Program Report Series
- [77] Babonneau F., Haurie A., Loulou R. and Vielle M. , 2012, Combining Stochastic Optimization and Monte Carlo Simulation to Deal with Uncertainties in Climate Policy Assessment, *Environmental Modeling & Assessment*, Vol. 17, pp. 51-76.
- [78] Bosetti V., Golub A., Markandya A., Massetti E., Tavoni M., 2008, Abatement cost uncertainty and policy instrument selection under a stringent climate policy. A dynamic analysis, *Fondazione Eni Enrico Mattei Working Paper Series*, Climate change modelling and policy, 15.2008
- [79] Scott, M. J., Sands, R. D., Edmonds, J., Liebetrau, A. M., & Engel, D. W., 1999, Uncertainty in integrated assessment models: Modeling with MiniCAM 1.0, *Energy Policy*, vol.27, issue 14, pp. 855-879.
- [80] Kypreos, S., 2008, Stabilizing global temperature change below thresholds: Monte Carlo analyses with merge, *Computational Management Science*, 5(1), 141-170.
- [81] Loulou, R., & Kanudia, A. (1999), Minimax regret strategies for greenhouse gas abatement: Methodology and application, *Operations Research Letters*, 25, 219-230.
- [82] Hunt L.C. and Y. Ninomiya, Modelling underlying energy demand trends and stochastic seasonality: An econometric analysis of transport oil demand in the UK and Japan, *Surrey Energy Economics Centre (SEEC)*, SEEDS 107, ISSN 1749-8384, 2003
- [83] Available at: <https://seds.nrel.gov/> and J. Milford, An Overview and Summary of Capabilities of the Stochastic Energy Deployment System (SEDS) Model, 2010
- [84] P Fragkos, N Kouvaritakis, P Capros, Incorporating Uncertainty into World Energy Modelling: the PROMETHEUS Model, *Environmental Modelling & Assessment*, 2015
- [85] United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division, *World Population Prospects: The 2012 Revision*, New York, 2013
- [86] International Energy Agency, *World Energy Outlook 2014*
- [87] OECD (2014), *OECD Economic Outlook*, OECD, Paris
- [88] IMF (International Monetary Fund) (2014), *World Economic Outlook 2014: Legacies, Clouds, Uncertainties*, IMF, Washington, DC, October 2014
- [89] IEA analysis of fossil fuel subsidies, IEA, 2011, Available here: http://www.iea.org/media/weowebwebsite/energysubsidies/ff_subsidies_slides.pdf
- [90] Hoogwijk, M., 2004, On the global and regional potential of renewable energy sources, PhD dissertation, Utrecht University

- [91] Ackermann, T., Leutz, R., and Hobohm, J., 2001, Worldwide offshore wind potential and European projects, Power Engineering Society Summer Meeting, vol. 1, IEEE
- [92] Bartle, A., 2002, Hydropower potential and development activities, Energy Policy, vol. 30, pp. 1231-1239
- [93] De Vries, B.J.M., Van Vuuren, D.P., Hoogwijk, M., 2006, Renewable energy sources: Their global potential for the first-half of the 21st century at a global level: An integrated approach, Energy Policy, vol. 35, pp. 2590-2610
- [94] Hoogwijk, M., De Vries, H.J.M., Turkenburg, W.C., 2004, Assessment of the global and regional geographical, technical and economic potential of onshore wind energy, Energy Economics, vol. 26, pp. 889-919.
- [95] Fischer, G., and Schratzenholzer, L., 2001, Global bioenergy potentials through 2050, Biomass and Bioenergy, vol. 20, issue 3, pp. 151-159
- [96] Yamamoto, H., Fujino, J., and Yamaji, K., 2001, Evaluation of bioenergy potential with a multi-regional global-land-use-and-energy model, Biomass and Bioenergy, vol. 21, issue 3, pp. 185-203
- [97] Parikka, M., 2004, Global biomass fuel resources, Biomass and Bioenergy, vol. 27, issue 6, pp. 613-620.
