



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΠΟΦΑΣΕΩΝ

**Βιβλιογραφική Ανασκόπηση των
Μοντέλων Κλίματος-Οικονομίας για την
υποστήριξη της διαμόρφωσης κλιματικής
πολιτικής**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Αικατερίνη Τσαγκαράκη

Επιβλέπων : Ιωάννης Ψαρράς
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούλιος 2018



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΠΟΦΑΣΕΩΝ

**Βιβλιογραφική Ανασκόπηση των
Μοντέλων Κλίματος-Οικονομίας για την
υποστριξη της διαμόρφωσης κλιματικής
πολιτικής**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Αικατερίνη Τσαγκαράκη

Επιβλέπων : Ιωάννης Ψαρράς
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την ...^η Ιουλίου 2018.

.....
Ιωάννης Ψαρράς
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούλιος 2018

.....

Αικατερίνη Τσαγκαράκη

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

Copyright © Αικατερίνη Τσαγκαράκη, 2018

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

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

Πρόλογος

Η εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας έγινε κατά το ακαδημαϊκό έτος 2017 – 2018 στον τομέα Ηλεκτρικών Βιομηχανικών Διατάξεων και Συστημάτων Αποφάσεων της Σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, στα πλαίσια των ερευνητικών δραστηριοτήτων του Εργαστηρίου Συστημάτων Αποφάσεων και Διοίκησης.

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

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω τον Αλέξανδρο Νίκα, υποψήφιο διδάκτορα του εργαστηρίου Συστημάτων Αποφάσεων, για την άψογη συνεργασία που είχαμε και τη συνεχή του καθοδήγηση καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

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

Αθήνα, Ιούλιος 2018
Αικατερίνη Τσαγκαράκη

Περίληψη

Η κλιματική αλλαγή στην σύγχρονη εποχή έχει αναδειχθεί ως ένα δυναμικό και απρόβλεπτο φαινόμενο που επηρεάζει αρνητικά την ποιότητα ζωής, το περιβάλλον και την οικονομική ευημερία των ανθρώπων. Στις τελευταίες δεκαετίες έχουν αναπτυχθεί πολλές προσεγγίσεις μοντελοποίησης κλίματος-οικονομίας οι οποίες προσπαθούν να αναλύσουν τους παράγοντες της κλιματικής αλλαγής και να βοηθήσουν στη διαμόρφωση της κλιματικής πολιτικής. Αυτά τα πλαίσια μοντελοποίησης, γνωστά και ως μοντέλα ολοκληρωμένης αξιολόγησης ή IAM (Integrated Assessment Models), έχουν αναπτυχθεί και εξελιχθεί σε ένα ποικιλόμορφο σύνολο προσεγγίσεων της ανάλυσης του ζητήματος κλίματος-οικονομίας. Η βιβλιογραφία που σχετίζεται με αυτό το ζήτημα περιέχει πολύ μεγάλο αριθμό μοντέλων και εφαρμογών, βάση των οποίων έχουν δημοσιευτεί πολλές έρευνες, που συγκρίνουν από διαφορετικές σκοπιές τα πλαίσια μοντελοποίησης, τις παραδοχές και τα αποτελέσματα των μοντέλων. Όμως η διαφορετικότητα και η μεγάλη πληθώρα των διαθέσιμων προσεγγίσεων δυσχεραίνει την κατανόηση ολόκληρου του συνόλου των μοντέλων και την πραγματοποίηση μίας ολοκληρωμένης σύγκρισης μεταξύ τους. Ο στόχος της παρούσας εργασίας είναι να διατυπώσει ένα απλό σχέδιο επισκόπησης αυτού του τεράστιου πεδίου μοντελοποίησης, παρουσιάζοντας συγκεντρωτικούς πίνακες με τα χαρακτηριστικά περισσότερων των 60 ξεχωριστών IAM, ομαδοποιώντας τα σε ξεχωριστές κατηγορίες που αναδεικνύουν τους τρόπους μοντελοποίησης του κλίματος και της οικονομίας και αναλύοντας τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα που παρουσιάζουν. Ο λόγος για τον οποίο αυτή η επισκόπηση διαφέρει από άλλες λεπτομερέστερες ή στενά εστιασμένες επισκοπήσεις είναι ότι η ανάλυση της είναι απλή και συμπυκνωμένη και αποσκοπεί στην παροχή βασικής κατανόησης των γενικών δομών των μοντέλων.

Λέξεις-κλειδιά: κλιματική αλλαγή, κλιματική πολιτική, μοντέλα κλίματος-οικονομίας, αβεβαιότητα, ολοκληρωμένα μοντέλα αξιολόγησης

Abstract

Climate change has emerged as a dynamic, unpredictable and ever-deteriorating phenomenon, with direct implications for both the environment, on the one hand, and economic growth, prosperity and quality of life, on the other. In recent years, a multitude of approaches for climate-economy modelling have been developed, which attempt to analyse the factors contributing to climatic change and support the design of climate policy. Such modelling frameworks, also known as integrated assessment models (IAMs), have been developed in a diverse set of approaches assessing climate-economy interactions. The relevant literature encompasses a very large number of models and applications, based on which numerous reviews have tried to compare the different modelling structures, assumptions and outcomes. Nevertheless, the large number and diversity of available approaches significantly hinders the understanding of the modelling tools and their differences. The aim of this diploma thesis is to formulate a concrete overview of the vast climate-economy modelling domain, by categorizing more than 60 IAMs and illustrating their differences, advantages and disadvantages in detail. Furthermore, this study seeks to serve as a simple and consistent analysis facilitating prospective readers in understanding the general structures of the reviewed models.

Keywords: climate action, climate policy, climate-economy models, uncertainty, integrated assessment models

Πίνακας Περιεχομένων

1	Εισαγωγή	7
1.1	Αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας	7
1.2	Δομή της Εργασίας	12
2	Θεωρητικό υπόβαθρο	15
2.1	Υπολογισμός Επιπτώσεων της Κλιματικής Αλλαγής	15
2.2	Τεχνολογική Πρόοδος.....	16
2.2.1	Εξωγενής Τεχνολογική Πρόοδος	16
2.2.2	Ενδογενής Τεχνολογική Πρόοδος	18
2.3	Δομές Bottom-up, Top-down και Hybrid	19
2.4	Αβεβαιότητα στα μοντέλα κλίματος-οικονομίας.....	21
2.4.1	Κλιματικές Αβεβαιότητες.....	21
2.4.2	Κοινωνικοοικονομικές Αβεβαιότητες	23
2.4.3	Αβεβαιότητες για την μελλοντική Εξέλιξη της Τεχνολογίας.....	23
2.4.4	Αβεβαιότητες των μέτρων μετριασμού	24
2.4.5	Εκτίμηση της Αβεβαιότητας	25
2.5	Ένα νέο ερευνητικό πλαίσιο για την έρευνα στην κλιματική αλλαγή.....	26
2.5.1	Τα σενάρια Representative Concentration Pathways (RCP).....	28
2.5.2	Τα σενάρια Shared Socioeconomic Pathways (SSP)	31
2.5.3	Τα σενάρια Shared Climate Policy Assumptions (SPA).....	35
3	Συνοπτική παρουσίαση των μοντέλων	39
3.1	Ταξινόμηση των μοντέλων κλίματος-οικονομίας.....	39
4	Μοντέλα Βέλτιστης Ανάπτυξης	53
4.1	Εισαγωγή.....	53
4.2	Συνοπτική παρουσίαση των μοντέλων βέλτιστης ανάπτυξης.....	54
4.2.1	AD-FAIR.....	54
4.2.2	AIM/Dynamic Global.....	54
4.2.3	AIM/Enduse Global.....	55

4.2.4	CETA-M.....	56
4.2.5	DEMETER-1 & DEMETER-ICCS	57
4.2.6	DICE.....	57
4.2.7	DICE2007.....	58
4.2.8	ENTICE.....	59
4.2.9	FEEM-RICE.....	59
4.2.10	FAIR 2.1	60
4.2.11	GRAPE.....	61
4.2.12	MERGE.....	62
4.2.13	MIND	63
4.2.14	RICE.....	63
4.2.15	RICE – 99.....	64
4.2.16	WITCH.....	64
4.3	Ανάλυση.....	65
4.4	Το παγκόσμιο μοντέλο DICE.....	72
5	Μοντέλα Γενικής Ισορροπίας (CGE).....	75
5.1	Εισαγωγή.....	75
5.2	Συνοπτική παρουσίαση των μοντέλων γενικής ισορροπίας	77
5.2.1	AIM	77
5.2.2	AIM/Material.....	78
5.2.3	Dynamic GTAP.....	78
5.2.4	G-CUBED	79
5.2.5	GEM-E3	79
5.2.6	GREEN.....	80
5.2.7	GTAP-E.....	80
5.2.8	GTEM.....	81
5.2.9	ICES	81
5.2.10	IGEM.....	82
5.2.11	IMACLIM-R	82
5.2.12	LINKAGE	83
5.2.13	MIRAGE	83

5.2.14 MIT EPPA.....	83
5.2.15 MS-MRT	84
5.2.16 SGM 2004	84
5.2.17 WIAGEM	85
5.3 Ανάλυση.....	85
6 Μοντέλα Μερικής Ισορροπίας.....	91
6.1 Εισαγωγή.....	91
6.2 Συνοπτική παρουσίαση των μοντέλων μερικής ισορροπίας.....	96
6.2.1 GIM	96
6.2.2 MiniCAM 1.0	96
6.2.3 TIAM-ECN	97
6.3 Ανάλυση.....	97
7 Μακρό-οικονομετρικά Μοντέλα	99
7.1 Εισαγωγή.....	99
7.2 Συνοπτική παρουσίαση των μακρο-οικονομετρικών μοντέλων	99
7.2.1 E3ME.....	99
7.2.2 E3MG	100
7.3 Ανάλυση.....	100
8 Μοντέλα Ενεργειακών Συστημάτων.....	105
8.1 Εισαγωγή.....	105
8.2 Συνοπτική παρουσίαση των μοντέλων ενεργειακών συστημάτων	107
8.2.1 EFOM.....	107
8.2.2 ERIS	107
8.2.3 GENIE.....	108
8.2.4 GET-LFL.....	108
8.2.5 MARKAL / TIMES.....	108
8.2.6 MEDEE 2	109
8.2.7 MedPro	110
8.2.8 MESSAGE	110

8.2.9 NEMS.....	111
8.2.10 POLES.....	111
8.2.11 PRIMES.....	112
8.2.12 WEM.....	112
8.3 Ανάλυση.....	113
9 Άλλα Μοντέλα.....	121
9.1 Εισαγωγή.....	121
9.2 Συνοπτική παρουσίαση των μοντέλων της κατηγορίας.....	122
9.2.1 PAGE2002.....	122
9.2.2 PAGE2009.....	122
9.2.3 FUND.....	123
9.2.4 CIAS.....	124
9.2.5 IGSM2.....	125
9.2.6 IMAGE2.4.....	125
9.2.7 ICAM-3.....	126
9.3 Ανάλυση.....	127
9.4 Το μοντέλο PAGE2002.....	131
10 Συμπεράσματα και Παρατηρήσεις.....	135
11 Βιβλιογραφία.....	139

Ευρετήριο Πινάκων

Πίνακας 1. Παρουσίαση της κατηγοριοποίησης των μοντέλων που εξετάζονται στην παρούσα εργασία.....	42
Πίνακας 2 Επισκόπηση 61 μοντέλων IAM με σύντομη περιγραφή και ενδεικτικές εφαρμογές	45
Πίνακας 3 Ανασκόπηση των μοντέλων Βέλτιστης Ανάπτυξης	66
Πίνακας 4 Τεχνολογική Πρόοδος και Ανάλυση της Αβεβαιότητας στα μοντέλα Βέλτιστης Ανάπτυξης.....	69
Πίνακας 5 Ανασκόπηση των Υπολογιστικών Μοντέλων Γενικής Ισορροπίας.....	86
Πίνακας 6 Τεχνολογική Πρόοδος και Ανάλυση της Αβεβαιότητας στα μοντέλα Γενικής Ισορροπίας.....	87
Πίνακας 7 Ανασκόπηση των μοντέλων Μερικής Ισορροπίας.....	98
Πίνακας 8 Ανασκόπηση των Μακροοικονομικών Μοντέλων	101
Πίνακας 9 Ανασκόπηση των Μοντέλων Ενεργειακών Συστημάτων	113
Πίνακας 10 Τεχνολογική Πρόοδος και Ανάλυση της Αβεβαιότητας στα μοντέλα Ενεργειακών Συστημάτων.....	117
Πίνακας 11 Ανασκόπηση των μοντέλων που δεν εντάσσονται σε καμία από τις προαναφερόμενες κατηγορίες	127
Πίνακας 12 Τεχνολογική Πρόοδος και Ανάλυση της Αβεβαιότητας στα Μοντέλα που δεν εντάσσονται σε καμία από τις προαναφερόμενες κατηγορίες.....	130

Ευρετήριο Εικόνων

Εικόνα 1. Συμμετοχή επιστημονικών πεδίων στη μοντελοποίηση κλιματικών πολιτικών (Wei et al., 2013).....	8
Εικόνα 2. Τυπική αναπαράσταση ενός μοντέλου ολοκληρωμένης αξιολόγησης (Nikas et al., 2018).....	11
Εικόνα 3 Σχηματική απεικόνιση των σταδίων υπολογισμού για την εκτίμηση των κλιματικών επιπτώσεων και το μέγεθος της αβεβαιότητας που περιλαμβάνουν (Mark New et al.,1999)..	22
Εικόνα 4 Η διαδικασία ανάπτυξης των RCP (Van Vuuren et al., 2011).....	31
Εικόνα 5 Διάγραμμα του «Χώρου Προκλήσεων» των SSP (Kriegler et al., 2012)	35

1 Εισαγωγή

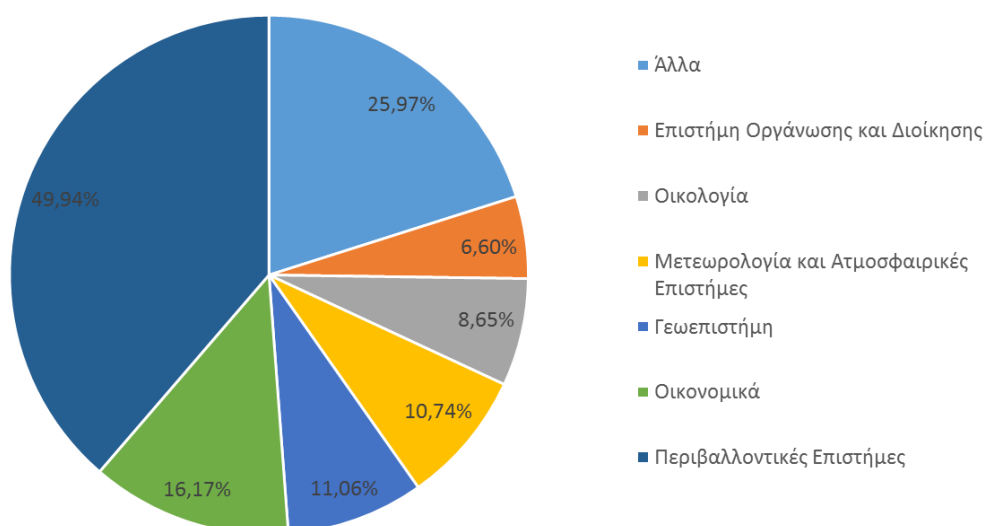
1.1 Αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας

Η κλιματική αλλαγή εμφανίστηκε παράλληλα με την βιομηχανική επανάσταση και εξελίχθηκε έως τα τέλη του προηγούμενου αιώνα σε ένα πολύ επικίνδυνο φαινόμενο με αρνητικές επιπτώσεις στο περιβάλλον, στην οικονομία, στην ευημερία και στην ποιότητα ζωής στον πλανήτη. Πρόκειται για ένα δυναμικό και μεταβαλλόμενο φαινόμενο το οποίο συνεχώς επιδεινώνεται και δυσκολεύει τις μελλοντικές προβλέψεις για τα επίπεδα της αλλαγής και για τις συνέπειες που μπορεί να ακολουθήσουν. Η κύρια αιτία της κλιματικής αλλαγής είναι οι ανθρωπογενείς εκπομπές ρυπογόνων αερίων, όπως τα αέρια του θερμοκηπίου και το αεροζόλ, τα οποία συσσωρεύονται έντονα στην ατμόσφαιρα από την εποχή της βιομηχανικής επανάστασης. Η διαδικασία της αποσύνθεσης αυτών των αερίων από την ατμόσφαιρα διαρκεί περισσότερο από πενήντα χρόνια, κάτι που καθιστά αδύνατη την φυσική αντιμετώπιση του προβλήματος με τους δεδομένους ρυθμούς ρύπανσης. Συνεπώς είναι πολύ σημαντικό να σχεδιαστούν αποτελεσματικές πολιτικές για την αντιμετώπιση της κλιματικής αλλαγής, οι οποίες να εφαρμοστούν σε παγκόσμιο επίπεδο.

Στις τελευταίες δεκαετίες έχουν αναπτυχθεί πολλές προσεγγίσεις μοντελοποίησης κλίματος-οικονομίας, οι οποίες προσπαθούν να αναλύσουν τους παράγοντες της κλιματικής αλλαγής και να βοηθήσουν στη διαμόρφωση της κλιματικής πολιτικής. Η εμφάνιση των πρώτων σοβαρών επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής στην δεκαετία του '70 προκάλεσε επείγουσα ανάγκη για ανάπτυξη θεωρητικών εργαλείων που να μπορούν να παρέχουν πιο ολοκληρωμένη κατανόηση του φαινομένου και να

υποστηρίζουν σε βάθος τις σχετικές πολιτικές αποφάσεις. Τα παραδοσιακά κλιματικά μοντέλα και κυρίως τα μοντέλα των οικοσυστημάτων, επεκτάθηκαν για να εξεταστούν οι διαδικασίες με τις οποίες παράγονται οι εκπομπές των αερίων του θερμοκηπίου και οι τρόποι με τους οποίους θα μπορούσαν να περιοριστούν. Έτσι τα γενικά μοντέλα κυκλοφορίας που αφορούσαν τα ατμοσφαιρικά τμήματα του κλιματικού συστήματος συνδέθηκαν με τα μοντέλα των ωκεανών, ενώ η οικονομική επιστήμη συνέβαλλε με την τροποποίηση της παγκόσμιας ανάλυσης της ενεργειακής οικονομίας για την προβολή των εκπομπών των αερίων του θερμοκηπίου. Στο πλαίσιο αυτό εξετάστηκαν οι τρόποι μείωσης των εκπομπών των αερίων του θερμοκηπίου και ενσωματώθηκαν οι συνολικές φυσικές διαστάσεις του κλιματικού συστήματος. Οι σύγχρονες αναλύσεις κλίματος-οικονομίας ενσωματώνουν τις επιστημονικές εργασίες και την βιβλιογραφία πολλών επιστημονικών κλάδων και διαφόρων πεδίων έρευνας, με σκοπό να παρέχουν πιο ολοκληρωμένη κατανόηση των διαφορετικών πτυχών ενός πολύπλοκου αλληλένδετου φαινομένου (Weyant, 2009).

Η Εικόνα 1 παρουσιάζει το ποσοστά συμμετοχής των επιστημονικών κλάδων που εμπλέκονται στη μοντελοποίηση της πολιτικής για το κλίμα. Τα ποσοστά αναφέρονται στις αναλογίες που βρέθηκαν σε ένα μεγάλο σύνολο σχετικών δημοσιεύσεων. Ο λόγος που το άθροισμα των ποσοστών μπορεί να υπερβαίνει το 100% είναι ότι κάποια από τα έγγραφα ανήκουν σε δύο ή περισσότερους επιστημονικούς κλάδους.