- [98] Moreira, J. R., 2006, Global biomass energy potential, Mitigation and adaptation strategies for global change, vol. 11, issue 2, pp. 313-333
- [99] Fragkos, P., Kouvaritakis N. and Capros P., 2013, Model-based analysis of the future strategies for the MENA energy system, Energy Strategy Reviews, vol. 2, issue 1, pp. 59-70
- [100] Παλαιολούγκα, Ε., Φράγκος, Π., Η Οικονομία του Υδρογόνου, Διπλωματική Εργασία, http://artemis.cslab.ntua.gr/el_thesis/artemis.ntua.ece/DT2009-0271/DT2009-0271.pdf
- [101] USGS, 2000, US Geological Survey, World Petroleum assessment 2000, United States
- [102] Schenk, C.J., 2012, An estimate of undiscovered conventional oil and gas resources of the world, 2012: U.S. Geological Survey Fact Sheet 2012-3042, 6 p
- [103] PRMS (Petroleum Resources Management System) (2007), Petroleum Resources Management System, Society of Petroleum Engineers, Houston.
- [104] UNECE (United Nations Economic Commission for Europe) (2009), United Nations Framework Classification for Fossil Energy and Mineral Resources, 2009, UNECE, New York and Geneva.
- [105] Κότσιοι, Ν., Μελέτη της επίδρασης των μη συμβατικών πηγών φυσικού αερίου στο ενεργειακό σύστημα σε παγκόσμιο και ευρωπαϊκό επίπεδο, Διπλωματική Εργασία , Διαθέσιμη: http://artemis.cslab.ntua.gr/el_thesis/artemis.ntua.ece/DT2013-0144/DT2013-0144.pdf

- [106] EXPLORATION & INNOVATION: GEOSCIENTISTS PUSH THE FRONTIERS OF UNCONVENTIONAL OIL AND GAS, Wood Mackenzie, Posted on April 12, 2008
- [107] Holditch, S.A. 2006. Tight Gas Sands, SPE Paper 103356, Distinguished Author Series.
- [108] EC, JRC, 2012, Unconventional Gas: Potential Market Impacts in the European Union
- [109] Kuuskraa V. A., 2009, Worldwide Gas Shales and Unconventional Gas: A Status Report, Advanced Resources International Inc.
- [110] Rogner, H. H., 1997, An Assessment of World Hydrocarbon Resources, Annual Review of Energy and Environment, vol. 22, pp. 217-262.
- [111] GEA, 2012: Global Energy Assessment-Toward a Sustainable Future, Cambridge University Press, Cambridge UK and New York, USA and the International Institute for Applied Systems Analysis, Laxenburg, Austria
- [112] Klett, T.R., Cook, T.A., Charpentier, R.R., Tennyson, M.E. et al., 2012, Assessment of potential additions to conventional oil and gas resources of the world (outside the United States) from reserve growth, 2012: U.S. Geological Survey Fact Sheet 2012-3052, 2 p.
- [113] Capros P., Paroussos L., Fragkos P., Tsani S., Boitier B., Wagner F., Busch S., Resch G., Blesl M., Bollen J., (2014), "European decarbonisation pathways under alternative technological and policy choices: A multi-model analysis", Energy Strategy Reviews, Volume 2, Issues 3-4, February 2014, Pages 231-245
- [114] European Commission, EU Energy, transport and GHG trends to 2050- Reference scenario 2013
- [115] International Energy Agency, World Energy Outlook 2011, Special Report: "Are we entering a golden age of gas?" 2011
- [116] BGR, Energy Study: Reserves, Resources and Availability of Energy Resources 2013, Federal Institute for Geosciences and Natural Resources, Hannover 2013
- [117] Ailun, Yang, and Yiyun Cui. 2012. "Global Coal Risk Assessment: Data Analysis and Market Research". WRI Working Paper. World Resources Institute, Washington DC. Available online at: <http://www.wri.org/publication/global-coal-risk-assessment>.