Εικόνα 1. Συμμετοχή επιστημονικών πεδίων στη μοντελοποίηση κλιματικών πολιτικών (Wei et al., 2013)

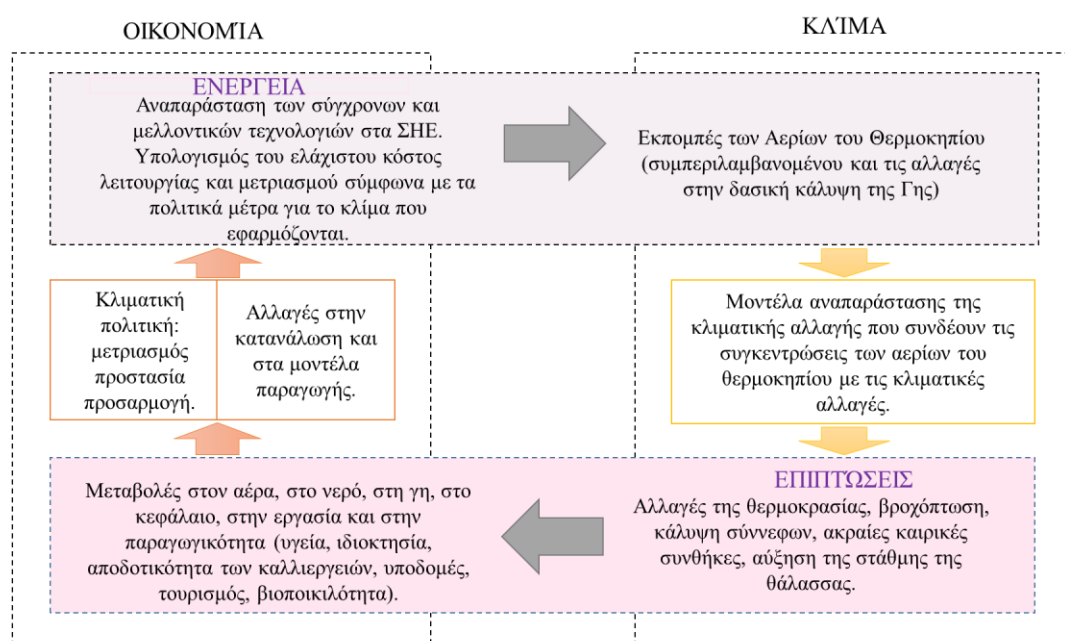
Η ευρεία αλληλεπίδραση της ανθρώπινης δραστηριότητας και της κλιματικής αλλαγής μπορεί να περιγραφεί με την ακόλουθη αλληλένδετη αλυσίδα αιτιών και αποτελεσμάτων. Ο ανθρώπινος παράγοντας προκαλεί την αύξηση των εκπομπών των αερίων του θερμοκηπίου στην ατμόσφαιρα και με αυτό το τρόπο αυξάνονται οι συγκεντρώσεις των ρυπογόνων αερίων οι οποίες είναι υπεύθυνες για την κλιματική αλλαγή. Βάσει των ευρημάτων της επιστήμης του κλίματος, είναι γνωστό ότι τα διαφορετικά επίπεδα συγκέντρωσης των αερίων του θερμοκηπίου επηρεάζουν σε διαφορετικό βαθμό το επίπεδο της θερμοκρασίας, την ένταση των βροχοπτώσεων, τον σχηματισμό σύννεφων, την ένταση των ανέμων και το επίπεδο της θαλάσσιας στάθμης. Αυτές οι κλιματικές μεταβολές με τη σειρά τους προκαλούν διάφορες φυσικές, περιβαλλοντικές και κοινωνικές επιπτώσεις (π.χ. η αλλαγή της απόδοσης των καλλιεργειών, η μείωση της παροχής νερού, η απώλεια και η μετανάστευση των ειδών). Αυτές οι επιπτώσεις μπορούν στη συνέχεια να μετατραπούν σε νομισματικές αξίες ή να υποβληθούν σε επεξεργασία μέσω ενός οικονομικού μοντέλου προκειμένου να δοθεί η ενιαία αξιολόγηση του οικονομικού κόστους της κλιματικής αλλαγής. Καθώς το φαινόμενο της κλιματικής αλλαγής εξελίσσεται με την πάροδο του χρόνου, τα μοντέλα προσπαθούν να προβάλλουν ένα μέρος ή ολόκληρη τη δυναμική διαδικασία της αύξησης των εκπομπών, της μεταβολής των θερμοκρασιών και της εμφάνισης φυσικών επιπτώσεων και οικονομικών ζημιών. Η οικονομικές δραστηριότητες δέχονται πλήγματα από την κλιματική αλλαγή και την προκαλούν συγχρόνως, αφού η αύξηση της παραγωγής και της κατανάλωσης αυξάνει τις εκπομπές των αερίων του θερμοκηπίου. Το σημαντικότερο μέρος της οικονομίας που επηρεάζει άμεσα τον ρυθμό των εκπομπών είναι τα συστήματα παραγωγής και κατανάλωσης ενέργειας. Κάθε μέρος αυτής της αλυσίδας αλληλεπίδρασης κλίματος-οικονομίας χαρακτηρίζεται από έναν βαθμό αβεβαιότητας και επιστημονικής διαφωνίας.

Η Εικόνα 2 που απεικονίζεται παρακάτω παρέχει μια αναπαράσταση της μοντελοποίησης κλίματος-οικονομίας. Η ενότητα για το κλίμα περιγράφει τη σχέση μεταξύ της εκπομπής αερίων του θερμοκηπίου και της αύξησης των συγκεντρώσεων στην ατμόσφαιρα με την μεταβολή της θερμοκρασίας και με άλλες κλιματικές αλλαγές (βροχοπτώσεις, κάλυψη σύννεφων, ακραία καιρικά φαινόμενα, ασυνέχειες του κλίματος κ.λπ.). Η ενότητα επιπτώσεων ή η συνάρτηση υπολογισμού των ζημιών, εκφράζει οικονομικές ή μη οικονομικές επιπτώσεις ως συνάρτηση των κλιματικών

μεταβλητών. Για παράδειγμα ένα μοντέλο μπορεί να περιέχει μία συνάρτηση υπολογισμού των ζημιών στη γεωργία, η οποία να θεωρεί ότι οι αποδόσεις των καλλιεργειών επηρεάζονται από τις μεταβολές της θερμοκρασίας, των βροχοπτώσεων και της συγκέντρωσης νέφους στην ατμόσφαιρα. Μια οικονομική ενότητα μπορεί να περιγράφει την δυναμική ή την ανάπτυξη της οικονομίας, τον τρόπο με τον οποίο η ποσότητα των εκπομπών επηρεάζεται από την ανάπτυξη και την εφαρμογή κλιματικών πολιτικών μέτρων και τον τρόπο με τον οποίο οι κλιματικές αλλαγές του περιβάλλοντος μπορεί να επηρεάσουν την οικονομία, τμηματικά η εξολοκλήρου. Η οικονομική ενότητα συχνά συμπληρώνεται με μία λεπτομερή ενότητα ενέργειας, η οποία αξιολογεί τη χρήση διαφορετικών πηγών ενέργειας και το κόστος της μείωσης των εκπομπών.

Η μεγάλη πληθώρα των προσεγγίσεων μοντελοποίησης κλίματος-οικονομίας αντανακλά το εύρος των επιστημονικών κλάδων που επηρεάζουν την ανάπτυξή τους, των εναλλακτικών μεθόδων και παραδοχών που χρησιμοποιούνται για την σύνταξη τους, καθώς και των διαφόρων ζητημάτων που τίθενται προς ανάλυση. Υπάρχει ένας μεγάλος και συνεχώς αυξανόμενος αριθμός μοντέλων που διακρίνονται μεταξύ τους ανάλογα με το ύψος της πολυπλοκότητας και τα μοναδικά χαρακτηριστικά τους. Στη βιβλιογραφία ήδη υπάρχουν πολλές καλές κριτικές για τις διάφορες κατηγορίες των ολοκληρωμένων μοντέλων αξιολόγησης κλίματος-οικονομίας: Ο Fussel (2009) παρέχει γενικές αναφορές της σχετικής βιβλιογραφίας, μια ειδική έκδοση του Ενεργειακού περιοδικού (Energy Journal) παρέχει λεπτομερείς τεχνικές συγκρίσεις των IAM από τον (Weyant, 1999), ο Tol (1998) και ο Yohe (1999) εξετάζουν την μοντελοποίηση και την εκτίμηση των επιπτώσεων στα IAM, οι Hitz και Smith (2004) εξετάζουν τον τρόπο με τον οποίο τα διαφορετικά IAM υπολογίζουν τις παγκόσμιες επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής ως συνάρτηση της παγκόσμιας μέσης θερμοκρασίας και τέλος οι Lecocq και Shalizi (2007) συντάσσουν μία ανασκόπηση της βιβλιογραφίας σχετικά με τη σχέση της οικονομικής ανάπτυξης, της κλιματικής πολιτικής και της αλλαγής του κλίματος. Στην βιβλιογραφία υπάρχουν και άλλες εξίσου διεξοδικές αξιολογήσεις των IAM, όπως αυτές που παρέχονται από τους e.g. Dowlatabadi (1995), Parson και Fisher-Vanden (1997), Kelly και Kolstad (1999), Rana και Morita (2000), Schwanitz (2013) και Wei et al., 2015. Ωστόσο λόγω των μεγάλων διαφορών ανάμεσα στα μοντέλα και στις κατηγορίες των μοντέλων οι εργασίες αξιολόγησης τείνουν να έχουν διαφορετικές απόψεις και να επικεντρώνονται σε πολύ

συγκεκριμένες πτυχές των διαδικασιών μοντελοποίησης, χρησιμοποιώντας παράλληλα διαφορετικές κατηγοριοποιήσεις για τα μοντέλα.



Εικόνα 2. Τυπική αναπαράσταση ενός μοντέλου ολοκληρωμένης αξιολόγησης (Nikas et al., 2018).

Ο σκοπός αυτής της εργασίας είναι να εξετάσει τα βασικά χαρακτηριστικά των διαθέσιμων ολοκληρωμένων μοντέλων αξιολόγησης, τα οποία σχετίζονται με τις ιδιαιτερότητες της δομής τους και τον τρόπο με τον οποίο αντιμετωπίζουν την αβεβαιότητα και την τεχνολογία. Έτσι η παρούσα εργασία στοχεύει στην ανάπτυξη μιας συγκεκριμένης κατηγοριοποίησης και τον σχηματισμό μιας απλής και χρήσιμης ανασκόπησης της μοντελοποίησης του συστήματος κλίματος-οικονομίας, βασισμένη στην διαφοροποίηση των προαναφερθέντων χαρακτηριστικών των μοντέλων. Αυτή η ανάλυση ουσιαστικά διαφέρει από άλλες συχνά πιο λεπτομερείς ή στενά εστιασμένες ανασκοπήσεις, δεδομένου ότι είναι μικρότερη και απλούστερη και αποσκοπεί στην ανάδειξη των βασικών χαρακτηριστικών των δομών των μοντέλων. Στην βιβλιογραφία υπάρχει πληθώρα ανασκοπήσεων με διαφορετικές σκοπιμότητες, όπως για παράδειγμα οι ανασκοπήσεις των Ortiz και Markandya (2009), οι οποίες παρέχουν σύντομες περιγραφές για πολλά μοντέλα και τις εξισώσεις τους, του Stanton et al., (2009) που επικεντρώνεται σε βασικές παραδοχές που επηρεάζουν τα αποτελέσματα των μοντέλων ή του Fussel (2010) που επικεντρώνεται στον τρόπο ενσωμάτωσης της προσαρμογής στην κλιματική αλλαγή στα μοντέλα. Από αυτή την άποψη μια η απλή

και σύντομη επισκόπηση έχει σκοπό να συμπληρώσει τις υπόλοιπες λιγότερο γενικές δημοσιεύσεις και να αποτελέσει έναν αρχικό οδηγό για το τεράστιο πεδίο μοντελοποίησης στο οποίο αναφέρεται.

Όσο αφορά τις προϋποθέσεις που πρέπει να πληρεί ένα μοντέλο για να θεωρηθεί ότι ανήκει στην κατηγορία των IAM, υπάρχει πληθώρα κριτηρίων που μπορούν να βρεθούν στη βιβλιογραφία, τα οποία προσδιορίζουν τα απαραίτητα χαρακτηριστικά. Σύμφωνα με την επικρατέστερη άποψη μόνο τα μοντέλα που εξετάζουν στενά τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ οικονομίας και περιβαλλοντικών επιπτώσεων, μπορούν να ταξινομηθούν ως IAM. Επομένως τα περισσότερα μοντέλα μερικής ισορροπίας δεν μπορούν να θεωρηθούν αυτόνομα ως IAM, αλλά σίγουρα μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως μέρος ενός πλαισίου μοντελοποίησης IAM. Σε αυτή την έρευνα όλα τα μοντέλα που περιλαμβάνουν ξεχωριστές ενότητες για το κλίμα, την οικονομία και την ενέργεια θεωρούνται IAM. Εξαιρέσεις αποτελούν ορισμένα μοντέλα ενεργειακών συστημάτων (Κεφάλαιο 6) που ενδέχεται να μην περιλαμβάνουν ρητά μια ενότητα κλιματικών αλλαγών, αλλά να επικεντρώνονται αποκλειστικά στην προβολή των εκπομπών (π.χ. Stanton et al. 2009), χωρίς προσδιορισμό της κλιματικής αλλαγής ή υπολογισμό των ζημιών.

1.2 Δομή της Εργασίας

Η παρούσα εργασία αποτελείται από 10 κεφάλαια ακολουθούμενα από την βιβλιογραφία. Σε αυτή την ενότητα γίνεται συνοπτική παρουσίαση του περιεχομένου κάθε κεφαλαίου.

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

Στο Κεφάλαιο 2 περιγράφονται αναλυτικά τα χαρακτηριστικά της μοντελοποίησης κλίματος-οικονομία στα οποία εστιάζει η παρούσα εργασία. Αρχικά περιγράφεται η προσέγγιση της εκτίμησης των επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής που πραγματοποιούν τα μοντέλα και η χρήση των συναρτήσεων εκτίμησης των νομισματικών ζημιών. Στη συνέχεια περιγράφεται η επιρροή της τεχνολογικής

προόδου στα κλιματικά ζητήματα και τα είδη τεχνολογικής εξέλιξης που θεωρούν τα μοντέλα (εξωγενής και ενδογενής). Ένα άλλο τμήμα που εμπεριέχεται στο θεωρητικό υπόβαθρο της εργασίας είναι τα είδη προσέγγισης της δομής των μοντέλων, τα οποία μπορεί να είναι top-down, bottom-up ή hybrid. Το επόμενο τμήμα αναφέρεται στο ζήτημα της αβεβαιότητας στην ανάλυση κλίματος-οικονομίας και στα είδη αβεβαιότητας που συναντώνται κατά την εκτίμηση των παραμέτρων των μοντέλων. Τέλος αποδίδεται μια αναλυτική περιγραφή των κοινωνικοοικονομικών σεναρίων που χρησιμοποιούνται για την υποστήριξη των πολιτικών αποφάσεων για το κλίμα και στην ανάλυση κλίματος-οικονομίας.

Στο Κεφάλαιο 3 παρουσιάζεται μια κατηγοριοποίηση των μοντέλων που εξετάζονται στην παρούσα εργασία. Διακρίνονται 5 κατηγορίες που αντιστοιχούν κυρίως στην οικονομική δομή των μοντέλων: τα Μοντέλα Βέλτιστης Ανάπτυξης ή βελτιστοποίησης της ευημερίας, τα Μοντέλα Γενικής Ισορροπίας ή τα συνήθως αναφερόμενα ως Computable General Equilibrium - CGE, τα Μοντέλα Μερικής ισορροπίας, τα Μακροοικονομικά μοντέλα και τα Υπόλοιπα Μοντέλα. Επίσης παρουσιάζεται ξεχωριστά η υποκατηγορία των μοντέλων Ενεργειακών Συστημάτων τα οποία ανήκουν στα μοντέλα Μερικής ισορροπίας. Στη συνέχεια παρατίθεται μία σύντομη περιγραφή για κάθε κατηγορία και ενσωματώνονται δύο πίνακες που περιέχουν μία γενική εικόνα των 6 κατηγοριών και των χαρακτηριστικών των διαφορετικών προσεγγίσεων μοντελοποίησης.

Τα κεφάλαια 4 έως 9 παρουσιάζουν ξεχωριστά τις κατηγορίες των μοντέλων και έχουν ακριβώς την ίδια δομή. Αρχικά παρατίθεται μία περιγραφή των χαρακτηριστικών της κατηγορίας. Ακολουθούν σύντομες περιγραφές για κάθε μοντέλο της κατηγορίας, συνοδευόμενες από την αντίστοιχη συνάρτηση ζημιών για τα μοντέλα που εμπεριέχουν τέτοιο είδος προσέγγισης. Επίσης παρατίθενται συγκεντρωτικοί πίνακες οι οποίοι παρουσιάζουν πληροφορίες σχετικά με την προοπτική των μοντέλων, τον αριθμό των περιφερειών που εξετάζουν, την περίοδο πρόβλεψης που μπορούν να καλύψουν, την συνάρτηση ζημιών (damage function), το είδος της ανάλυσης της αβεβαιότητας που πραγματοποιείται, τις παραμέτρους αβεβαιότητας που εξετάζονται και το είδος της τεχνολογικής πρόοδο που θεωρείται για κάθε μοντέλο της κατηγορίας. Οι πίνακες συνοδεύονται από συγκρίσεις και παρατηρήσεις για τα διαφορετικά χαρακτηριστικά των μοντέλων που παρουσιάζουν. Σε μερικές κατηγορίες, παρουσιάζεται και μια

εμπεριστατωμένη περιγραφή ενός αντιπροσωπευτικού μοντέλου όπως του DICE στο κεφάλαιο 4 και του PAGE2002 στο κεφάλαιο 9, η οποία εστιάζει στις ιδιότητες μοντελοποίησης που εξετάζονται σε αυτή την εργασία.

Στο Κεφάλαιο 10 αναγράφονται μερικά συμπεράσματα και παρατηρήσεις που προκύπτουν από την παρούσα ανασκόπηση.

2

Θεωρητικό υπόβαθρο

2.1 Υπολογισμός Επιπτώσεων της Κλιματικής Αλλαγής.

Το θέμα της εκτίμησης των επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής απασχολεί έντονα τους ερευνητές στις τελευταίες δεκαετίες. Για το σκοπό αυτό τα ολοκληρωμένα μοντέλα αξιολόγησης έχουν αναπτύξει διάφορες προσεγγίσεις απεικόνισης. Οι κυριότερες από αυτές περιλαμβάνουν αφενός *γεωγραφικά μοντέλα βιοφυσικών επιπτώσεων* (π.χ. για την εκτίμηση των κλιματικών αλλαγών και της πιθανότητας εμφάνισης ασθενειών και πλημμυρών στις παράκτιες περιοχές) και αφετέρου *συναρτήσεις εκτίμησης των παγκόσμιων και των περιφερειακών νομισματικών ζημιών*. Οι συναρτήσεις εκτίμησης των νομισματικών ζημιών συνδυάζουν περιπτωσιολογικές μελέτες (για επιλεγμένες περιοχές ή χώρες), οικονομικές μελλοντικές αναλύσεις (που βασίζονται στις τρέχουσες διακυμάνσεις της οικονομικής παραγωγικότητας και άλλων σχετικών μεταβλητών), επίσημες αξιολογήσεις εμπειρογνομώνων και εκτιμήσεις του μοντέλου. Η επιλογή των δεικτών εκτίμησης των επιπτώσεων σε ένα IAM καθορίζεται σε μεγάλο βαθμό από το υποκείμενο αναλυτικό πλαίσιο απόφασης του μοντέλου. Τα δυναμικά μοντέλα μεγιστοποίησης της ευημερίας περιέχουν μια διαχρονική συνάρτηση κοινωνικής ευημερίας, η οποία συγκεντρώνει όλες τις κλιματικές επιπτώσεις συναρτήσει του χρόνου, των περιοχών, των τομέων με επιπτώσεις και των αβέβαιων καταστάσεων του κόσμου (στην στοχαστική ανάλυση). Παρόλο που η εκτίμηση των κλιματικών επιπτώσεων δεν είναι υποχρεωτική για την εκτίμηση της ευημερίας, όλα τα πρόσφατα IAM που βασίζονται σε αυτό το πλαίσιο εφαρμόζουν νομισματικές συναρτήσεις ζημιών. Τα περισσότερα μοντέλα κλίματος-οικονομίας που βασίζονται σε μια προσέγγιση γενικής ή μερικής ισορροπίας δεν περιλαμβάνουν μονάδα εκτίμησης των επιπτώσεων. Το ίδιο ισχύει και για τα μακροοικονομικά μοντέλα και για τα μοντέλα ενεργειακών συστημάτων. Τα μοντέλα που δεν εντάσσονται σε μία από τις παραπάνω κατηγορίες περιέχουν μερικές προσεγγίσεις που πραγματοποιούν εκτίμηση των επιπτώσεων, εφαρμόζοντας συναρτήσεις υπολογισμού των νομισματικών ζημιών.