- [118] Kouvaritakis N., Soria, A., Isoard, S., 2000, Endogenous learning in world post-Kyoto scenarios: applications of the POLES model under adaptive expectations, International Journal of Global Energy Issues 14, 222-248.
- [119] Baker E., Clarke L., Shittu E., 2008, Technical change and the marginal cost of abatement, Energy Economics, vol. 30, issue 6, pp. 2799-2816
- [120] Arrow, K., 1962, The economic implications of learning-by-doing. Review of Economic Studies 29, 155-173.
- [121] G.F. Nemet. (2009) Interim monitoring of cost dynamics for publicly supported energy technologies. Energy Policy, 37 (3) (2009), pp. 825-835

- [122] European Commission, JRC scientific and policy reports, Technology Learning Curves for Energy Policy support, 2012
- [123] Bosello F, Roson R, Tol RSJ (2007b) Economy wide estimates of the implications of climate change: sea-level rise. *Environ Resour Econ* 37:549–571
- [124] European Union, Directive 2003/87/EC of the European Parliament and of the Council of 13 October 2003 establishing a scheme for greenhouse gas emission allowance trading within the Community and amending Council Directive 96/61/EC, *Official Journal of the European Union* (2003)
- [125] European Union, Directive 2009/28/EC of the European Parliament and of the Council of 23 April 2009 on the promotion of the use of energy from renewable sources and amending and subsequently repealing Directives 2001/77/EC and 2003/30/EC, *Official Journal of the European Union* L140 (2009) 136-148.
- [126] Van Praag, Bernard M.S., and Adam S. Booij (2003) “Risk Aversion and the Subjective Discount Rate: A Joint Approach”, TI 2003-018/3 Tinbergen Institute Discussion Paper, also published as CESIFO Working Paper No. 923
- [127] Kouvaritakis N. and Panos V., 2007, Stochastic Evaluation of Hydrogen Economy Prospects using PROMETHEUS, CASCADE MINTS project, part 1-Final Activity Report, pp. 350-383 & 512-519
- [128] Kitous A., Criqui P., Belleprat E. and Chateau B., Transformation Patterns of the Worldwide Energy System - Scenarios for the Century with the POLES Model, *The Energy Journal*, Volume 31 (Special Issue 1), The Economics of Low Stabilization.
- [129] Jewell J., Cherp A., Riahi K., Energy security under de-carbonization scenarios: An assessment framework and evaluation under different technology and policy choices, *Energy Policy*, 65, pp 743-760
- [130] “The 2012 Ageing Report: Economic and budgetary projections for the 27 EU Member States (2010-2060)”, Joint Report prepared by the European Commission (DG ECFIN) and the Economic Policy Committee (AWG)
- [131] OECD (2012), *OECD Environmental Outlook to 2050*, OECD Publishing. Available in: <http://dx.doi.org/10.1787/9789264122246-en>
- [132] J. Hawksorth, *The World in 2050: How big will the major emerging market economies get and how can the OECD compete*. Pricewaterhouse Coopers, 2006.
- [133] Schwanitz, V. J., Piontek, F., Bertram, C., Luderer, G. (2014): Long-term climate policy implications of phasing out fossil fuel subsidies. *Energy Policy*, 67, 882-894
- [134] B. Fattouh, L. El-Katiri, (2013): Energy Subsidies in the Middle East and North Africa, *Energy Strategy Reviews* Volume 2, Issue 1, June 2013, Pages 108-115
- [135] International Road Federation, 2011: *World Road Statistics 2011*
- [136] European Commission, COMMUNICATION FROM THE COMMISSION TO THE EUROPEAN PARLIAMENT AND THE COUNCIL, *European Energy Security Strategy*, 2014

- [137] European Commission-Directorate General for Energy and Transport, 2006, European Energy and Transport, Scenarios on high oil and gas prices
- [138] M. Friman, B. Linnér, Technology obscuring equity: historical responsibility in UNFCCC negotiations *Clim. Pol.*, 8 (4) (2008), pp. 339–354
- [139] De Cian, E., Sferra, F., Tavoni, M. The influence of economic growth, population, and fossil fuel scarcity on energy investments. *Climatic change* DOI 10.1007/s10584-013-0902-5
- [140] Bauer, N., Mouratiadou, I., Luderer, G., Baumstark, L., Brecha, R.J., Edenhofer, O., Kriegler, E. Global fossil energy markets and climate change mitigation – an analysis with REMIND. *Climatic change* DOI 10.1007/s10584-013-0901-6
- [141] HIGH OIL PRICES: QUANTIFICATION OF DIRECT AND INDIRECT IMPACTS FOR THE EU, HOP! Research Project, 2008, Final Report
- [142] IEA (2004): Analysis of the Impact of High Oil Prices on the Global Economy. International Energy Agency, Paris
- [143] US DOE, 2009, Modern Shale Gas Development in the United States: A Primer.
- [144] European Commission, Impact Assessment Accompanying the Communication “A policy framework for climate and energy in the period from 2020 up to 2030”, 2014
- [145] UNEP, The Emissions Gap Report 2012, United Nations Environment Programme (UNEP), (2012).
- [146] Kidd, S. (2013), Nuclear power- Economics and public acceptance, *Energy Strategy Reviews*, 2013, 1 (4), 277-281
- [147] Paroussos, L., Fragkos, P., Capros, P., Fragkiadakis, K., Assessment of carbon leakage through the industry channel: The EU perspective, *Technological Forecasting and Social Change*, 2015
- [148] Böhringer Christoph, Jared C. Carbon and Thomas F. Rutherford, Unilateral climate policy design: Efficiency and equity implications of alternative instruments to reduce carbon leakage. *Energy Economics*, 2012. 34, Supplement 2(0): p. S208-S217.
- [149] European Commission, Commission Decision of 24 December 2009 determining, pursuant to Directive 2003/87/EC of the European Parliament and of the Council, a list of sectors and subsectors which are deemed to be exposed to a significant risk of carbon leakage. *Official Journal of the European Union*. 5.1.2010, L 001.
- [150] Bauer Nico, Valentina Bossetti et al, CO2 emission mitigation and fossil fuel markets: Dynamic and international aspects of climate policies. *Technological Forecasting and Social Change*, 2014, In Press
- [151] Metz B., B. Marcel, den Elzen M, van Vuuren D., Towards an equitable global climate change regime: compatibility with Article 2 of the Climate Change Convention and the link with sustainable development, *Climate Policy* 2 (2002) 211–230

- [152] Παρούσος Λεωνίδας, ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΚΑΙ ΚΛΙΜΑΤΙΚΗ ΑΛΛΑΓΗ: ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΣΤΟ ΠΛΑΙΣΙΟ ΤΗΣ ΓΕΝΙΚΗΣ ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗΣ ΙΣΟΡΡΟΠΙΑΣ, Διδακτορική Διατριβή 2009
- [153] M. Meinshausen, N. Meinshausen, W. Hare, S.C.B. Raper, K. Frieler, R. Knutti, D.J. Frame and M.R. Allen, Greenhouse-gas emission targets for limiting global warming to 2°C. *Nature* 458(7242) (2009) 1158-1162.
- [154] Kaya, Y. (1990). "Impact of carbon dioxide emission control on GNP growth: interpretation of proposed scenarios." Paper presented to the IPCC energy and industry subgroup. Response Strategies Working Group, Paris.