Η διαφοροποίηση στην εκτίμηση των επιπτώσεων των κλιματικών αλλαγών στα IAM παρατηρείται ανάλογα με τις κατηγορίες των ζημιών που εξετάζουν και την υποδομή των χωρικών πληροφοριών (spatial data infrastructure) που περιλαμβάνουν. Όλα τα μοντέλα βελτιστοποίησης της ευημερίας αντιπροσωπεύουν τις κλιματικές επιπτώσεις με συναρτήσεις νομισματικής ζημίας οι οποίες υπολογίζουν είτε τις παγκόσμιες συγκεντρωτικές ζημιές, είτε τις εξειδικευμένες περιφερικές ζημιές, ως κλάσμα του (παγκόσμιου ή περιφερειακού) ακαθάριστου εγχώριου προϊόντος. Η συναρτησιακή σχέση μεταξύ των κλιματικών δεικτών και των νομισματικών επιπτώσεων σχεδιάζεται κατά κανόνα από τους δημιουργούς των μοντέλων και συνήθως ταιριάζει σε περιορισμένο αριθμό αντίκτυπων. Σε μία πρόσφατη περιεκτική ανασκόπηση της μοντελοποίησης των επιπτώσεων στα IAM εκτιμήθηκε ότι οι υπολογισμοί των επιπτώσεων ήταν «βασισμένες σε ένα μάλλον στενό σύνολο μελετών» και ότι «οι υπολογισμοί των ζημιών συχνά γίνονταν για μερικά μόνο επίπεδα συγκέντρωσης του CO₂ γύρω από το σημείο αναφοράς».

2.2 Τεχνολογική Πρόοδος

Ένα από τα κυριότερα ερωτήματα που παραμένουν στην μοντελοποίηση της κλιματικής πολιτικής είναι η κατάλληλη αντιμετώπιση της τεχνολογικής προόδου ΤΠ (Technological Change). Η προσέγγιση της μοντελοποίησης της ΤΠ θεωρείται ευρέως ως ένας από τους σημαντικότερους παράγοντες που επηρεάζουν τα αποτελέσματα των αναλύσεων της κλιματικής πολιτικής, η οποία σχετίζεται με το επίπεδο μείωσης των εκπομπών που μπορεί να επιτευχθεί με ένα δεδομένο κόστος. Δυστυχώς οι περίπλοκοι μηχανισμοί από τους οποίους εξαρτάται η εξέλιξη της τεχνολογίας δεν αποτυπώνονται εύκολα στα πλαίσια της μοντελοποίησης. Έτσι λόγω της αναπόφευκτης σύνδεσης της κλιματικής πολιτικής με την τεχνολογική πρόοδο (και ειδικά στα θέματα των τεχνολογιών του ενεργειακού τομέα), δημιουργούνται σημαντικές δυσκολίες στον καθορισμό των επιπτώσεων της εφαρμογής των πολιτικών μέτρων.

2.2.1 Εξωγενής Τεχνολογική Πρόοδος

Παρόλο που πρόκειται για μια απλή συνάρτηση του χρόνου η εξωγενής τεχνολογική πρόοδος μπορεί να ενσωματωθεί με διαφορετικούς τρόπους στα μοντέλα κλίματος-οικονομίας. Η απλούστερη προσέγγιση της ΤΠ είναι να υποθέσουμε ότι η συνολική

πρόοδος της οικονομίας εμφανίζεται ως ένα ανεξάρτητο κέρδος αυξανόμενο με την πάροδο του χρόνου. Εντούτοις, αυτή η προσέγγιση δεν καθορίζει την κατεύθυνση της εξοικονόμησης ενέργειας την οποία ακολουθεί η ΤΠ. Μια απλή τροποποίηση που χρησιμοποιείται με σκοπό την ενσωμάτωση της ενεργειακής εξοικονόμησης στις βελτιώσεις της παραγωγικότητας είναι η εισαγωγή μίας παραμέτρου βελτίωσης της ενεργειακής αποδοτικότητας (autonomous energy-efficiency improvement (AEEI)), η οποία αυξάνει αυτόνομα την ενεργειακή αποδοτικότητα της οικονομίας με μία δεδομένη εξωγενής ποσότητα κάθε χρόνο. Η χρήση μιας παραμέτρου AEEI είναι ιδιαίτερα συχνή στα ολοκληρωμένα μοντέλα αξιολόγησης (π.χ Nordhaus et al., 1994). Σε μερικές πιο αναλυτικές προσεγγίσεις η συνολική πρόοδος της εξοικονόμησης ενέργειας μπορεί να προσδιοριστεί με την προσθήκη ενός ανεξάρτητου κέρδους παραγωγικότητας, σε μια δεδομένη χρονική περίοδο (π.χ. σε έναν τομέα ή όταν χρησιμοποιείται μια τεχνολογία με μεγαλύτερη ενεργειακή αποδοτικότητα). Η αυτόνομη βελτίωση της ενεργειακής αποδοτικότητας ωστόσο, έχει το βασικό πλεονέκτημα της απλότητας και της διαφάνειας, μειώνοντας τον κίνδυνο εμφάνισης μη γραμμικών μοντέλων και πολλαπλών ισορροπιών και επιτρέποντας την απλή ανάλυση ευαισθησίας με διαφορετικές τιμές του δείκτη AEEI.

Στη κατηγορία της εξωγενής τεχνολογικής προσέγγισης ανήκει και η ενσωμάτωση backstop τεχνολογιών. Οι τεχνολογίες backstop είναι συνήθως πηγές ενέργειας χωρίς άνθρακα οι οποίες μπορεί να είναι ήδη γνωστές, αλλά δεν έχουν ακόμη εμπορευματοποιηθεί ευρέως. Τα μοντέλα συχνά υποθέτουν ότι μια τέτοια τεχνολογία έχει ένα σταθερό και σχετικά υψηλό οριακό κόστος και είναι διαθέσιμη σε μια σχεδόν απεριόριστη ποσότητα. Αν η τιμή της ενέργειας που παράγεται από άνθρακα αυξηθεί αρκετά, τότε η backstop τεχνολογία θα εισχωρήσει στην αγορά και θα αποτρέψει την περαιτέρω αύξηση της τιμής της ενέργειας. Οι αναλυτές συχνά υποθέτουν ότι το κόστος της τεχνολογίας backstop μειώνεται με αυτόνομο ρυθμό σε συνάρτηση με τον χρόνο, πράγμα που υποδηλώνει ότι η ενσωμάτωση της backstop τεχνολογίας έχει εξωγενής επίδραση στην τεχνολογική εξέλιξη. Ορισμένα μοντέλα, όπως το μοντέλο GREEN (Burniaux et al., 1992), διαθέτουν περισσότερες από μία backstop τεχνολογίες. Οι τεχνολογίες που συχνά θεωρούνται backstop προέρχονται από προηγμένες τεχνολογίες ηλιακής ενέργειας και πυρηνικής σύντηξης, από πιθανές ανανεώσιμες πηγές ενέργειας για τις μεταφορές και από προηγμένες τεχνολογίες παραγωγής ορυκτών καυσίμων όπως το σχιστολιθικό πετρέλαιο (Loschel, 2002).

2.2.2 Ενδογενής Τεχνολογική Πρόοδος

Σε αντίθεση με την απλοποίηση της εκτίμησης της μελλοντικής εξέλιξης της τεχνολογίας που παρουσιάζει η εξωγενής προσέγγιση, η ενδογενής ανάλυση βασίζεται σε μια ευρεία βιβλιογραφία, η οποία υποδεικνύει ότι η ΤΠ είναι μια σύνθετη διαδικασία που εξαρτάται από πολλούς παράγοντες. Η ενδογενής αλλαγή της τεχνολογίας (ΕΤΠ) περιέχει έναν μηχανισμό ανάδρασης με τον οποίο η κλιματική πολιτική καθορίζει τα ερευνητικά πλαίσια της ΤΠ για την ανάπτυξη τεχνολογιών εξοικονόμησης άνθρακα. Αυτή η ανατροφοδότηση περιέχει τα πολιτικά μέτρα μετριασμού που εφαρμόζονται (π.χ. η πρόσθετη φορολόγηση της ενέργειας και οι πρόσθετες κατευθυντήριες οδηγίες για την διαδικασία έρευνας και ανάπτυξης) και την συσσώρευση εμπειρίας στον τομέα της παραγωγής (learning-by-doing) η οποία οδηγεί σε μείωση του κόστους παραγωγής και της κατανάλωσης ενέργειας. Έτσι οι τρέχουσες τεχνολογικές δυνατότητες για την διαδικασία της παραγωγής, σε συνδυασμό με διάφορα ποσά κεφαλαίου, εργασίας και ορίων εκπομπών, εξαρτώνται από τους δείκτες των δυνατοτήτων και των δραστηριοτήτων που έγιναν στο παρελθόν. Ως αποτέλεσμα αυτού του μηχανισμού εκτίμησης οι μελλοντικές τεχνολογικές δυνατότητες με την σειρά τους θα εξαρτηθούν από τις τρέχουσες δυνατότητες και δραστηριότητες. Αυτή η ενδογενής προσέγγιση έχει οδηγήσει σε σημαντική διερεύνηση των τρόπων με τους οποίους οι ιστορικές τιμές και τα πολιτικά μέτρα επηρεάζουν τις σημερινές δυνατότητες παραγωγής (Oravetz και Dowlatabadi 1995, Newell et al., 1999, Jaffe et al., 2004, Grubb et al. 2002, Azar and Dowlatabadi, 1999). Ειδικότερα μερικές από αυτές τις μελέτες επικρίνουν τη χρήση του δείκτη ΑΕΕΙ, λόγω της παραμέλησης των αιτιών που επηρεάζουν την εξέλιξη των τεχνολογιών, οδηγώντας έτσι σε παραμορφωμένα και ακατάλληλα αποτελέσματα. Επιπλέον άλλες μελέτες, όπως αυτές του Oravetz και του Dowlatabadi, υπογραμμίζουν ότι η χρήση του ΑΕΕΙ στην μοντελοποίηση της ΤΠ δεν είναι απόλυτα συνεπής με τα εμπειρικά στοιχεία.

Αν και είναι δύσκολο να κατηγοριοποιηθούν ξεκάθαρα, οι αναλύσεις της ΕΤΠ συνήθως βασίζονται σε μία από τις τρεις ακόλουθες προσεγγίσεις: η προσέγγιση άμεσης επαγωγής στις τιμές (direct price-induced), η προσέγγιση επαγωγής στην Έρευνα και την Ανάπτυξη (R&D-induced) ή η προσέγγιση επαγωγής στην μάθηση (learning-induced). Η προσέγγιση της άμεσης επαγωγής στις τιμές θεωρεί ότι οι αλλαγές (αυξήσεις) στις σχετικές τιμές μπορούν να ωθήσουν την καινοτομία της

τεχνολογίας να μειώσει τη χρήση των δαπανηρότερων εισροών (π.χ. ενέργειας). Η προσέγγιση με επαγωγή στην E&A θεωρεί ότι οι επενδύσεις σε έρευνα και ανάπτυξη επηρεάζουν τον ρυθμό και την κατεύθυνση της τεχνολογικής αλλαγής. Η μέθοδος αυτή συχνά περιλαμβάνει και ένα καθορισμένο κεφάλαιο γνώσης σε μορφή στοκ. Γενικά υπάρχει μεγάλη ποικιλομορφία στις προσεγγίσεις που βασίζονται στην E&A για τη μοντελοποίηση της ΤΠ. Η δομή του μοντέλου είναι ο κυρίαρχος παράγοντας σε αυτή την περαιτέρω διαίρεση, καθώς διαφορετικές δομές μοντέλων τείνουν να είναι συμβατές με διαφορετικές ενδογενής προσεγγίσεις που βασίζονται στην E&A. Τέλος, η ΤΠ που προκύπτει από την επαγωγή στην εκμάθηση προσδιορίζει το μοναδιαίο κόστος μιας συγκεκριμένης τεχνολογίας ως φθίνουσα συνάρτηση της εμπειρίας που συσσωρεύεται σχετικά με αυτή. Η μέθοδος μάθησης μέσω της πρακτικής εμπειρίας (learning-by-doing) είναι η μέθοδος που χρησιμοποιείται πιο συχνά σε αυτή την προσέγγιση. Εδώ το μοναδιαίο κόστος της νέας τεχνολογίας τυπικά διαμορφώνεται αντιστρόφως ανάλογα με την αύξηση της συνολικής παραγωγής.

2.3 Δομές Bottom-up, Top-down και Hybrid

Για την ανάπτυξη της δομής των IAM χρησιμοποιούνται δύο βασικές προσεγγίσεις: η τεχνολογική bottom-up δομή (από την βάση προς την κορυφή) και η οικονομική top-down δομή (από την κορυφή προς την βάση). Τα βασικά χαρακτηριστικά των δύο δομών αναδεικνύουν το είδος των προσομοιώσεων και τους αντίστοιχους υπολογισμούς που προορίζονται να εκτελέσουν. Έτσι τα τεχνολογικά μοντέλα είναι σχεδιασμένα να προσομοιώνουν τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ των πολυάριθμων, μεμονωμένων ενεργειακών τεχνολογιών που συνθέτουν το ενεργειακό σύστημα μιας οικονομίας· ενώ τα οικονομικά μοντέλα, να προσομοιώνουν τις αλληλεπιδράσεις της προσφοράς και της ζήτησης και την επίδραση τους στην διαμόρφωση των τιμών (σε όλες τις αγορές και για όλα τα αγαθά, ενεργειακά και μη ενεργειακά). Τα μοντέλα top-down αποτελούν ένα τυπικό εργαλείο για την μακροοικονομική αξιολόγηση των επιπτώσεων της μείωσης του διοξειδίου του άνθρακα στην ατμόσφαιρα. Υπολογίζουν το μακροοικονομικό κόστος της μείωσης του CO₂, τα νέα επίπεδα των βασικών οικονομικών συντελεστών (του εισοδήματος και της οικονομικής ευημερίας) και τις ανατροφοδοτήσεις που προκαλούνται στις τιμές ολόκληρης της οικονομίας. Τα μοντέλα bottom-up από την άλλη, χρησιμοποιούνται για τη διερεύνηση του

χαρτοφυλακίου των τεχνολογιών του ενεργειακού συστήματος, προκειμένου να εντοπιστούν ευκαιρίες χρηματοδότησης ή μείωσης κόστους που βασίζονται στον σχεδιασμό των τεχνολογιών και στα θεσμοθετημένα πρότυπα εκπομπών .

Τα μοντέλα με δομή από την βάση προς τα πάνω (bottom-up) εστιάζουν στην αναλυτική προσομοίωση των συστημάτων παραγωγής και μεταφοράς ενέργειας. Πρόκειται για μια απλοϊκή αναπαράσταση του τρόπου με τον οποίο οργανώνεται πραγματικά η παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας. Στη τεχνολογική προσέγγιση η παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας πραγματοποιείται από μια σειρά διακριτών τεχνολογιών με διαφορετικά χαρακτηριστικά και αποδοτικότητα. Αυτή η περιγραφή αντιστοιχεί στο παραδοσιακό μοντέλο ανάλυσης της διαδικασίας παραγωγής (π.χ. Boehringer, 1998). Έτσι ο στόχος των δομών bottom-up είναι να παρέχουν πληθώρα πληροφοριών σχετικά με τις τεχνολογίες των ενεργειακών συστημάτων, να περιγράφουν συστηματικά τα επίπεδα δυναμικότητας των τεχνολογιών μετασχηματισμού και μετατροπής ενέργειας και να υπολογίζουν το ελάχιστο κόστους για την κάλυψη συγκεκριμένων ενεργειακών απαιτήσεων. Οι λεπτομέρειες για τις επιμέρους τεχνολογίες καταγράφονται σε έναν πίνακα που περιλαμβάνει τους μεμονωμένους μηχανισμούς μετατροπής ενέργειας για διάφορους πρωτογενείς πόρους, οι οποίοι χρησιμοποιούνται σε μία σειρά συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας. Ο πίνακας αυτός αντιπροσωπεύει το επίπεδο δυναμικότητας αυτών των μηχανισμών. Επίσης ο καθορισμός των ενεργειακών απαιτήσεων για τα επιμέρους συστήματα που εξετάζονται προέρχεται είτε από τις καμπύλες ζήτησης (demand curves), είτε από κάποιο ολοκληρωμένο μακροοικονομικό μοντέλο (π.χ. Manne et al., 1995). Εντούτοις, αυτά τα μοντέλα συνήθως δεν περιλαμβάνουν λεπτομερή μοντελοποίηση της συνολικής μακροοικονομίας με αποτέλεσμα να αδυνατούν να πραγματοποιήσουν συνολική οικονομική αξιολόγηση των αποτελεσμάτων τους.

Τα λεγόμενα υβριδικά (hybrid) μοντέλα γεφυρώνουν το χάσμα μεταξύ των δομών bottom-up και top-down ενσωματώνοντας την λεπτομερή αναπαράσταση των ενεργειακών συστημάτων που παρέχουν τα μοντέλα "bottom-up" στη δομή μακροοικονομικής ισορροπίας των μοντέλων CGE. Στο πλαίσιο αυτό έχει αναπτυχθεί η υβριδική μαθηματική δομή economic-engineering. Εδώ οι εισροές και η παραγωγή της βιομηχανίας της ηλεκτρικής ενέργειας χρησιμοποιούνται για να αναλυθούν από τους μακροοικονομικούς υπολογισμούς με σκοπό να αξιολογηθούν τα συνολικά

αποτελέσματα που επιφέρουν στην οικονομία. Συγκεκριμένα πραγματοποιείται μακροοικονομική ανάλυση για τις εισροές και τις εκροές τριών διακριτών δραστηριοτήτων: της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας (GEN), της μετάδοσης και της διανομής (TD) και της διοίκησης (OH). Οι TD και OH μπορούν να θεωρηθούν ως βοηθητικές δραστηριότητες που δεν συμμετέχουν στη διαδικασία μετατροπής της πρωτογενούς ενέργειας, ενώ η GEN είναι μία σύνθεση από μεμονωμένες τεχνολογίες παραγωγής, οι οποίες ανταγωνίζονται μεταξύ τους ως προς το ύψος του κόστους παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και ως προς το είδος των πρωτογενών εισροών που χρησιμοποιούν.