- [155] M. Tavoni, E. Kriegler, T. Aboumahboub, K. Calvin, G. De Maere, J. Jewell, T. Kober, P. Lucas, G. Luderer, D. McCollum, G. Marangoni, K. Riahi, D.P. van Vuuren, The distribution of the major economies effort in the Durban platform scenarios *Clim. Chang. Econ.*, 4 (4), 2013
- [156] Capros, P., DeVita, A., Fragkos, P., et al, The impact of hydrocarbon resources and GDP growth assumptions for the evolution of the EU energy system, *Energy Strategy Reviews*, 2015, 2015
- [157] Marcucci, A., Fragkos, P., Decomposition .., *Energy Economics*, 2015, Under Review
- [158] Jungermann, H. and Thuring, M.: 1988, The Labyrinth of Experts' Minds: Some Reasoning Strategies and Their Pitfalls, *Annals of Operations Research* 16, 117-130.
- [159] Tietje, O.: 2005, Identification of a Small Reliable and Efficient Set of Consistent Scenarios, *European Journal of Operational Research* 162(4), 418-432.
- [160] Pidgeon, N.: 2012, Climate change risk perception and communication: Addressing a critical moment?, *Risk Analysis* 32, 952-955
- [161] Nordhaus, W. D.: 2008, A Question of Balance: Weighing the Options on Global Warming Policies, Chapter 7, Yale University Press, New Haven, NJ, USA
- [162] McKay MD, Conover WJ, Beckman RJ., 1979, A comparison of three methods for selecting values of input variables in the analysis of output from a computer code, *Technometrics*, vol. 21, issue 2, pp. 239-245
- [163] Σπύρος Ι. Χατζησπύρος, Μέθοδοι Monte Carlo Σημειώσεις Στην Υπολογιστική Στατιστική, Μέρος Α
- [164] Duo Qin and Christopher L. Gilbert (2001), "The error term in the history of time series econometrics". *Econometric Theory*, vol. 17, pp 424-450
- [165] Cochrane, D. and Orcutt, G. (1949) "Application of Least Squares Regression to Relationships Containing Autocorrelated Error Terms", *Journal of American Statistical Association*, 44, 32-61.
- [166] Matsumoto, M. and T. Nishimura (1998). "Mersenne Twister: A 623-Dimensionally Equidistributed Uniform Pseudo-Random Number Generator," *ACM Transactions on Modeling and Computer Simulation*, 8(1), 3-30.
- [167] E-VIEWS 6, Command Reference, page 775

- [168] White, H. (1980). "A Heteroskedasticity-Consistent Covariance Matrix Estimator and a Direct Test for Heteroskedasticity", *Econometrica* 48 (4), 817–838
- [169] Durbin, J. and G. Watson (1950) "Testing for serial correlation in least squares regression I", *Biometrika*, 37, pp. 409-428
- [170] Clemen, R.T. & Winkler, R.L., 1999. Combining probability distributions from experts in risk analysis. *Risk Analysis*, vol. 19, issue 2, pp.187–203.
- [171] Stone, M. (1961), "The Linear Opinion Pool", *Annals of Mathematical Statistics*, 32, pp 1339-1342.
- [172] Rai V (2013) Expert elicitation methods for studying technological change under uncertainty. *Environ Res Lett* 8(4):041003. doi:10.1088/1748-9326/8/4/04100
- [173] W. Nordhaus, Alternative measures of output in global economic-environmental models: Purchasing power parity or market exchange rates? (2007), *Energy Economics*, volume 29, issue 3, pp 349–372
- [174] UNFCCC, Decision 1/CP.16 the Cancun Agreement, United Nations Framework Convention on Climate Change (2010)
- [175] European Union, Decision no 406/2009/EC of the European parliament and the council of 23 April 2009 on the efforts of member states to reduce their greenhouse gas emissions to meet the community's greenhouse gas emission reduction commitment up to 2020, *Off. J. Eur. Union*, L140 (2009), pp. 136–148
- [176] S. Wang, Z. Zhang, Effects of climate change on water resources in China, *Clim. Res.*, 47 (1–2) (2011), pp. 77–82
- [177] N. Zhou, D.G. Fridley, M. McNeil, N. Zheng, J. Ke, M. Levine, Peak CO₂? China's Emissions Trajectories to 2050, China Energy Group, Lawrence Berkeley National Laboratory (2011) (LBNL-4871E)
- [178] The World Bank, Turn Down the Heat: Why a 4o C Warmer World Must be Avoided, The World Bank, Washington DC, United States (2012)
- [179] Schaeffer et al., 2014, Mid- and long-term climate projections for fragmented and delayed-action scenarios, *Technological Forecasting and Social Change*, DOI: 10.1016/j.techfore.2013.09.013
- [180] Stewart C. Myers. *Finance Theory and Financial Strategy*, *Strategic Management*, 14 (1): 126-137, 1984
- [181] Vithayasrichareon P., MacGill I.F., A Monte Carlo based decision-support tool for assessing generation portfolios in future carbon constrained electricity industries, *Energy Policy* 41 (2012), pp. 374-392
- [182] Stoll, H.G., 1989, *Least-Cost Electric Utility Planning*. John Wiley & Sons
- [183] IEA, 2007, *Climate Policy Uncertainty and Investment Risk*, International Energy Agency, Paris

- [184] Green, R., 2008. Carbon tax or carbon permits: the impact on generators' risks. *The Energy Journal* 29, 67–89
- [185] Kirschen, D.S., Strbac, G., Cumperayot, P., de Paiva Mendes, D., 2000. Factoring the elasticity of demand in electricity prices. *IEEE Transactions on Power Systems* 15, 612–617
- [186] Blyth, W., Yang, M., 2006. Impact of Climate Change Policy Uncertainty in Power Investment. International Energy Agency, Paris.
- [187] Rothwell, G., 2006. A real options approach to evaluating new nuclear power plants. *The Energy Journal* 27, 37–53.
- [188] Duenas, P., Reneses, J., Barquin, J., 2011. Dealing with multi-factor uncertainty in electricity markets by combining Monte Carlo simulation with spatial interpolation techniques. *Generation, Transmission & Distribution, IET* 5, 323–331.
- [189] Roques, F.A., Nuttall, W.J., Newbery, D., 2006. Using Probabilistic Analysis to Value Power Generation Investments Under Uncertainty. EPRG Working Paper.
- [190] Awerbuch, S., 2006. Portfolio-based electricity generation planning: policy implications for renewables and energy security. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 11, 693-710.
- [191] Little, J.D.C., Murty, K. G., Sweeney, D. W., Karel, C., 1963. "An algorithm for the traveling salesman problem". *Operations Research* 11 (6): 972–989. doi:10.1287/opre.11.6.972.
- [192] Ejaz, Q., Supplementary paper SP2.2: Background material on natural gas resource assessments, with major resource country reviews . 2010, MIT: Cambridge, MT.
- [193] Masters, J.A., 1979, Deep Basin Gas Trap, Western Canada: AAPG Bulletin, v. 63, No. 2, p. 152-181.
- [194] Advanced Resources International, World shale gas resources: an initial assessment of 14 regions outside the United States. 2011, Advanced Resources International Inc: Washington, DC.
- [195] Clark, J., Edmonds J.A., Modelling energy technologies in a competitive market, *Energy Economics*, Volume 15, Issue 2, April 1993, Pages 123–129
- [196] Steiner D. B., An Analysis of Industrial Demand for Natural Gas, *Energy*, Vol. 8, No 10, pp. 749-756, 1983
- [197] Fosgerau, M., Bierlaire, M., 2009, Discrete choice models with multiplicative error terms. *Transportation Research Part B: Methodological* 43, 494-505
- [198] Clarke L., Introduction to the GCAM Community Modeling Meeting, Joint Global Change Research Institute College Park, Maryland, USA, October 2013, Available at: <http://www.globalchange.umd.edu/>

- [199] 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.