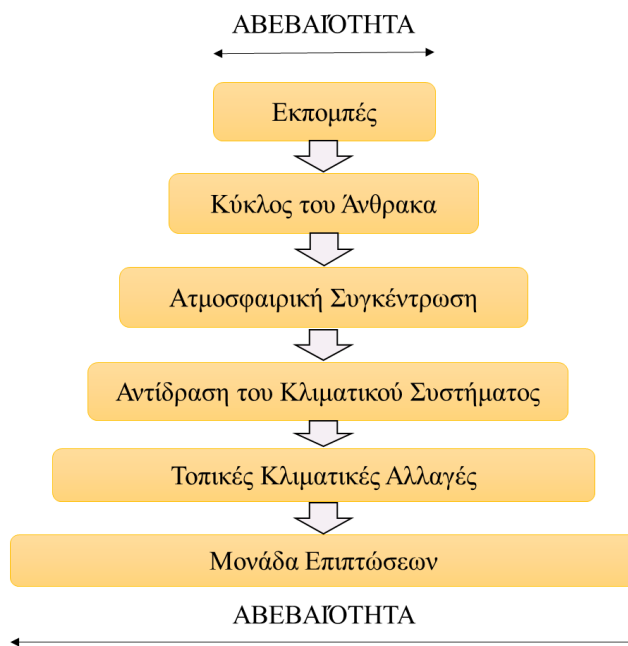
2.4 Αβεβαιότητα στα μοντέλα κλίματος-οικονομίας

Τα τελευταία χρόνια έχει ανακύψει μία συνεχώς αυξανόμενη ανάγκη για πιο λεπτομερή ανάλυση της αβεβαιότητας στα μοντέλα κλίματος-οικονομίας. Οι συγγραφείς της Τρίτης Έκθεσης Αξιολόγησης (TAR) της Διακυβερνητικής Επιτροπής για την Αλλαγή του Κλίματος (IPCC) αποφάσισαν πρόσφατα ότι η περαιτέρω διερεύνηση και η ποσοτικοποίηση της αβεβαιότητας αποτελούν μείζον ζήτημα (Moss and Schneider, 2000). Η αβεβαιότητα που διέπει αυτό το πεδίο έρευνας και μοντελοποίησης προέρχεται από όλες τις επιστημονικές πτυχές που αναφέρθηκαν στην Ενότητα 1.1.

2.4.1 Κλιματικές Αβεβαιότητες

Η αξιολόγηση της αβεβαιότητας της μελλοντικής κλιματικής αλλαγής στα περιβαλλοντικά συστήματα αντιμετωπίζει μία σειρά δυσκολιών που προέρχονται από την ατελής ή ελλιπή επιστημονική γνώση (Schneider et al). Η ελλιπή γνώση εν μέρη απορρέει από την απρόβλεπτη συμπεριφορά του Γήινου Συστήματος και από την αδυναμία πραγματοποίησης αξιόπιστης πρόβλεψης της μελλοντικής κοινωνικοοικονομικής ανθρώπινης συμπεριφοράς. Η αβεβαιότητα σχετικά με τις μελλοντικές κοινωνικοοικονομικές τάσεις έχει οδηγήσει σε ένα ευρύ φάσμα προβλέψεων σχετικά με το ύψος των μελλοντικών εκπομπών των αερίων του θερμοκηπίου (GHG). Με την σειρά της η εκτίμηση των μελλοντικών ατμοσφαιρικών συγκεντρώσεων που θα δημιουργηθούν από αυτές τις εκπομπές, επιφέρει ακόμα μεγαλύτερη αβεβαιότητα λόγω της ελλιπής γνώσης σχετικά με τις πηγές των αερίων

του θερμοκηπίου και τους ρυθμούς ανακύκλωσης τους στο σύστημα της Γης. Όταν στη συνέχεια οι εκτιμώμενες συγκεντρώσεις χρησιμοποιηθούν για να προσδιοριστούν οι κλιματικές αλλαγές που θα προκαλέσουν, παρατηρείται μια πληθώρα πρόσθετων αβεβαιοτήτων οι οποίες προκύπτουν από τους διαρθρωτικούς και υπολογιστικούς περιορισμούς των μοντέλων υπολογισμού. Οι αβεβαιότητες στην εκτίμηση των μελλοντικών κλιματικών αλλαγών, με την σειρά τους, θα επηρεάσουν τόσο την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων, όσο και την ανάπτυξη και αξιολόγηση των μοντέλων των κλιματικών επιπτώσεων. Οι επιπτώσεις αυτές αφορούν άμεσα την αύξηση της ατμοσφαιρικής θερμοκρασίας, την αύξηση της θερμοκρασίας των ωκεανών, το λιώσιμο των πάγων, την αύξηση της στάθμης της θάλασσας και την ένταση των βροχοπτώσεων. Όπως φαίνεται από την Εικόνα 3 κάθε προηγούμενο στάδιο συμβάλλει με επιπλέον αβεβαιότητα στο επόμενο, αφού τα αποτελέσματα του χρησιμοποιούνται ως εισροές στο επόμενο. Ως αποτέλεσμα αυτής της προσθετικότητας το στάδιο με την μεγαλύτερη αβεβαιότητα είναι αυτό της εκτίμησης των επιπτώσεων.



Εικόνα 3 Σχηματική απεικόνιση των σταδίων υπολογισμού για την εκτίμηση των κλιματικών επιπτώσεων και το μέγεθος της αβεβαιότητας που περιλαμβάνουν (Mark New et al.,2000)

2.4.2 Κοινωνικοοικονομικές Αβεβαιότητες

Από την πλευρά των κοινωνικοοικονομικών επιστημών υπάρχουν σημαντικές αβεβαιότητες σχετικά με τις επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής στην οικονομία και στην ευημερία των ανθρώπων. Η δυσκολία της μοντελοποίησης των κοινωνικοοικονομικών και των βιοφυσικών επιπτώσεων εν μέρει οφείλεται στην αβεβαιότητα που διέπει την πρόβλεψη της κλιματικής αλλαγής η οποία αναφέρθηκε εκτενώς στην παράγραφο 2.4.1, π.χ. τα ενδεχόμενα κλιματολογικών ασταθειών μεγάλης κλίμακας και η εμφάνιση ακραίων κλιματικών φαινομένων. Άλλες δυσκολίες που εμφανίζονται κατά τον προσδιορισμό αυτών των επιπτώσεων αφορούν τις αβεβαιότητες που υπάρχουν σχετικά με το μέγεθος της *κοινωνικοοικονομικής ανάπτυξης* στο μέλλον (η αύξηση του πληθυσμού, οι κοινωνικές συνήθειες, η ευαισθητοποίηση για το περιβάλλον και η αύξηση της παραγωγής και τις κατανάλωσης κ.λ.π), την *μελλοντική εξέλιξη της τεχνολογίας*, η οποία συνεισφέρει στην μείωση των εκπομπών και στην αποδοτικότητα της παραγωγής και την *προσαρμοστική ικανότητα* των κοινωνιών (περιγράφεται ως έννοια στην Παράγραφο 2.5.2). Μια άλλη σημαντική αβεβαιότητα που προστίθεται στο γενικό πλαίσιο των κοινωνικοοικονομικών αβεβαιοτήτων αναφέρεται στις προβλέψεις των νομισματικών επιπτώσεων. Ακόμη και αν οι βιοφυσικές και οι κοινωνικές επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής ήταν γνωστές με βεβαιότητα, οι προβλέψεις των νομισματικών επιπτώσεων θα εξακολουθούσαν να επηρεάζονται έντονα από αβέβαιες επιλογές σχετικά με τον συνυπολογισμό του κόστους και των οφελών (ανά διαστήματα χρόνου, ανά περιοχή, ανά κοινωνική ομάδα, ανά αγορά και ανά μη εμπορεύσιμη επίπτωση). Αυτές οι επιλογές συχνά κυριαρχούν στο αποτέλεσμα της συνάθροισης των επιπτώσεων.

2.4.3 Αβεβαιότητες για την μελλοντική Εξέλιξη της Τεχνολογίας

Ένας άλλος σημαντικός παράγοντας για την μοντελοποίηση είναι η αβεβαιότητα που σχετίζεται με τον βαθμό της *μελλοντικής τεχνολογικής καινοτομίας*. Η τεχνολογική πρόοδος έχει την δυνατότητα να επηρεάζει σημαντικά την κλιματική αλλαγή και να επιφέρει άμεσα αποτελέσματα μετριασμού. Η ανάπτυξη και η εξέλιξη τεχνολογιών φιλικότερες προς το περιβάλλον στον τομέα της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, στις μεταφορές και στην βιομηχανία, μπορούν να επιφέρουν σημαντικό μετριασμό της κλιματικής αλλαγής. Για παράδειγμα στον τομέα της ΠΗΕ υπάρχουν πολλές

περιπτώσεις ανάπτυξης νέων τεχνολογιών που χρησιμοποιούν εναλλακτικές πηγές ενέργειας, οι οποίες θα μπορούσαν στο μέλλον να αντικαταστήσουν τις παλαιές τεχνολογίες άνθρακα και να συμβάλλουν δραστικά στην μείωση των εκπομπών. Το ίδιο ισχύει και για τους τομείς της βιομηχανικής παραγωγής και των μεταφορών. Ένα παράδειγμα τεχνολογικής καινοτομίας που αφορά τον τομέα των μεταφορών, αναφέρεται στην δυνατότητα παραγωγής φθηνότερων ηλεκτρικών αυτοκινήτων, η οποία θα καθιστούσε ευκολότερη την μαζική αντικατάσταση των κινητήρων εσωτερικής καύσης και έτσι θα μπορούσε να συμβάλλει άμεσα στην μείωση της ρύπανσης του περιβάλλοντος και στην κατανάλωση καυσίμων. Ως αποτέλεσμα της μεγάλης επιρροής της τεχνολογίας στα κλιματικά ζητήματα παρατηρείται μεγάλη εξάρτηση της συνολικής αβεβαιότητας των κλιματικών προβλέψεων (προβλέψεις των περιβαλλοντολογικών αλλαγών, των κοινωνικοοικονομικών επιπτώσεων και της εκτίμησης του κόστους μετριασμού) από την αβεβαιότητα της μελλοντικής τεχνολογικής και τον βαθμό της μελλοντικής μάθησης.

2.4.4 Αβεβαιότητες των μέτρων μετριασμού

Μια άλλη πτυχή της αβεβαιότητας στα μοντέλα κλίματος-οικονομίας αφορά τις εκτιμήσεις της αποτελεσματικότητας και του κόστους των μέτρων μετριασμού. Η εκτιμήσεις αυτές έχουν σημαντική βαρύτητα κατά την διαδικασία λήψης πολιτικών αποφάσεων για το κλίμα. Όπως και στα προηγούμενα ζητήματα, εδώ επίσης υπάρχουν σημαντικές δυσκολίες που δυσχεραίνουν τις ζητούμενες εκτιμήσεις. Τα μέτρα μετριασμού της κλιματικής αλλαγής αφορούν την μείωση της συγκέντρωσης των GHG στην ατμόσφαιρα και συνδέονται κυρίως με τους τομείς της ενέργειας και των μεταφορών στις βιομηχανικές χώρες και σε αυξανόμενο βαθμό με τους τομείς της ενέργειας και της δασοκομίας στις αναπτυσσόμενες χώρες. Είναι γενικά καλά οργανωμένα, συνδέονται στενά με τον εθνικό προϋπολογισμό και με τη χάραξη πολιτικής και χρησιμοποιούνται για τη λήψη μεσοπρόθεσμων και μακροπρόθεσμων επενδυτικών αποφάσεων. Η αβεβαιότητα στις εκτιμήσεις του κόστους και της αποτελεσματικότητας των μέτρων μετριασμού που προτείνονται προέρχεται από κάποιες αβέβαιες παραδοχές που κάνουν οι αναλύσεις κλίματος-οικονομίας. Ένας βασικός παράγοντας που επηρεάζει αυτές τις εκτιμήσεις είναι ο προσδιορισμός του βαθμού της μελλοντικής ανάπτυξης των φιλικών προς το περιβάλλον τεχνολογιών που χρησιμοποιούνται στους προαναφερόμενους τομείς. Η αβεβαιότητα που σχετίζεται με

την πρόβλεψη της μελλοντικής τεχνολογικής προόδου και του μελλοντικού βαθμού μάθησης γενικότερα, επιφέρει άμεσα αβεβαιότητες σχετικά με την αποτελεσματικότητα και του κόστους των επενδύσεων στις νέες τεχνολογίες. Μία άλλη δυσκολία προκύπτει από τις αβέβαιες εκτιμήσεις των μελλοντικών συγκεντρώσεων των αερίων του θερμοκηπίου στην ατμόσφαιρα, η οποία συνεισφέρει στην αβεβαιότητα του κόστους των απαιτούμενων μέτρων μετριασμού που χρειάζονται για την επίτευξη των στόχων που έχουν τεθεί. Τέλος, στις ήδη υπάρχουσες δυσκολίες προστίθεται και η δυσκολία εύρεσης ικανοποιητικών κινήτρων για την συμμετοχή όλων των αναπτυγμένων χωρών στην υλοποίηση μέτρων μετριασμού υψηλού κόστους, όπως είναι το εμπόριο εκπομπών. Η καθυστέρηση ή η άρνηση συμμετοχής, μερικών εξ αυτών, μπορούν να επηρεάσουν σημαντικά την συγκέντρωση των ρυπογόνων αερίων στην ατμόσφαιρα και ως αποτέλεσμα αυτού να αυξήσουν το κόστος των απαιτούμενων μέτρων μετριασμού.

2.4.5 Εκτίμηση της Αβεβαιότητας

Γενικά υπάρχουν δύο είδη εκτίμησης της αβεβαιότητας: ντετερμινιστική και στοχαστική (πιθανοτική). Οι ντετερμινιστικές προσεγγίσεις πραγματοποιούν εκτιμήσεις για τις πιθανές τιμές των αβέβαιων παραμέτρων και αναλύουν διαφορετικά σενάρια για την εξέλιξη των κλιματικών ζητημάτων βάση επιλεγμένων αντιπροσωπευτικών τιμών. Η πιο απλή μέθοδος για την εκτίμηση των πιθανών τιμών μίας παραμέτρου είναι η ανάλυση της ευαισθησίας. Γενικά η υλοποίηση αυτών των προσεγγίσεων γίνεται με την χρήση ενός πλαισίου κοινωνικοοικονομικών σεναρίων, το οποίο περιγράφεται αναλυτικά στις επόμενες παραγράφους. Η στοχαστική προσέγγιση από την άλλη, είναι πιο σύνθετη και εμπειριστατωμένη, αφού υπολογίζει κατανομές πιθανοτήτων για αρκετές αβέβαιες παραμέτρους, συμπεριλαμβανομένων των εισροών και των εκροών του μοντέλου. Λόγω των αυξημένων αναγκών για αναλυτικότερο προσδιορισμό της αβεβαιότητας, ορισμένα μοντέλα που αρχικά ήταν σχεδιασμένα να πραγματοποιούν μόνο ανάλυση σεναρίων, αργότερα τροποποιήθηκαν ώστε να επιτρέψουν και την πιθανοτική ανάλυση (π.χ. το MERGE 2008 και το WITCH 2008). Μία ακόμα προσέγγιση που χρησιμοποιείται για την υποστήριξη της λήψης αποφάσεων υπό αβεβαιότητα αναφέρεται σε ένα σύνολο πιθανοτικών εφαρμογών βελτιστοποίησης, τα οποία ενσωματώνονται στα μοντέλα για να επιτρέψουν τη μελλοντική ανατροφοδότηση βασικών επιστημονικών ή πολιτικών αβεβαιοτήτων.

Η ανάλυση Monte Carlo είναι μία από τις συχνότερα χρησιμοποιημένες στοχαστικές προσεγγίσεις για την εκτίμηση της αβεβαιότητας. Σχεδιάστηκε ως μια πειραματική πιθανοτική μέθοδος για την επίλυση δύσκολων προβλημάτων με την χρήση ηλεκτρονικών υπολογιστών. Χρησιμοποιεί μία διαδικασία προσομοίωσης ενός μεγάλου αριθμού πειραματικών δοκιμών με τυχαία αποτελέσματα. Όταν εφαρμόζεται για την εκτίμηση της αβεβαιότητας πραγματοποιείται μία διαδικασία δειγματοληψίας όπου χρησιμοποιούνται τυχαίοι αριθμοί από το σύνολο τιμών των παραμέτρων που εξετάζονται. Συγκεκριμένα, για την υλοποίηση της στοχαστικής ανάλυσης του μοντέλου επιλέγονται επανειλημμένα τυχαίες κατανομές του αβέβαιου διανύσματος των παραμέτρων και βάση αυτών πραγματοποιούνται ξεχωριστές προσομοιώσεις, η οποίες παράγουν διαφορετικά σύνολα αβέβαιων αποτελεσμάτων. Μετά από ένα μεγάλο αριθμό επαναλήψεων της προσομοίωσης προκύπτει το μέσο αποτέλεσμα των τιμών των παραμέτρων που μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως σύνολο εισροών (υπό αβεβαιότητα) στα μοντέλα IAM. Το πλεονέκτημα αυτής της μεθόδου συνιστάται στο σύνθετο αποτέλεσμα που προκύπτει στα αποτελέσματα των μοντέλων το οποίο παράγεται από τη ταυτόχρονη ανάλυση πολλών αβεβαιοτήτων μαζί.

2.5 Ένα νέο ερευνητικό πλαίσιο για την έρευνα στην

κλιματική αλλαγή

Τα μελλοντικά σενάρια των κοινωνικοοικονομικών και κλιματικών εξελίξεων χρησιμοποιούνται για τη μελέτη της κλιματικής αλλαγής, των συνεπειών που αυτή προκαλεί και των μέτρων που μπορεί να ληφθούν. (Nakicenovic et al., 2000, Moss et al., 2010, Kriegler et al., 2012, van Vuuren et al.). Τα σενάρια αυτά παρέχουν αξιόλογες προβλέψεις της μελλοντικής εξέλιξης του κλίματος σε σχέση με μια σειρά μεταβλητών που αντιπροσωπεύουν, τις κοινωνικοοικονομικές αλλαγές, τις τεχνολογικές αλλαγές, την ενέργεια, την χρήση γης, τις εκπομπές των αερίων του θερμοκηπίου και τους ατμοσφαιρικούς ρύπους. Πιο συγκεκριμένα, αποτελούν βασική πηγή δεδομένων στα κλιματικά μοντέλα όπου χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση των πιθανών κλιματικών επιπτώσεων και των επιλογών μετριασμού και των συναφών δαπανών.

Στα τελευταία χρόνια η ερευνητική κοινότητα επιδίωξε να συντελέσει στην ανάπτυξη μίας βελτιωμένης διαδικασίας εκτίμησης της κλιματικής αλλαγής (Moss et al., 2008). Ένα σημαντικό χαρακτηριστικό αυτής της διαδικασίας ήταν η ικανότητα διερεύνησης μιας ευρύτερης γκάμας διαδρομών κοινωνικοοικονομικής ανάπτυξης για την μείωση των εκπομπών, τις κλιματικές επιπτώσεις και την προσαρμογή. Για το σκοπό αυτό δημιουργήθηκαν οι αντιπροσωπευτικές διαδρομές συγκέντρωσης RCP (van Vuuren et al., 2011), ως ένα αρχικό βήμα προς τη δημιουργία ενός συνόλου υπολογισμών των κλιματικών μοντέλων. Η χρήση υποθέσεων σχετικά με τις πολιτικές για τον μετριασμό και την προσαρμογή στην κλιματική αλλαγή αποτέλεσε συνδυαστικός κρίκος μεταξύ των πιθανών κοινωνικοοικονομικών δεδομένων και των διαφόρων κλιματικών αποτελεσμάτων των σεναρίων. Ως αποτέλεσμα αυτού, τα κοινωνικοοικονομικά σενάρια παρέχουν μία ανάλυση της κλιματικής πολιτικής η οποία βασίζεται στην εκτίμηση των κλιματικών αλλαγών που πραγματοποιούνται σε αυτά.