- [200] Fane, S., Robinson, J., White, S. 2007. The use of levelised cost in comparing supply and demand side options. *Water supply* 3, 185-192.
- [201] Ortujar J., Willumsen L.G.. *Modelling transport*. 2nd edition. 1994.
- [202] McFadden, D. *Modelling the choice of residential location*. Transportation Research Record 672. TRB, National Research Council, Washington DC, 72-77
- [203] Bernoulli, Daniel; Originally published in 1738; translated by Dr. Louise Sommer. (January 1954). "Exposition of a New Theory on the Measurement of Risk". *Econometrica* 22 (1): 22–36. doi:10.2307/1909829. JSTOR 1909829.
- [204] S. Almon, The Distributed Lag Between Capital Appropriations and Expenditures, *Econometrics*, Vol. 33, No. 1 (Jan., 1965), pp. 178-196
- [205] C.A. Sims, *Macroeconomics and Reality*, *Econometrica*, Vol. 48, pp. 1-48
- [206] G.E.P Box, G.M. Jenkins (1976), *Time series analysis: Forecasting and Control*, revised edition, San Francisco Hodlen-Day
- [207] C.W.J. Granger, (1969), Investigating causal relations by econometric models and cross spectral methods, *Econometrica* 35, pp. 424-438
- [208] D.A. Dickey, W.A. Fuller (1979), Distribution of the estimators for autoregressive time series with a unit root, *Journal of the American Statistical Association*, 74, 427-32
- [209] C.W.J. Granger, (1969), Some properties of time series data and their use in econometric model specification, *Journal of Econometrics*, 16, pp. 121-130
- [210] Engle, R.F., C.W.J. Granger, (1987), Co-integration and error correction: Representation, Estimation and Testing, *Econometrica*, 55, p.p.251-276
- [211] Caflich R. (1998), Monte Carlo and quasi-Monte Carlo methods, *Acta Numerica*, 7, pp 1-49. Doi: 10.1017/S0962492900002804.
- [212] Kanudia, A., R. Loulou. 1998. Robust Responses to Climate Change via Stochastic MARKAL: the case of Quebec. *European Journal of Operations Research* 106, 15–30
- [213] Birge, J. R., and Rosa, C. H. (1996), "Incorporating Investment Uncertainty into Greenhouse Policy Models," *The Energy Journal*, 17/1, 79-90.
- [214] Wallace SW, Fleten S (2003) *Stochastic programming models in energy*, *Stochastic Programming*, vol 10, Elsevier, pp 637–677
- [215] Morgan, M.G. & Henrion, M. *Uncertainty: A guide to dealing with uncertainty in quantitative risk and policy analysis*. Cambridge, 1992
- [216] W. Usher, N. Strachan, Critical mid-term uncertainties in long-term decarbonisation pathways, *Energy Policy* 41 (2012) 433–444

- [217] Hu, M.-C., Hobbs, B.F., 2010. Analysis of multi-pollutant policies for the U.S. power sector under technology and policy uncertainty using MARKAL, Energy.
- [218] Raiffa, H., 1997. Decision Analysis: Introductory Lectures on Choices under Uncertainty. McGraw-Hill
- [219] Savage, L. J. (1954), The Foundations of Statistics, New York: John Wiley and Sons. (Second edition in 1972, Dover)
- [220] Knight, F. H. (1921), Risk, Uncertainty, and Profit. Boston, New York: Houghton Mifflin.
- [221] Gilboa, I., A. Postlewaite, and D. Schmeidler (2008), "Probabilities in Economic Modeling", Journal of Economic Perspectives, 22: 173-188.
- [222] Ramsey, F. P. (1926a), "Truth and Probability", in R. Braithwaite (ed.), (1931), The Foundation of Mathematics and Other Logical Essays. London: Routledge and Kegan.