Η γενική προσέγγιση της ανάπτυξης του νέου βελτιωμένου πλαίσιο σεναρίων παρουσιάζεται στο van Vuuren et al., (2014). Ο κεντρικός πυρήνας αυτής της προσέγγισης είναι η έννοια μιας *μήτρας σεναρίων που συνδυάζει τρία ξεχωριστά σύνολα σεναρίων*. Το πρώτο σύνολο αποτελείται από τις αντιπροσωπευτικές διαδρομές συγκέντρωσης RCP οι οποίες απεικονίζουν τις εκπομπές, τη συγκέντρωση των ρυπογόνων αερίων και τα δεδομένα για την χρήση γης. Το δεύτερο σύνολο περιέχει τις διαδρομές αξιολόγησης πολιτικής SPA, οι οποίες αναπτύσσονται παράλληλα με την εκτέλεση του κλιματικού μοντέλου και αποτυπώνουν τις κοινωνικές και οικονομικές επιπτώσεις που θα προκληθούν λόγω των προβλεπόμενων κλιματικών αλλαγών. Το τρίτο σύνολο αποτελείται από τις διαμοιρασμένες κοινωνικοοικονομικές διαδρομές αναφοράς SSP, οι οποίες απεικονίζουν τον κοινωνικοοικονομικό αντίκτυπο των διαδρομών συγκέντρωσης RCP.

Τα κελιά της μήτρας σεναρίων εμπεριέχουν όλους τους συνδυασμούς διακριτών σεναρίων SSP και κλιματικών αποτελεσμάτων εκπομπών RCP. Τα κελιά που περιλαμβάνουν τις υψηλότερες οριακές τιμές του εύρους εκπομπών, π.χ. για τα δύο RCP που φθάνουν τα 6 και 8.5W/m² μέχρι τα τέλη του αιώνα, μπορούν να συμπληρωθούν αποκλειστικά από σενάρια αναφοράς SSP τα οποία προβάλλουν τις κοινωνικοοικονομικές εξελίξεις και τις εκπομπές, ελλείψει πολιτικής για το κλίμα. Οι κλιματικές πολιτικές που προκύπτουν από τις διαδρομές SPA από την άλλη,

εντάσσονται σταδιακά στα κελιά, και αυξάνονται ανάλογα με την ελάττωση των προβλεπόμενων εκπομπών έως το κατώτερο τμήμα της σειράς RCP. Ιδιαίτερα για τα σενάρια με τις ελάχιστες εκπομπές (RCP 2,6 W/m² και RCP 4,5 W/m²) τα πολιτικά μέτρα των SPA λαμβάνουν την μέγιστη εφαρμογή τους. Επομένως τα σενάρια που δημιουργήθηκαν σε αυτά τα κελιά της μήτρας βασίζονται αναφορικά στα SSP και ταυτόχρονα κάνουν παραδοχές σχετικά με την πολιτική για το κλίμα, συμπεριλαμβανομένων των μέτρων μετριασμού και προσαρμογής. Ο αντίκτυπος αυτών των σεναρίων πολιτικής θα μπορούσε στη συνέχεια να αναλυθεί συγκρίνοντάς τον με τον αντίκτυπο του σεναρίου αναφοράς για ένα δεδομένο SSP, χωρίς κλιματική πολιτική (Van Vuuren et al., 2014).

2.5.1 Τα σενάρια Representative Concentration Pathways (RCP)

Τα σενάρια RCP είναι ένα σύνολο τεσσάρων νέων διαδρομών κλιματολογικής μοντελοποίησης, το οποίο αναπτύχθηκε με σκοπό την θεμελίωση των μελλοντικών βραχυπρόθεσμων και μακροπρόθεσμων σεναρίων μοντελοποίησης. Ο συνδυασμός των τεσσάρων διαδρομών RCP καλύπτει το εύρος των τιμών που υπολογίζονται έως το 2100. Τα RCP είναι ένα προϊόν συνεργασίας πολλών διαφορετικών κλάδων. Βασίζεται σε στοιχεία των ολοκληρωμένων μοντέλων αξιολόγησης, των μοντέλων των κλιματικών μεταβολών, των μοντέλων των επίγειων οικοσυστημάτων και των δεδομένων απογραφής των εκπομπών. Το προϊόν που προκύπτει αποτελεί ένα ολοκληρωμένο σύνολο δεδομένων, με υψηλή χωρική και τομεακή ανάλυση, για την περίοδο μέχρι το 2100. Τα δεδομένα της χρήση γης και των εκπομπών των ατμοσφαιρικών ρύπων και των αερίων του θερμοκηπίου αναφέρονται κυρίως σε *σμίκρυνση χωρικής ανάλυσης πλέγματος 0,5*0,5* (μοίρες γεωγραφικού πλάτους*μοίρες γεωγραφικού μήκους), ενώ για τα δεδομένα του μείγματος των αερίων του θερμοκηπίου συχνά χρησιμοποιείται και μεγαλύτερη ανάλυση.

Η συνολική μέθοδος ανάπτυξης των RCP περιελάμβανε 7 διαδοχικά βήματα. Αρχικά επιλέχθηκαν τέσσερα σενάρια από την βιβλιογραφία. Τα τέσσερα σενάρια αναβαθμίστηκαν έτσι ώστε να συμβαδίζουν με την εξέλιξη των ολοκληρωμένων μοντέλων αξιολόγησης και να χρησιμοποιούν, όπου είναι δυνατόν, το κοινά έτη βάσης των στοιχείων για τις εκπομπές και για την χρήση γης. Ως αποτέλεσμα αυτού, τα δεδομένα χρήσεως γης του RCP είναι εναρμονισμένα (δηλαδή σύμφωνα με ένα

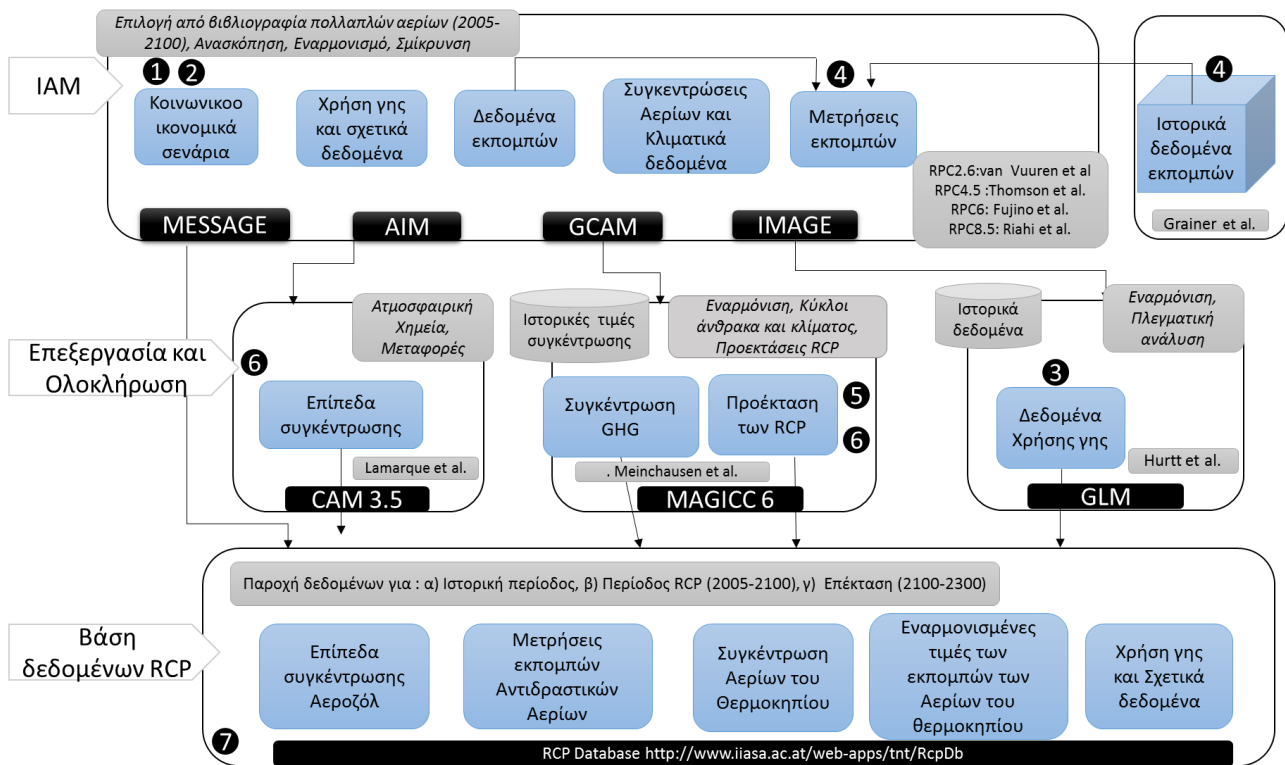
επιλεγμένο σύνολο δεδομένων έτους βάσης) και παρέχονται σε σμίκρυνση πλέγματος χωρικής ανάλυσης $0,5 \times 0,5$ μοίρες (γεωγραφικού πλάτους*μήκους). Το ίδιο ισχύει και για τα δεδομένα των εκπομπών στα RCP που αφορούν τους ατμοσφαιρικούς ρύπους όπως το Αεροζόλ και τις πρόδρομες ουσίες του όζοντος της τροπόσφαιρας. Στη συνέχεια τα δεδομένα των εκπομπών μεταποιήθηκαν σε δεδομένα συγκεντρώσεων με την χρήση ενός απλού κλιματικού μοντέλου του κύκλου του άνθρακα που χρησιμοποιήθηκε για το μείγμα των αερίων του θερμοκηπίου (well-mixed GHG) και ενός ατμοσφαιρικού χημικού μοντέλου που χρησιμοποιήθηκε για τις δραστικές ουσίες μικρής διάρκειας ζωής. Όλα τα παραπάνω δεδομένα αναπτύχθηκαν περαιτέρω ώστε να καλύπτουν την περίοδο 2100-2300 και έτσι να παρέχουν την δυνατότητα επέκτασης των RCP έως το έτος 2300. Όλες οι σχετικές πληροφορίες (database) είναι διαθέσιμες στο ευρύ κοινό μέσω μίας κεντρικής πλατφόρμας, όπου επιτρέπεται στον χρήστη να προβαίνει σε προεπισκόπηση και λήψη δεδομένων σχετικά με τις εκπομπές, τις συγκεντρώσεις, τις εντάσεις ακτινοβολίας και τη χρήση της γης.

Η ονομασία των RCP αντιστοιχεί στο επίπεδο ακτινοβολίας (σε Watt/m^2 – μονάδα SI) για το έτος 2100 στο οποίο στοχεύει κάθε σενάριο. Οι εκτιμήσεις για την ένταση της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας βασίζονται στα ύψη των συγκεντρώσεων των αερίων του θερμοκηπίου και άλλων ουσιών της ατμόσφαιρας. Τα τέσσερα επιλεγμένα RCP που θεωρήθηκαν αντιπροσωπευτικά της βιβλιογραφίας περιλάμβαναν ένα σενάριο μετριασμού (RCP2.6), δύο μεσαία σενάρια σταθεροποίησης (RCP4.5/RCP6) και ένα πολύ υψηλό σενάριο εκπομπής αναφοράς (RCP8.5).

Τα βασικά σύνολα δεδομένων από τα οποία αναπτύχθηκαν τα τελικά τέσσερα RCP προήλθαν από τέσσερα μοντέλα IAM τα οποία υπήρξαν προκάτοχοι των RCP. Το RCP 8.5 αναπτύχθηκε χρησιμοποιώντας το μοντέλο MESSAGE και το Ολοκληρωμένο Πλαίσιο Αξιολόγησης IIASA από το Διεθνές Ινστιτούτο Ανάλυσης Εφαρμοσμένων Συστημάτων στην Αυστρία. Αυτό το RCP χαρακτηρίζεται από την αύξηση των εκπομπών των αερίων του θερμοκηπίου με την πάροδο του χρόνου και είναι αντιπροσωπευτικό των σεναρίων της βιβλιογραφίας που οδηγούν σε υψηλά επίπεδα συγκέντρωσης αερίων του θερμοκηπίου. Το RCP6 αναπτύχθηκε από την ομάδα μοντελοποίησης AIM στο Εθνικό Ινστιτούτο Μελέτης του Περιβάλλοντος (NIES) στην Ιαπωνία. Πρόκειται για ένα σενάριο σταθεροποίησης στο οποίο η ολική εκπεμπόμενη ακτινοβολία σταθεροποιείται λίγο μετά το 2100 με την εφαρμογή μιας

σειράς νέων τεχνολογιών και στρατηγικών για τη μείωση των εκπομπών GHG. Το RCP 4.5 αναπτύχθηκε από την ομάδα μοντελοποίησης της GCAM στο Ερευνητικό Ινστιτούτο Κοινών Ερευνών για την Παγκόσμια Αλλαγή (JGCR) στις Ηνωμένες Πολιτείες. Σε αυτό το σενάριο επιβάλλεται σταθεροποίηση της ολικής ακτινοβολίας στο επίπεδο των 4,5 W/m² έως το 2100 χωρίς υπέρβαση του μακροπρόθεσμα επιδιωκόμενο επίπεδο ακτινοβολίας. Το RCP2.6 αναπτύχθηκε από την ομάδα προσομοίωσης IMAGE της Υπηρεσίας Περιβαλλοντικής Αξιολόγησης PBL της Ολλανδίας. Αυτό το επίπεδο εκτίμησης των εκπομπών είναι αντιπροσωπευτικό των σεναρίων της βιβλιογραφίας που οδηγούν σε πολύ χαμηλά επίπεδα συγκέντρωσης GHG. Πρόκειται για ένα σενάριο «αρχικής αιχμής και μελλοντικής μείωσης» αφού το επίπεδο των εκπεμπόμενων ακτινοβόλων του φθάνει αρχικά σε τιμή 3,1 W/m² έως τα μέσα του αιώνα και στη συνέχεια πέφτει σε 2,6 W/m² έως το 2100, προκειμένου να επιτευχθεί ο ζητούμενος στόχος.

Στην Εικόνα 4 παρουσιάζεται η διαδικασία ανάπτυξης των RCP. Οι αριθμοί αντιστοιχούν στα 7 βήματα ανάπτυξης που αναφέρθηκαν σε αυτή την ενότητα. Το πρώτο οριζόντιο τμήμα δείχνει την ανάπτυξη του συνόλου δεδομένων των σεναρίων, η οποία πραγματοποιήθηκε με την χρήση των τεσσάρων επιλεγμένων IAM που φαίνονται. Τα τέσσερα μοντέλα χρησιμοποίησαν τα διαθέσιμα δεδομένα για τις εκπομπές, την συγκέντρωση και την χρήση γης και πραγματοποίησαν προσομοίωση των τεσσάρων αντιπροσωπευτικών σεναρίων που επιλέχθηκαν από την βιβλιογραφία. Το δεύτερο οριζόντιο τμήμα δείχνει το στάδιο της επεξεργασίας και της ολοκλήρωσης, όπου τα αποτελέσματα των IAM χρησιμοποιούνται ως εισροές στα μοντέλα επεξεργασίας των αντίστοιχων κλιματικών δεδομένων MAGICC 6 (Model for the Assessment of Greenhouse Gas Induced Climate Change), CAM 3.5 (Community Atmosphere Model) και των δεδομένων χρήσης γης GLM (Global Land-use Model). Το τρίτο τμήμα δείχνει την διαθέσιμη βάση δεδομένων των σεναρίων.



Εικόνα 4 Η διαδικασία ανάπτυξης των RCP (Van Vuuren et al., 2011)

2.5.2 Τα σενάρια Shared Socioeconomic Pathways (SSP)

Για την κάλυψη των προδιαγραφών της δεύτερης φάσης της ανάπτυξης των ολοκληρωμένων κλιματικών σεναρίων δημιουργήθηκε το κοινωνικοοικονομικό σύνολο σεναρίων SSP. Πρόκειται για εναλλακτικές διαδρομές κοινωνικοοικονομικής ανάπτυξης που περιγράφουν αξιόπιστες πιθανές τάσεις στην εξέλιξη της κοινωνίας και των οικοσυστημάτων κατά τον 21ο αιώνα, σε παγκόσμιο και περιφερειακό επίπεδο. Αποτελούνται από δύο στοιχεία: μια αφηγηματική ιστορία και μια σειρά από ποσοτικά μέτρα ανάπτυξης. Τα SSP είναι ένα σύνολο πιθανών διαδρομών «αναφοράς», δεδομένου ότι δεν υποθέτουν κλιματικές αλλαγές, επιπτώσεις ή νέες πολιτικές για το κλίμα (Kriegler et al., 2012). Δεν είναι αυτόνομα κλιματικά σενάρια από μόνα τους, αλλά αποτελούν ένα βήμα προς την παραγωγή των ολοκληρωμένων σεναρίων που θα περιλαμβάνουν πράγματι κοινωνικοοικονομικές και περιβαλλοντικές συνθήκες που επηρεάζονται τόσο από την κλιματική αλλαγή, όσο και από την κλιματική πολιτική.

Τα βασικά χαρακτηριστικά τα οποία αποτελούν τα SSP είναι επιλεγμένα έτσι ώστε να εξυπηρετούν όσο το δυνατόν περισσότερο τις ανάγκες του συνολικού ολοκληρωμένου σεναρίου.

1. Επικέντρωση στην περιγραφή των κοινωνικοοικονομικών και περιβαλλοντικών τάσεων σε παγκόσμιο και περιφερειακό επίπεδο.
2. Ποιοτικό και ποσοτικό περιεχόμενο ικανό να διαχωρίσει τα διάφορα μονοπάτια SSP μεταξύ τους, ειδικά όσον αφορά το μέγεθος των μέτρων μετριασμού και προσαρμογής που υπολογίζεται ότι πρέπει να ληφθούν.
3. Ενσωμάτωση των πληροφοριών που χρησιμοποιούνται συνήθως ως εισροές στα ολοκληρωμένα μοντέλα αξιολόγησης. Τέτοιες πληροφορίες μπορεί να αφορούν το παγκόσμιο σύστημα χρήσεως της γης, την οικονομία, την ενέργεια ή τα αποτελέσματα των παγκόσμιων κλιματικών μοντέλων για διάφορους τομείς. Αυτές οι πληροφορίες περιλαμβάνουν υποθέσεις σχετικά με τα μελλοντικά δημογραφικά στοιχεία και την μελλοντική οικονομική ανάπτυξη.
4. Τα SSP υπολογίζουν την κοινωνικοοικονομική ανάπτυξη του κόσμου χωρίς να λαμβάνουν υπόψιν τους την πιθανή μελλοντική κλιματική πολιτική και τις πιθανές κλιματικές αλλαγές.
5. Περιέχουν επαρκείς πληροφορίες για την υποστήριξη και την επεξεργασία της επέκτασης των παγκόσμιων παραδοχών για τοπικά και περιφερειακά σενάρια.

Ένα από τα σημαντικότερα ζητήματα στα οποία επικεντρώνεται το σύνολο SSP είναι ο ακριβής προσδιορισμός της αβεβαιότητας που αφορά τον μετριασμό, την προσαρμογή και τις επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής. Για να προσδιοριστεί ο βαθμός της αβεβαιότητας σχετικά με την επίτευξη των στόχων μετριασμού και προσαρμογής που θέτουν τα σενάρια χρησιμοποιούνται εκτιμήσεις και περιγραφές των μελλοντικών κοινωνικοοικονομικών συνθηκών που θα μπορούσαν να επηρεάσουν θετικά ή αρνητικά τις μελλοντικές κλιματικές εξελίξεις. Αυτές οι κοινωνικοοικονομικές συνθήκες περιγράφουν ένα ευρύ φάσμα πτυχών της κοινωνίας και αντικατοπτρίζουν την επιρροή της ανθρώπινης δραστηριότητας στο περιβάλλον. Το φάσμα περιέχει δημογραφικές, πολιτικές, κοινωνικές, πολιτιστικές, θεσμικές, οικονομικές και τεχνολογικές πτυχές της κοινωνίας και μέσω αυτού αναδεικνύεται η ανθρώπινη δραστηριότητα και η επιρροή της στις συνθήκες και τις διεργασίες των

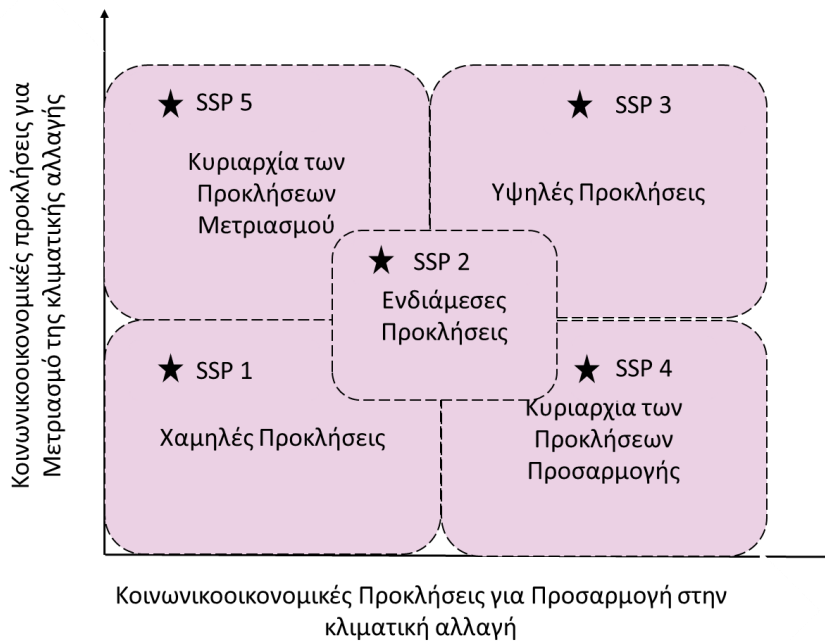
οικοσυστημάτων (η ποιότητα του αέρα και των υδάτων, η βιοποικιλότητα και η λειτουργικότητα των οικοσυστημάτων).

Προκειμένου να διασφαλιστεί ότι το σύνολο των SSP που αναπτύσσονται καλύπτει ολόκληρο το εύρος των πιθανών τιμών της σειράς αποτελεσμάτων που παράγεται, ορίζεται ένας χώρος αποτελεσμάτων ο οποίος μεταβάλλεται ανάλογα με τις πιθανές κοινωνικοοικονομικές και περιβαλλοντικές προκλήσεις που υποθέτει το μοντέλο. Οι προκλήσεις αυτές συνιστούν τις προκλήσεις προσαρμογής και τις προκλήσεις μετριασμού που συναντώνται κατά την προσπάθεια σχεδιασμού και υλοποίησης των κλιματικών πολιτικών και θεωρούνται καθοριστικοί παράγοντες για τον προσδιορισμό της αβεβαιότητας των αποτελεσμάτων (Σχήμα. 5). Για το λόγο αυτό οι διάφορες υποπεριοχές του χώρου αποτελεσμάτων καθορίζονται βάση των προκλήσεων προσαρμογής και μετριασμού.

Οι προκλήσεις μετριασμού που προσδιορίζουν τις διαδρομές SSP καθορίζονται από κοινωνικοοικονομικούς παράγοντες που διευκολύνουν ή δυσχεραίνουν το έργο μετριασμού για οποιαδήποτε δεδομένη πολιτική και δεδομένο στόχο μετριασμού. Η επιλογή των στόχων μετριασμού και των πολιτικών μέτρων για την επίτευξη τους καθορίζεται από τα πλαίσια των RCP και SPA αντίστοιχα και δεν πραγματοποιείται από τα SSP. Οι κοινωνικοοικονομικές προκλήσεις για τον μετριασμό μπορεί να είναι είτε οι παράγοντες που τείνουν να οδηγήσουν σε υψηλότερες εκπομπές αναφοράς λόγω έλλειψης πολιτικών μέτρων, είτε οι παράγοντες που τείνουν να μειώσουν την εγγενή ικανότητα μετριασμού μιας κοινωνίας. Οι υψηλότερες εκπομπές αναφοράς θα μπορούσαν να δημιουργηθούν λόγω του υψηλού ρυθμού αύξησης του πληθυσμού, της ταχείας οικονομικής ανάπτυξης, της εκτεταμένης χρήσης της γης, των οικονομικών συστημάτων υψηλής κατανάλωσης ενέργειας και της παραγωγής ενέργειας από άνθρακα. Από την άλλη, τα SSP λαμβάνουν υπόψιν τους ότι η μείωση της επιρροής αυτών των παραγόντων θα μπορούσε να επιτευχθεί με τεχνολογικές και κοινωνικές αλλαγές που περιλαμβάνουν την αυτόνομη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης και την αντικατάσταση των ορυκτών καυσίμων με πιο φιλικά προς το περιβάλλον καύσιμα. Έτσι τα SSP περιλαμβάνουν διάφορες παραδοχές σχετικά με τους συνδυασμούς των παραγόντων που οδηγούν στα διάφορα επίπεδα εκπομπών αναφοράς.

Οι κοινωνικοοικονομικές προκλήσεις προσαρμογής ορίζονται ως οι κοινωνικές ή οι περιβαλλοντικές συνθήκες που δυσχεραίνουν το έργο της προσαρμογής και αυξάνουν τους κινδύνους που συνδέονται με τις μελλοντικές κλιματικές αλλαγές. Οι κίνδυνοι αυτοί προκύπτουν από τον συνδυασμό των φυσικών επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής που προκαλούνται από τις ανθρώπινες δραστηριότητες (π.χ. η άνοδος της στάθμης της θάλασσας, οι μεταβολές της θερμοκρασίας και των βροχοπτώσεων και τα ακραία καιρικά φαινόμενα). Η συνιστώσα του κινδύνου λόγω των φυσικών επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής αντικατοπτρίζεται στις προβλέψεις των κλιματικών μοντέλων που βασίζονται στα RCP και ως εκ τούτου δεν πρέπει να περιλαμβάνονται στα SSP. Οι υπόλοιπες συνιστώσες του κινδύνου που είναι συνυφασμένες με την αλληλεπίδραση της ανθρώπινης δραστηριότητας και του περιβάλλοντος που ενδέχεται να αυξάνουν τους κινδύνους και να δυσχεραίνουν την προσαρμογή περιλαμβάνονται κατάλληλα στα SSP. Οι προκλήσεις της προσαρμογής υπολογίζονται ως συνάρτηση των κοινωνικοοικονομικών παραγόντων αύξησης των κινδύνων, της ευαισθησίας στους κινδύνους αυτούς και της προσαρμοστικής ικανότητας ανάπτυξης μέτρων αντιμετώπισης. Επίσης περιλαμβάνουν τα όρια της εξατομικευμένης προσαρμογής (π.χ. το εύρος των προσαρμοστικών μέτρων που είναι εύκολα προσβάσιμα σε άτομα και οργανισμούς) και τα εμπόδια και τους περιορισμούς στις πολιτικές προσαρμογής (π.χ. οι αναποτελεσματικοί θεσμοί και διακυβέρνηση που εμποδίζουν την εφαρμογή της πολιτικής).

Στην εικόνα 5 φαίνεται ο «χώρος των προκλήσεων» που πρέπει να καλύπτεται από τα SSP. Χωρίζεται σε πέντε τομείς και σε κάθε έναν από αυτούς αντιστοιχεί ένα σύνολο σεναρίων SSP το οποίο απεικονίζεται με ένα αστέρι. Οι τομείς του χώρου αποτελεσμάτων καθορίζονται βάση των προκλήσεων προσαρμογής και μετριασμού.



Εικόνα 5 Διάγραμμα του «Χώρου Προκλήσεων» των SSP (Kriegler et al., 2012)

Η ικανότητα μιας κοινωνίας να εκμεταλλεύεται τις ευκαιρίες και να προσαρμόζεται στις κλιματικές αλλαγές, προκειμένου να περιορίσει τις επιπτώσεις τους, συνιστά την *προσαρμοστική ικανότητα*. Οι καθοριστικοί παράγοντες που επηρεάζουν την ικανότητα αυτή είναι η διαθεσιμότητα βιώσιμων τεχνολογιών προσαρμογής, η αποτελεσματικότητα της προσφοράς των υπεύθυνων φορέων (όπως η γεωργική έρευνα και ανάπτυξη, οι αγορές αγαθών που επηρεάζονται από την αλλαγή του κλίματος, οι οργανώσεις διαχείρισης των δασών κλπ.) και η διαθεσιμότητα των ανθρώπινων και οικονομικών πόρων (Yohe και Tol 2002, Hallegatte et al., 2011).

2.5.3 Τα σενάρια Shared Climate Policy Assumptions (SPA)

Το τρίτο πλαίσιο της ανάπτυξης σεναρίων, όπως υπέδειξε η κοινότητα IPCC το 2007, αφορά την δημιουργία ενός νέου πλαισίου *μελλοντικών κοινωνικοοικονομικών σεναρίων*, το οποίο χρησιμοποιείται για να μελετηθεί το πεδίο της επιρροής της κλιματικής αλλαγής και τις κοινωνικές και οικονομικές επιπτώσεις που προκαλούνται εξαιτίας της (Nakicenovic et al., 2000, Moss et al., 2010, Kriegler et al., 2012, van Vuuren et al.). Αυτό το πλαίσιο σεναρίων αποτελείται από πολλές διαδρομές η οποίες αντιπροσωπεύονται από πολλαπλούς υπολογισμούς πολλών πιθανών εξελίξεων των σεναρίων, αλλάζοντας κάθε φορά τι τιμές των διαφορετικών παραμέτρων του σεναρίου. Για να επιτευχθεί ο συνδυασμός των πολλαπλών κοινωνικοοικονομικών μονοπατιών με τα παράγωγα των κλιματικών μοντέλων χρησιμοποιούνται

αντιπροσωπευτικές συγκεντρωτικές διαδρομές ανά κατηγορία. Ο σχεδιασμός αυτός συμβάλλει στη βελτιστοποίηση της εκτίμησης των επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής, τού κόστους προσαρμογής και του κόστους μετριασμού της κλιματικής αλλαγής. Ένας σημαντικός παράγοντας σε αυτά τα μοντέλα είναι οι υποθέσεις που πραγματοποιούν σχετικά με τις μελλοντικές πολιτικές για το κλίμα. Οι κοινές παραδοχές της πολιτικής για το κλίμα καταγράφουν βασικά χαρακτηριστικά πολιτικής όπως είναι οι στόχοι, τα μέσα και τα εμπόδια των μέτρων μετριασμού και προσαρμογής και εισάγουν μια σημαντική πρόσθετη διάσταση στην αρχιτεκτονική των σεναρίων.

Όσο αφορά την κλιματική πολιτική τα SPA πρέπει να περιέχουν τα παρακάτω τρία βασικά στοιχεία (Kriegler et al., 2012). Το πρώτο στοιχείο αφορά τον προσδιορισμό των *στόχων της κλιματικής πολιτικής* σε παγκόσμιο επίπεδο. Για παράδειγμα οι στόχοι αυτοί μπορεί να είναι οι στόχοι για την ποσοστιαία μείωση των εκπομπών ή τα διαφορετικά επίπεδα φιλοδοξίας περιορισμού των κλιματικών ζημιών, όπως είναι το επίπεδο προστασίας των αναπτυξιακών δεικτών. Εντούτοις, υπάρχει σαφής αλληλοεπικάλυψη και διασύνδεση μεταξύ των δεσμεύσεων που θέτουν τα RCP και των στόχων της πολιτικής που ακολουθούν τα SPA. Το δεύτερο στοιχείο που πρέπει να περιέχουν τα SPA είναι η περιγραφή των χαρακτηριστικών των *πολιτικών καθεστώτων και των μέτρων πολιτικής* που θα χρησιμοποιηθούν για την επίτευξη των πολιτικών στόχων. Τα πολιτικά μέσα τα οποία χρησιμοποιούνται για την επιβολή των μέτρων μετριασμού ποικίλουν και μπορεί να αποτελούνται από αποθαρρυντικά μέτρα (όπως η τιμολόγηση των εκπομπών), από ενθαρρυντικά μέτρα (όπως οι επιδοτήσεις των τεχνολογιών χαμηλών εκπομπών CO₂) ή από έναν συνδυασμό διαφορετικών προσεγγίσεων σε διάφορους τομείς (όπως οι πολιτικές για τις μεταφορές και τα σχέδια για την προστασία των τροπικών δασών). Έτσι για παράδειγμα, τα μέτρα μετριασμού που σχετίζονται με την επιβολή της φορολογίας στις εκπομπές του άνθρακα και με το διεθνές σύστημα εμπορίας δικαιωμάτων εκπομπών θα μπορούσαν να εναρμονιστούν είτε παγκοσμίως με μία ενιαία φορολογία, είτε περιφερειακά με ένα συγκεκριμένο μηχανισμό επιμερισμού βαρών. Το τρίτο στοιχείο που πρέπει να περιλαμβάνουν τα SPA είναι τα *όρια εφαρμογής των πολιτικών μέτρων και τα εμπόδια που μπορεί να συναντηθούν κατά την εφαρμογή τους*. Τα εμπόδια στα οποία αναφέρεται το SPA προέρχονται από τον προσδιορισμό ορισμένων στόχων που φαίνονται να μην είναι επιτεύξιμοι και συνεπάγονται τον αποκλεισμό ορισμένων πολιτικών επιλογών για ορισμένες περιφέρειες και τομείς. Τέτοιες συνθήκες θα μπορούσαν να εξελίσσονται με

την πάροδο του χρόνου έτσι ώστε τα αρχικά όρια να μικρύνουν ή να αυξηθούν. Παραδείγματος χάριν, μπορεί να εξαιρεθούν από την τιμολόγηση του άνθρακα αρκετές εκτάσεις γης λόγω πρακτικών περιορισμών στην εφαρμογή μιας τέτοιας τιμολόγησης ή μια ομάδα περιφερειών να παραμένει εκτός ενός διεθνούς καθεστώτος πολιτικής για μία χρονική περίοδο. Ομοίως, η αποτελεσματικότητα της προσαρμογής μπορεί να διαφέρει σε ένα μοντέλο όπου η πολιτική οικονομία ή οι περιορισμοί επιβολής της εφαρμογής ορισμένων πολιτικών την καθιστούν αδύνατη (π.χ. οι κανονισμοί της χρήσης γης που αποσκοπούν στη μείωση των απωλειών από καταστροφές είναι δύσκολο να εφαρμοστούν σε περιοχές χωρίς επίσημη κατοχή γης και με ανεπίσημους οικισμούς).

Οι πληροφορίες που περιέχουν τα SPA είναι ποιοτικές και ποσοτικές. Η διαδικασία προσδιορισμού των πολιτικών προσαρμογής χρησιμοποιεί ποιοτικές πληροφορίες για τις θεσμικές πολιτικές που εφαρμόζονται (π.χ. η εφαρμογή μιας συμφωνίας μεταφοράς τεχνολογίας σε διεθνή κλίμακα), για την ποιότητα των διαδικασιών εκποίησης της προσαρμογής (π.χ. διαφθορά, σύλληψη από ομάδες συμφερόντων) και για την αποτελεσματικότητα των μέτρων προσαρμογής που εφαρμόζονται (π.χ. επιβολή κανόνων οικοδόμησης και κανονισμοί χρήσης γης). Από την άλλη, το κεντρικό μέρος των ποσοτικών πληροφοριών των SPA αποτελείται από τον μακροπρόθεσμο στόχο μετριασμού που καθορίζεται από τη μακροπρόθεσμη δέσμευση ενός RCP. Τα RCP αποτελούν καθοριστικό παράγοντα για τους συνολικούς περιγραφικούς δείκτες της προσπάθειας μετριασμού, ακόμα και όταν δεν έχει τεθεί συγκεκριμένος στόχος. Για παράδειγμα, η επιλογή ενός συνδυασμού RCP-SSP καθορίζει το επίπεδο της παγκόσμιας φορολογίας του άνθρακα, χωρίς να έχει τεθεί κάποιος στόχος μετριασμού. Τέλος, οι ποσοτικές παραδοχές για την πολιτική προσαρμογής μπορούν να περιλαμβάνουν στόχους προσαρμογής (η προστασία κατά των γεγονότων από τις πλημμύρες ή την ξηρασία), τα χρονοδιαγράμματα για την εφαρμογή των περιφερειακών σχεδίων προσαρμογής και το μέγεθος ενός διεθνούς ταμείου προσαρμογής που έχει συσταθεί για να βοηθήσει τις χώρες που επηρεάζονται περισσότερο από την κλιματική αλλαγή.

3

Συνοπτική παρουσίαση των μοντέλων

3.1 Ταξινόμηση των μοντέλων κλίματος-οικονομίας

Σε αυτή τη ενότητα παρουσιάζεται μια κατηγοριοποίηση των μοντέλων που εξετάζονται στην παρούσα εργασία. Γενικά στη βιβλιογραφία υπάρχει ένας μεγάλος αριθμός διαφορετικών ταξινομήσεων, οι οποίες δεν είναι πλήρως εναρμονισμένες μεταξύ τους, όπως δεν είναι εναρμονισμένη και η ταξινόμηση που παρουσιάζεται σε αυτό το κεφάλαιο. Ένα παράδειγμα τέτοιων διαφοροποιήσεων παρουσιάζεται στα κριτήρια ταξινόμησης που χρησιμοποιούνται στις μελέτες των Füssel et al., 2010, Stanton et al., 2009, Ortiz και Markandya et al., 2009 και Söderholm et al., 2007. Συγκεκριμένα, ο Füssel ακολουθώντας μια παλαιότερη παράδοση τα διαχωρίζει ανάλογα με το είδος των αναλυτικών πλαισίων λήψης αποφάσεων όπου εφαρμόζονται τα μοντέλα, ο Stanton τα διαφοροποιεί ανάλογα με τις διαφορετικές δομές τους και οι Ortiz και Markandya ταξινομούν τα ολοκληρωμένα μοντέλα αξιολόγησης ανάλογα με το εάν χρησιμοποιούνται και οι τέσσερις γνωστές ενότητες (κλίμα, επιπτώσεις, οικονομία, ενέργεια) και ανάλογα με το πώς συνδυάζονται αυτές στην δομή του μοντέλου.

Η κατηγοριοποίηση που παρουσιάζεται εδώ έχει συνταχθεί με βάση τις παραπάνω ταξινομήσεις και με την χρήση μιας αναλυτικής βιβλιογραφικής ανασκόπησης των εφαρμογών των μοντέλων. Συγκεκριμένα παρουσιάζονται έξι γενικές δομές μοντελοποίησης ή προσεγγίσεις. Οι κατηγορίες αυτές διακρίνονται κυρίως ανάλογα με τον τρόπο με τον οποίο διαμορφώνεται η οικονομία μέσα στην δομή των μοντέλων και κατά δεύτερον, ανάλογα με τον τρόπο ενσωμάτωσης των υπόλοιπων ενοτήτων (κλίματος, επιπτώσεις και ενέργειας). Φυσικά η ανεξάρτητη φύση αυτών των μοντέλων εμποδίζει ελαφρώς τη συνεπή ταξινόμησή τους, διότι είναι δεδομένο ότι ορισμένα IAM μπορεί αναπόφευκτα να ταξινομηθούν σε περισσότερες από μία κατηγορίες. Παρακάτω παρουσιάζονται συνοπτικά οι 5 κατηγορίες.

1. **Μοντέλα βέλτιστης ανάπτυξης ή βελτιστοποίησης της ευημερίας.** Σε αυτή τη κατηγορία τα IAM αναπαριστούν τους τομείς της οικονομίας με έναν ενιαίο τομέα ο οποίος καλύπτει την παρουσία και τις δραστηριότητες όλων των τομέων συγχρόνως. Τα μοντέλα αυτά έχουν σχεδιαστεί για να καθοδηγούν τις κλιματικές πολιτικές αποφάσεις και να καθορίζουν τα επίπεδα των επενδύσεων που μεγιστοποιούν την ευημερία (αυξάνοντας την μελλοντική κατανάλωση έναντι της τρέχουσας κατανάλωσης). Ο υπολογισμός των τιμών γίνεται σταδιακά για συγκεκριμένες μελλοντικές χρονικές περιόδους, προσδιορίζοντας συγχρόνως και τα επίπεδα μείωσης των εκπομπών για κάθε χρονικό βήμα. Η δομή και οι διαδικασίες τους τείνουν να είναι αρκετά απλές, καθιστώντας τα μοντέλα πολύ συγκεντρωτικά και διαφανή. Για αυτό το λόγο, αποτυπώνουν την τροχιά της οικονομίας και την αλληλεπίδρασή της με το κλίμα, με έναν πλήρως ολοκληρωμένο τρόπο, όπου όλες οι ενότητες αντιπροσωπεύονται και προσδιορίζονται ενδογενώς.
2. **Τα μοντέλα γενικής ισορροπίας (Computable General Equilibrium – CGE),** διαθέτουν πιο λεπτομερή αναπαράσταση της οικονομίας με πολλούς διαφορετικούς τομείς και συχνά περιλαμβάνουν και μία λεπτομερή ανάλυση των ενεργειακών τεχνολογιών και ΣΗΕ, για κάθε περιφέρεια ξεχωριστά. Σε αντίθεση με τα μοντέλα βέλτιστης ανάπτυξης δεν αναζητούν βέλτιστες πολιτικές, αλλά εξετάζουν τις επιπτώσεις που έχουν οι εφαρμογές συγκεκριμένων πολιτικών στις παραμέτρους της οικονομίας, της κοινωνίας και του περιβάλλοντος. Το μειονέκτημα της λεπτομερέστερης αναπαράστασης της οικονομίας συνιστάται στην εμφάνιση υψηλής πολυπλοκότητας στη δομή των μοντέλων και κατ' επέκταση σημαντικής δυσκολίας στην ανάπτυξη τους.
3. **Τα μοντέλα μερικής ισορροπίας** επικεντρώνουν την προσοχή τους σε έναν συγκεκριμένο τομέα της οικονομίας και παρέχουν μια λεπτομερή ανάλυση της αλληλεπίδρασης του με το περιβάλλον και τις οικονομικές επιπτώσεις που υφίσταται. Οι προσεγγίσεις αυτές χρησιμοποιούνται συνήθως για την αξιολόγηση των πιθανών ζημιών που προκαλούνται από το κλίμα σε έναν συγκεκριμένο τομέα της οικονομίας. Τα συγκεκριμένα μοντέλα δεν είναι σε θέση να αξιολογήσουν τις συνολικές αλληλεπιδράσεις μεταξύ των τομέων της οικονομίας, αλλά χρησιμοποιούνται ως εργαλείο για την λεπτομερή ανάλυση

ενός τομέα σε συνδυασμό με μοντέλα από άλλες κατηγορίες. Για να μπορέσουν να πραγματοποιήσουν πιο ολοκληρωμένη αναπαράσταση της οικονομίας συχνά εισάγουν δεδομένα από υπολογιστικά μοντέλα γενικής ισορροπίας.

3.1 **Τα μοντέλα Ενεργειακών Συστημάτων** μπορεί να θεωρηθούν ως υποκατηγορία των μοντέλων μερικής ισορροπίας τα οποία παρέχουν λεπτομερή περιγραφή του ενεργειακού τομέα, παρέχοντας πληθώρα ενεργειακών τεχνολογιών και των συναφών δαπανών τους. Οι προσεγγίσεις αυτές χρησιμοποιούνται μεταξύ άλλων, για τον προσδιορισμό των λιγότερο δαπανηρών τρόπων επίτευξης της μείωσης των εκπομπών των αερίων του θερμοκηπίου ή του κόστους των εναλλακτικών πολιτικών για το κλίμα. Συνδέονται συχνά με τα ολοκληρωμένα μοντέλα γενικής ισορροπίας ή με τα μακροοικονομικά μοντέλα, προκειμένου να πετύχουν το επιθυμητό επίπεδο γνώσης στις προσεγγίσεις από τη βάση προς την κορυφή (bottom-up).

4. **Τα μακροοικονομικά μοντέλα**, όπως και τα υπολογιστικά μοντέλα γενικής ισορροπίας, μπορούν να είναι αρκετά λεπτομερείς όσον αφορά τις ενεργειακές τεχνολογίες και το γεωγραφικό πεδίο εφαρμογής τους και χρησιμοποιούνται εξίσου για την αξιολόγηση εναλλακτικών πολιτικών για το κλίμα. Η διαφοροποίησή τους ωστόσο, συνιστάται στο γεγονός ότι δεν υποθέτουν την άριστη συμπεριφορά των καταναλωτών και των παραγωγών ή την σαφή επίτευξη βραχυπρόθεσμης ισορροπίας στις αγορές, όπως συμβαίνει στα CGE μοντέλα. Αντί αυτού, χρησιμοποιούν τα ιστορικά δεδομένα και τις οικονομικές εκτιμήσεις των παραμέτρων που εξετάζουν και τις σχέσεις που αναπτύσσονται μεταξύ τους, έτσι ώστε να έχουν την δυνατότητα να προσομοιώνουν δυναμικά και πιο ρεαλιστικά τη συμπεριφορά της οικονομίας.
5. **Άλλα μοντέλα:** η τελευταία κατηγορία αναφέρεται σε ολοκληρωμένα μοντέλα αξιολόγησης τα οποία δεν μπορούν να ενταχθούν σε κάποια από τις προηγούμενες κατηγορίες ή να σχηματίσουν μία ξεχωριστή κατηγορία μεταξύ τους, διότι δεν έχουν κοινά χαρακτηριστικά υπό το πρίσμα ταξινόμησης της παρούσας εργασίας. Αν και είναι διαφορετικά μεταξύ τους, είναι περισσότερο

προσανατολισμένα προς την υποστήριξη πολιτικών αποφάσεων από τα μοντέλα των άλλων πέντε κατηγοριών και τείνουν να μοντελοποιούν την οικονομία σε αρκετά μειωμένη μορφή ή απλά να χρησιμοποιούν σενάρια εξωγενούς ανάπτυξης (χωρίς καμία μοντελοποίηση της οικονομίας).

Ο Πίνακας 1 παρέχει μία γενική εικόνα των χαρακτηριστικών των διαφορετικών προσεγγίσεων μοντελοποίησης. Η πρώτη στήλη επισημαίνει την γενική κατηγορία στην οποία εντάσσονται οι προσεγγίσεις, ενώ οι υπόλοιπες στήλες περιγράφουν τον τρόπο με τον οποίο μοντελοποιούνται οι τέσσερις διαφορετικές ενότητες σε κάθε προσέγγιση. Ο πίνακας λειτουργεί ως σημείο αναφοράς της γενικότερης κατηγοριοποίησης και οργάνωσης της εργασίας και ευθυγραμμίζεται με τις περιγραφές των έξι κατηγοριών προσέγγισης που παρουσιάζονται στο υπόλοιπο της εργασίας.

Πίνακας 1. Παρουσίαση της κατηγοριοποίησης των μοντέλων που εξετάζονται στην παρούσα εργασία.

Κατηγορία	Οικονομική Πτυχή	Επιπτώσεις	Ενέργεια	Κλίμα
Μοντέλα Βέλτιστης Ανάπτυξης	Νεοκλασική ανάπτυξη. Υψηλά συγκεντρωτική ανάλυση. Μακροχρόνια οικονομική ανάλυση (δυναμική). Ενιαία συνάρτηση παραγωγής. Βελτιστοποίηση πολιτικής. Παγκόσμια οικονομική αναπαράσταση. Ενιαία αντιπροσώπευση όλων των οικονομικών μονάδων από μία μεταβλητή.	Συγκεντρωτικός υπολογισμός των νομισματικών ζημιών μέσω μίας συνάρτησης που υπολογίζει τις απώλειες του ΑΕΠ βάσει της μεταβολής της Παγκόσμιας Θερμοκρασίας.	Συγκεντρωτικός Ενεργειακός Τομέας (δομή top-down)	Χρήση εξισώσεων απλής μορφής, που υπολογίζουν την αύξηση της θερμοκρασίας ανάλογα με τις εκπομπές.

Κατηγορία	Οικονομική Πτυχή	Επιπτώσεις	Ενέργεια	Κλίμα
Μοντέλα Γενικής Ισοροπίας	Πολύ-τομεακά μοντέλα με πολλαπλές συναρτήσεις παραγωγής. Ενιαία αντιπροσώπευση όλων των οικονομικών μονάδων από μία μεταβλητή. Θεωρούν ότι οι παραγωγοί και οι καταναλωτές έχουν βέλτιστη συμπεριφορά. Η οικονομία αντιπροσωπεύεται σε παγκόσμιο, περιφερειακό, εθνικό και τοπικό επίπεδο. Είναι πιο δύσκολο να ενσωματωθούν νέες δυναμικές σχέσεις μεταξύ των παραγόντων της οικονομίας.	Εισαγωγή ακραίων τιμών "σοκ" στις συναρτήσεις παραγωγής (π.χ. μείωση της απόδοσης των καλλιεργειών που αντανακλάται στη γεωργική παραγωγή). Οι ακραίες τιμές μπορεί να βασίζονται στην κρίση εμπειρογνομόνων ή να προέρχονται από βιοφυσικά ή στατιστικά μοντέλα επιπτώσεων.	Συχνά περιέχουν αναλυτική περιγραφή του ενεργειακού συστήματος (προσομοίωση πολλών ενεργειακών τεχνολογιών). Συχνά συνδέονται με μοντέλα ενεργειακών συστημάτων (bottom-up).	Τα σενάρια του κλίματος είναι εξωγενή και χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο των κλιματικών μεταβλητών και των επιπτώσεων
Μοντέλα Μερικής Ισοροπίας	Λεπτομερής μοντελοποίηση ενός μόνο τομέα, π.χ. η γεωργία. Στατικές δυναμικές σχέσεις μεταξύ των παραγόντων της οικονομίας. Συχνά συνδυάζεται με άλλα top-down μοντέλα.	(α) Λεπτομερές βιοφυσικό μοντέλο επιπτώσεων σε συγκεκριμένο τομέα. (β) Στατιστική ανάλυση που οδηγεί άμεσα στον υπολογισμό της νομισματικής αξίας των επιπτώσεων	Ελλιπή η ανύπαρκτη αναπαράσταση του ενεργειακού τομέα.	Χρήση εξωγενών σεναρίων για την εκτίμηση των επιπτώσεων.
Μακροοικονομικά μοντέλα	Οικονομετρικά πολύ-τομεακά μοντέλα. Μακροοικονομικά στοιχεία. Προσομοίωση των οικονομικών μονάδων χωρίς υποθέσεις για βελτιστοποίηση της συμπεριφοράς. Keynesian οικονομική θεωρία. Δυναμική εκπροσώπηση των σχέσεων των οικονομικών παραγόντων.	Χρησιμοποιούνται κυρίως για την αξιολόγηση των πολιτικών προσαρμογής και σε μικρό βαθμό για την εκτίμηση των κλιματικών επιπτώσεων που προκύπτουν.	Λεπτομερείς περιγραφή του ενεργειακού συστήματος.	Χρήση εξωγενών σεναρίων για την εκτίμηση των επιπτώσεων.

Κατηγορία	Οικονομική Πτυχή	Επιπτώσεις	Ενέργεια	Κλίμα
Μοντέλα Ενεργειακών Συστημάτων	Μπορεί να θεωρηθούν ως υποκατηγορία των μοντέλων μερικής ισορροπίας με μερικές εξαιρέσεις η οποίες περιλαμβάνουν και μακροοικονομικά στοιχεία. Συχνά μετατρέπονται σε υβριδικά μοντέλα με την ενσωμάτωση top-down μοντέλων.	Χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό του κόστους μείωσης των εκπομπών. Δεν υπάρχει ανάγκη εκτίμησης των επιπτώσεων.	Λεπτομερής παρουσίαση εναλλακτικών τεχνολογιών παραγωγής ενέργειας, ευκαιριών μετριασμού των εκπομπών και πολιτικών μέτρων μετριασμού που θα μπορούσαν να ληφθούν.	Επικεντρώνονται στον υπολογισμό των εκπομπών και όχι τόσο στην κλιματική αλλαγή.
Άλλα μοντέλα	Χρήση απλοϊκών αναπαραστάσεων της οικονομίας ή εξωγενών σεναρίων οικονομικής ανάπτυξης.	Ποικιλία λεπτομερών αναπαραστάσεων των επιπτώσεων και των νομισματικών και φυσικών ζημιών.	Διάφορα συγκεντρωτικά ή λεπτομερή μοντέλα ενέργειας.	Εξισώσεις μειωμένης μορφής που συνδέονται με τη θερμοκρασία και άλλες μεταβλητές.

Το σχήμα ταξινόμησης που παρουσιάζεται στον Πίνακα 1 δεν είναι απόλυτα ακριβές και τα μοντέλα συχνά δεν ταιριάζουν απόλυτα σε μία από αυτές τις κατηγορίες προσέγγισης, ενώ παράλληλα πολλά μοντέλα συνδυάζουν στοιχεία διαφορετικών κατηγοριών. Για παράδειγμα, ο Füssel (2010) εισάγει μια ξεχωριστή κατηγορία που ονομάζεται «μοντέλα καθοδήγησης πολιτικής» που εκπροσωπείται από το ICLIPS (Toth, 2005), το οποίο ενσωματώνει τις πρώτες τέσσερις κατηγορίες προσέγγισης σε ένα μοντέλο. Επιπλέον ο συνδυασμός μοντέλων διαφορετικών κατηγοριών με σκοπό την προσθήκη του επιθυμητού επιπέδου λεπτομέρειας δεν είναι ασυνήθιστο στη βιβλιογραφία για την κλιματική πολιτική. Για παράδειγμα τα μοντέλα CGE και τα Μακροοικονομικά μοντέλα συνδυάζονται συχνά με μοντέλα Ενεργειακών Συστημάτων. Η σύνδεση μεταξύ των διαφόρων κατηγοριών IAM είναι μια σημαντική πτυχή της βιβλιογραφίας μοντελοποίησης, δεδομένου ότι ορισμένα μοντέλα επικεντρώνονται σε συγκεκριμένους τομείς χωρίς να λαμβάνουν υπόψιν τους τις αλληλεπιδράσεις στους υπόλοιπους τομείς. Από την άλλη, τα IAM που καταφέρνουν να καλύψουν όλες τις πτυχές του προβλήματος όπως την ενέργεια, την οικονομία και το κλίμα, δεν μπορούν να προσφέρουν την απαραίτητη λεπτομέρεια για λόγους πολυπλοκότητας των μοντέλων. Από αυτή την άποψη η σύνδεση των προσεγγίσεων

μοντελοποίησης είναι πολύπλοκη και δεν έχει μελετηθεί σε βάθος στην υπάρχουσα βιβλιογραφία (π.χ. Karkatsoulis et al., 2017).

Ο πίνακας 2 επιχειρεί να παρουσιάσει μια γενική εικόνα των έξι κατηγοριών των ολοκληρωμένων μοντέλων αξιολόγησης, εισάγοντας μερικές από τις σημαντικότερες προσεγγίσεις μοντελοποίησης των κατηγοριών, μαζί με μια σύντομη περιγραφή και ένα σύνολο ενδεικτικών εφαρμογών. Για τους σκοπούς της παρούσας εργασίας έχει γίνει ανασκόπηση και αξιολόγηση 61 πλαισίων μοντελοποίησης κλίματος-οικονομίας.

Πίνακας 2 Επισκόπηση 61 μοντέλων IAM με σύντομη περιγραφή και ενδεικτικές εφαρμογές

Κατηγορία	Μοντέλο	Πρώτη αναφορά	Σύντομη Περιγραφή	Ενδεικτικές εφαρμογές
Μοντέλα Βέλτιστης Ανάπτυξης	AD-FAIR	(Hof et al., 2009)	Ένας συνδυασμός FAIR (ανάλυση του κόστους μετριασμού της κλιματικής αλλαγής) και AD-RICE (ανάλυση του κόστους προσαρμογής στη κλιματική αλλαγή).	(Hof et al., 2012)
	AIM/Dynamic Global	(Masui et al., 2006)	Ένα παγκόσμιο δυναμικό μοντέλο βελτιστοποίησης που πραγματοποιεί αξιολόγηση των μειώσεων των εκπομπών CO ₂ και των οικονομικών επιπτώσεων και εξετάζει τις επενδύσεις εξοικονόμησης ενέργειας στην Ιαπωνία.	(Xu & Masui, 2009)
	AIM/Enduse	(Kainuma et al., 2011)	Ένα μοντέλο βελτιστοποίησης για την Ιαπωνία, σχεδιασμένο για την αξιολόγηση των επενδύσεων εξοικονόμησης ενέργειας.	(Kainuma et al., 2003)
	CETA-M	(Peck & Teisberg, 1993)	Ένα μοντέλο ανάπτυξης που αναπαριστά την παγκόσμια οικονομική ανάπτυξη, την κατανάλωση ενέργειας, την επιλογή ενεργειακών τεχνολογιών, την υπερθέρμανση του πλανήτη και το κόστος της υπερθέρμανσης του πλανήτη.	(Peck & Teisberg, 1995) (Peck & Teisberg, 1999)
	DEMETER-1 & DEMETER-1CCS	(Gerlagh, 2006)	Ένα μοντέλο ανάπτυξης που εφαρμόζει την μέθοδο learning-by-doing για τα ορυκτά καύσιμα και για την παραγωγή ενέργειας χωρίς άνθρακα.	(Gerlagh, 2007)
	DICE	(Nordhaus & Yang, 1996)	Ένα τροποποιημένο μοντέλο οικονομικής ανάπτυξης τύπου Ramsey.	(Nordhaus, 2010)

Κατηγορία	Μοντέλο	Πρώτη αναφορά	Σύντομη Περιγραφή	Ενδεικτικές εφαρμογές
	DICE-2007	(Nordhaus, 2008)	Μια επέκταση του DICE που περιλαμβάνει ένα τροποποιημένο μοντέλο οικονομικής ανάπτυξης τύπου Ramsay.	(Ackerman et al., 2010)
	ENTICE	(Popp, 2004)	Μια επέκταση του DICE, που συμπεριλαμβάνει ενδογενείς τεχνολογικές αλλαγές.	(Popp, 2006)
	FAIR 2.1	(Den Elzen, 2005)	Ένα top-down μοντέλο που περιλαμβάνει μια ενότητα κοινωνικοοικονομικού σεναρίου, μια μονάδα emission pathway module, ένα κλιματικό μοντέλο, μια ενότητα για το κόστος μετριασμού των κλιματικών αλλαγών, μια μονάδα για εκτίμηση των ζημιών λόγω της κλιματικής αλλαγής και μια ενότητα μακροοικονομικής ανάπτυξης..	(Hof et al., 2008)
	FEEM-RICE	(Buonanno et al., 2003)	Ένα παγκόσμιο μοντέλο κλίματος-οικονομίας το οποίο αποτελεί επέκταση του RICE & DICE και περιλαμβάνει ενδογενείς τεχνολογικές αλλαγές.	(Buchner & Carraro, 2005)
	GRAPE	(Kurosawa et al., 1999)	Ένα μοντέλο ανάπτυξης που αποτελείται από πέντε ενότητες: ενέργεια, κλίμα, χρήση γης, μακροοικονομία και περιβαλλοντικές επιπτώσεις.	(Kurosawa, 2004) (Kurosawa, 2006)
	MERGE	(Manne & Richels, 2005)	Ένα climate market-oriented, ολοκληρωμένο μοντέλο αξιολόγησης.	(Kypreos, 2007) (Kypreos, 2008)
	MIND	(Edenhofer et al., 2005b)	Ένα μοντέλο ενδογενούς ανάπτυξης που επικεντρώνεται στον ενεργειακό τομέα.	(Edenhofer et al., 2005a)
	RICE	(Nordhaus, 1994)	Μια πολυ-περιφερειακή επέκταση του DICE.	(Rosendahl, 2004) (Schultz & Kasting, 1997)
	RICE-99	(Nordhaus & Boyer, 2000)	Ένα μοντέλο βέλτιστης ανάπτυξης Ramsey-Koormans το οποίο έχει επεκταθεί με σκοπό να αναδείξει τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ των οικονομικών δραστηριοτήτων και του κλίματος μιας περιοχής.	(Bosetti et al., 2005)
	WITCH	(Bosetti et al., 2007)	Ένα νεοκλασικό μοντέλο βέλτιστης ανάπτυξης τύπου Ramsey, με ενσωματωμένο bottom-up μοντέλο ανάλυσης του ενεργειακού τομέα.	(Bosetti et al., 2009)

Κατηγορία	Μοντέλο	Πρώτη αναφορά	Σύντομη Περιγραφή	Ενδεικτικές εφαρμογές
Μοντέλα Γενικής Ισορροπίας	AIM	(Kainuma et al., 1999)	Ένα παγκόσμιο μοντέλο γενικής ισορροπίας με αναδρομική δυναμική που υπολογίζει την απορρόφηση των εκπομπών GHG στην περιοχή της Ασίας και του Ειρηνικού και τις επιπτώσεις της, στο περιβάλλον, την κοινωνία και την οικονομία.	(Dai et al., 2011) (Fujino et al., 2006)
	AIM/Material	(Masui et al., 2003)	Ένα μοντέλο γενικής ισορροπίας με αναδρομική δυναμική που εφαρμόζεται σε εθνικό επίπεδο.	(Masui, 2005)
	Dynamic GTAP	(Walmsley et al., 2006)	Ένα δυναμικό μοντέλο γενικής ισορροπίας.	(Golub et al., 2009)
	G-CUBED	(McKibbin & Wilcoxon, 1999)	Ένα πολυεθνικό, πολύ-τομεακό, διαχρονικό μοντέλο που εφαρμόζεται για τη μελέτη της πολιτικής μετριασμού των εκπομπών, της απελευθέρωσης του εμπορίου, της φορολογικής και της μακροοικονομικής πολιτικής.	(McKibbin et al., 2004)
	GEM-E3	(Van Regemorter, 2005)	Ένα στατικό μοντέλο CGE για την αξιολόγηση των ενεργειακών, κλιματικών και περιβαλλοντικών πολιτικών.	(Nilsson, 1999)
	GREEN	(Burniaux et al., 1992)	Ένα δυναμικό μοντέλο γενικής ισορροπίας που μελετά τις οικονομικές επιπτώσεις των πολιτικών που αποσκοπούν στη μείωση των εκπομπών CO ₂ στην Ευρώπη.	(Nicoletti & Oliveira-Martins, 1993)
	GTAP-E	(Burniaux & Truong, 2002)	Ένα στατικό CGE μοντέλο.	(Kremers et al., 2000)
	GTEM	(Pant, 2007)	Ένα δυναμικό μοντέλο της παγκόσμιας οικονομίας, που αναπτύχθηκε για την αντιμετώπιση των ζητημάτων της παγκόσμιας κλιματικής αλλαγής και τις σχετικές πολιτικές που υιοθετούνται.	(Jakeman & Fisher, 2006)
	ICES	(Bosello et al., 2009)	Ένα αναδρομικό, δυναμικό, πολύ-περιφερειακό μοντέλο γενικής ισορροπίας της παγκόσμιας οικονομίας που αποτελεί επέκταση του GTAP-E.	(Bosello et al., 2010) (Parrado & De Dian, 2014)
	IGEM	(Goettle et al., 2007)	Ένα δυναμικό μοντέλο της οικονομίας των ΗΠΑ που περιγράφει την ανάπτυξη λόγω της συσσώρευσης κεφαλαίου, της τεχνολογικής προόδου και της αύξησης του πληθυσμού.	(Goettle & Fawcett, 2009)

Κατηγορία	Μοντέλο	Πρώτη αναφορά	Σύντομη Περιγραφή	Ενδεικτικές εφαρμογές
	IMACLIM-R	(Crassous et al., 2006)	Ένα πολύ-τομεακό, πολύ-περιφερειακό, αναδρομικό μοντέλο γενικής ισορροπίας, το οποίο προβάλλει την παγκόσμια οικονομία σε ετήσια βάση.	(Crassous et al., 2006)
	LINKAGE	(Van der Mensbrugge, 2005)	Ένα παγκόσμιο, πολύ-περιφερειακό, πολύ-τομεακό, δυναμικό εφαρμοσμένο μοντέλο γενικής ισορροπίας.	(Laborde et al., 2016)
	MEMO	(Bukowski and Kowal, 2010)	Ένα πολύ-τομεακό, δυναμικό, στοχαστικό μοντέλο γενικής ισορροπίας, μεγάλης κλίμακας της Πολωνίας.	
	MIRAGE	(Bchir et al., 2002)	Ένα πολύ-τομεακό μοντέλο γενικής ισορροπίας, πολλών περιοχών, που αποσκοπεί στην ανάλυση της εμπορικής πολιτικής.	(Zaki, 2011)
	MIT EPPA	(Paltsev et al., 2005)	Ένα αναδρομικό, δυναμικό μοντέλο γενικής ισορροπίας, πολλών περιοχών που χρησιμοποιεί το σύνολο δεδομένων του GTAP και επιπρόσθετα δεδομένα για τα αστικά αέρια θερμοκηπίου.	(Viguiet et al., 2003)
	MS-MRT	(Bernstein et al., 1999b)	Ένα πολύ-τομεακό μοντέλο γενικής ισορροπίας, πολλαπλών περιοχών που χρησιμοποιήθηκε για την ανάλυση των παγκόσμιων επιπτώσεων του πρωτοκόλλου του Kyoto, με έμφαση στις επιπτώσεις του κλίματος στο διεθνές εμπόριο.	(Bernstein et al., 1999a)
	SGM 2004	(Edmonds et al., 2004)	Ένα μοντέλο γενικής ισορροπίας που αναλύει θέματα σχετικά με την ενέργεια, την οικονομία και τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου.	(Schumacher & Sands, 2006)
	WIAGEM	(Kemfert, 2001)	Μια οικονομική προσέγγιση η οποία επικεντρώνεται στη διεθνή αγορά ενέργειας και ενσωματώνει τις κλιματικές αλληλεπιδράσεις μέσω αλλαγών θερμοκρασίας και διακυμάνσεων της στάθμης της θάλασσας.	(Kemfert, 2005) (Kemfert & Truong, 2006) (Kemfert & Truong, 2007)
	WORLDSCAN	(Lejour et al., 2006)	Ένα αναδρομικό, δυναμικό, μοντέλο γενικής ισορροπίας για μακροχρόνια ζητήματα στη διεθνή οικονομία.	(Bollen & Gielen, 1999) (Bollen, 2015)
Μοντέλα Μερικής Ισορροπίας	GIM	(Mendelsohn et al., 2000)	Ένα μοντέλο μερικής ισορροπίας και προσαρμογής, που προβλέπει τις επιπτώσεις της αγοράς μέσω κλιματικών σεναρίων.	(Mendelsohn & Williams, 2004)
	MiniCAM/GCAM	(Edmonds & Reiley, 1985)	Ένα IAM μέτριας πολυπλοκότητας, που επικεντρώνεται στους τομείς της ενέργειας και της γεωργίας.	(Scott et al., 1999)

Κατηγορία	Μοντέλο	Πρώτη αναφορά	Σύντομη Περιγραφή	Ενδεικτικές εφαρμογές
	TIAM-ECN	(Keppo and van der Zwaan, 2012)	Μια έκδοση του μοντέλου TIAM η οποία χρησιμοποιείται ευρέως για τη μελέτη των σεναρίων που αναπαριστούν την ανάπτυξη της ενεργειακής τεχνολογίας και των πολιτικών για την κλιματική αλλαγή. Το μοντέλο επίσης περιλαμβάνει ένα παγκόσμιο bottom-up μοντέλο ενεργειακών συστημάτων.	(van der Zwaan et al., 2013)
Μακροοικονομικά μοντέλα	E3ME	(Barker & Zagame, 1995)	Ένα non-CGE μοντέλο του παγκόσμιου οικονομικού και ενεργειακού συστήματος και του περιβάλλοντος.	(Barker, 1998) (Barker, 1999) (Barker & Rosendahl, 2000) (Ščasný et al., 2009)
	E3MG	(Barker et al., 2006)	Ένα μοντέλο μακροοικονομικής προσομοίωσης μεγάλης κλίμακας της παγκόσμιας οικονομίας. Εμπεριέχει πολλές λεπτομερείς και ολοκληρωμένη ανάλυση της ζήτησης ενέργειας και των επακόλουθων ατμοσφαιρικών εκπομπών. Ακολουθεί την προσέγγιση της E3ME, εκτός από το γεγονός ότι σε παγκόσμιο επίπεδο οι διάφορες αγορές είναι κλειστές, επιτρέποντας έτσι την δημιουργία ανισορροπιών.	(Barker et al., 2008) (Barker & Scricciu, 2010) (Dagoumas & Barker, 2010)
	Oxford Global Macroeconomic and Energy Model	(Cooper et al., 1999)	Ένα μακροοικονομικό μοντέλο σχεδιασμένο για την αξιολόγηση των επιπτώσεων των πολιτικών που εφαρμόζονται για τον έλεγχο των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα.	(Barker & Ekins, 2001)
Μοντέλα Ενεργειακών Συστημάτων	DNE21+	(Sano et al., 2005)	Λεπτομερής μονάδα ενέργειας, που εμπεριέχει ποικίλες επιλογές σε πηγές και τεχνολογίες ενέργειας.	(Rout et al., 2008) (Oda et al., 2009) (Wada et al., 2012)
	Calliope	(Pfenninger, 2015)	Ένα πλαίσιο μοντελοποίησης πολλαπλών ενεργειακών συστημάτων (MUSES) για την ανάπτυξη μοντέλων με ενεργειακά συστήματα.	(Rednondo and van Vliet, 2015)
	EFOM	(Finon, 1976)	Ένα μοντέλο ενεργειακών συστημάτων για την Γαλλία.	(Van der Voort, 1982)
	ERIS	(Turton & Barreto, 2004a)	Ένα πλήρες μοντέλο ενεργειακού συστήματος, το οποίο καλύπτει επίσης και μερικούς μη ηλεκτρικούς τομείς όπως τις μεταφορές και τη θέρμανση και τις αντίστοιχες τεχνολογίες τους.	(Barreto & Kypreos, 2004) (Turton & Barreto, 2004b)

Κατηγορία	Μοντέλο	Πρώτη αναφορά	Σύντομη Περιγραφή	Ενδεικτικές εφαρμογές
	GENIE	(Mattsson & Wene, 1997)	Ένα μοντέλο ενεργειακού συστήματος που επικεντρώνεται στην εφαρμογή νέων τεχνολογιών (κυρίως φωτοβολταϊκών και κυψελών καυσίμου) παγκοσμίως.	(Mattsson, 2002)
	GET-LFL	(Hedenus et al., 2005)	Ένα μοντέλο ελαχιστοποίησης του κόστους, το οποίο έχει σχεδιαστεί για να συγκρίνει την επίδραση της εισαγωγής των ενδογενών τεχνολογικών αλλαγών σε ένα ενεργειακό σύστημα.	(Edenhofer et al., 2006)
	MARKAL/TIMES	(Fishbone & Abiock, 1981)	Ένα μοντέλο που καλύπτει εκτενώς τις τεχνολογίες παραγωγής και κατανάλωσης ενέργειας, καθώς και τους οικονομικούς τομείς που σχετίζονται με αυτές (μέσω των εξωγενών προδιαγραφών της ζήτησης ενέργειας).	(Rafaj & Kypreos, 2007) (Seebregts et al., 2000)
	MEDEE 2	(Lapillonne, 1978)	Ένα bottom-up μοντέλο πρόβλεψης της ζήτησης που επιτρέπει την αξιολόγηση του αντίκτυπου των πολιτικών ενεργειακής απόδοσης σε εθνικό επίπεδο	(Lapillonne, 1980)
	MESSAGE	(Messner, 1997)	Ένα δυναμικό μοντέλο ελαχιστοποίησης του κόστους με γραμμικό προγραμματισμό που αναπαριστά το συνολικό ενεργειακό σύστημα.	(Hainoun et al., 2010) (Sullivan et al., 2013)
	NEMS	(Gabriel et al., 2001)	Ένα μοντέλο ενεργειακής οικονομίας, μεγάλης κλίμακας, που υπολογίζει τις τιμές των καυσίμων σε ισορροπία με τις ποσότητες που καταναλώνονται στον ενεργειακό τομέα των ΗΠΑ.	(Yu, 2008)
	POLES	(Criqui et al., 1998)	Ένα μοντέλο προσομοίωσης μερικής ισορροπίας της ενεργειακής οικονομίας, που μοντελοποιεί τον κύκλο της ενέργειας από την αρχική παραγωγή έως την τελική ζήτηση των χρηστών και τις αντίστοιχες εκπομπές των αερίων του θερμοκηπίου που παράγονται.	(Criqui et al., 1999) (Kouvaritakis et al., 2000a) (Kouvaritakis et al., 2000b) (Kitous et al., 2010)
	PRIMES	(Capros et al., 1998)	Ένα ενεργειακό μοντέλο που επικεντρώνεται στους μηχανισμούς της αγοράς, με στόχο την εκτίμηση των τιμών που επηρεάζουν την εξέλιξη της ζήτησης και της προσφοράς ενέργειας καθώς και την τεχνολογική πρόοδο.	(Capros et al., 2017) (Capros et al., 2016)

Κατηγορία	Μοντέλο	Πρώτη αναφορά	Σύντομη Περιγραφή	Ενδεικτικές εφαρμογές
Άλλα μοντέλα	WEM	(International Energy Agency, 2010)	Ένα μαθηματικό μοντέλο μεγάλης κλίμακας σχεδιασμένο από τον IEA για την αναπαραγωγή του τρόπου λειτουργίας των αγορών ενέργειας.	(Kesicki & Yanagisawa, 2015)
	CIAS	(Warren et al., 2008)	Μία πολυεθνική πλατφόρμα IAM για τη μοντελοποίηση της κλιματικής αλλαγής	(Warren et al., 2012)
	FUND	(Tol, 1997)	Ένα non-CGE μοντέλο βελτιστοποίησης πολιτικής που υποστηρίζει τους υπεύθυνους χάραξης πολιτικής για να κατανοήσουν σε βάθος την έννοια της βέλτιστης πολιτικής, αντί να αξιολογεί τις συνέπειες των προτεινόμενων πολιτικών.	(Link & Tol, 2004) (Ackerman & Munitz, 2012)
	ICAM-3	(Dowlatabadi, 1998)	Ένα μοντέλο προσομοίωσης σχεδιασμένο για την εκτίμηση του κόστους μετριασμού των κλιματικών αλλαγών, που σχετίζεται με την χρήση νέων τεχνολογιών.	(Dowlatabadi, 2000)
	IGSM2	(Sokolov et al., 2005)	Ένα μοντέλο κλίματος-οικονομίας για την ανάλυση των εκπομπών των αερίων θερμοκηπίου και για την δημιουργία προτάσεων για μέτρα μετριασμού.	(Reilly et al., 2006)
	IMAGE 2.4	(Bouwman et al., 2006)	Ένα μοντέλο αξιολόγησης περιβαλλοντικής και οικονομικής πολιτικής.	(Stehfest et al., 2009)
	PAGE2002	(Hope, 2006)	Μια έκδοση του μοντέλου PAGE που ενσωματώνει τους πέντε λόγους της IPCC που προκαλούν ανησυχία.	(Hope, 2008) (Hope, 2009)
	PAGE09	(Hope, 2011)	Μια ενημερωμένη έκδοση του PAGE2002 που λαμβάνει υπόψη την 4η Έκθεση Αξιολόγησης της IPCC.	(Hope, 2013)

4

Μοντέλα Βέλτιστης Ανάπτυξης

4.1 Εισαγωγή

Τα μοντέλα βελτιστοποίησης της ευημερίας, γνωστά και ως μοντέλα βέλτιστης ανάπτυξης, έχουν σχετικά απλή δομή και οι διαδικασίες τους τείνουν να είναι πιο διαφανείς και κατανοητές σε σχέση με τις υπόλοιπες κατηγορίες μοντέλων IAM. Βασίζονται στην μακροοικονομική θεωρία και επικεντρώνουν την ανάλυση τους στην αποτύπωση της εξέλιξης της οικονομίας με την πάροδο του χρόνου. Η κοινωνική ευημερία ορίζεται συχνά ως ένα επιθυμητό επίπεδο χρησιμότητας ενός αντιπροσωπευτικού δείγματος και ο γενικός στόχος είναι η μεγιστοποίηση της συνολικής ευημερίας με την πάροδο του χρόνου. Στα νεοκλασικά μοντέλα οικονομικής ανάπτυξης οι επενδύσεις που πραγματοποιούνται αφορούν κεφάλαια, εκπαίδευση και τεχνολογίες. Για να πετύχουν μεγιστοποίηση της συνολικής ευημερίας προσδίδουν αύξηση στη μελλοντική κατανάλωση και μειώνουν κατά ένα μέρος την τρέχουσα κατανάλωση, με σκοπό να βρεθεί η σωστή ισορροπία μεταξύ της παρούσας κατανάλωσης και των επενδύσεων που θα αυξήσουν την μελλοντική κατανάλωση. Τα IAM αυτής της κατηγορίας επεκτείνουν τα νεοκλασικά μοντέλα ανάπτυξης, συμπεριλαμβάνοντας το «φυσικό κεφάλαιο» του κλιματικού συστήματος ως πρόσθετο είδος κεφαλαίου (Nordhaus, 2014). Η επιδράσεις των κλιματικών αλλαγών, όπως είναι οι αυξημένες εκπομπές των αερίων του θερμοκηπίου, είναι καταστροφικές για το φυσικό κεφάλαιο, ενώ αντίθετως οι επενδύσεις σε μέτρα μετριασμού των εκπομπών, το αυξάνουν. Εκτός από τις τυποποιημένες επενδύσεις, το φυσικό κεφάλαιο που χρησιμοποιείται σήμερα ενισχύει την τρέχουσα κατανάλωση και την μελλοντική ευημερία, σε αντίθεση με τους δαπανηρούς πόρους για την προστασία του κλιματικού συστήματος ή για την αποφυγή ζημιών από την αλλαγή του κλίματος. Όσον αφορά την πολιτική για το κλίμα, τα μοντέλα αυτά συγκρίνουν τις εναλλακτικές πορείες μείωσης των εκπομπών με την πάροδο του χρόνου, προκειμένου να βρεθεί η πολιτική που μεγιστοποιεί τη συνολική κοινωνική ευημερία.

4.2 Συνοπτική παρουσίαση των μοντέλων βέλτιστης

ανάπτυξης

4.2.1 AD-FAIR

Το AD-FAIR είναι ένας συνδυασμός του μοντέλου FAIR και του μοντέλου AD-RICE. Το FAIR συνδέει τους μακροπρόθεσμους κλιματικούς στόχους και τους συνολικούς στόχους μείωσης των εκπομπών με τα δικαιώματα εκπομπών και τα κόστη μείωσης των εκπομπών. Η δομή του αποτελείται από τρία υπόμοντέλα: ένα απλό μοντέλο κλίματος, ένα μοντέλο κατανομής εκπομπών και ένα μοντέλο κόστους. Το μοντέλο AD-RICE από τη άλλη, αποτελεί μία εξελιγμένη έκδοση του RICE στην οποία εισάγεται μία περισσότερο διαφανής μέθοδος μοντελοποίησης της προσαρμογής (adaptation) με την χρήση μίας μεταβλητής απόφασης. Το AD-FAIR ουσιαστικά αποτελεί ένας συνδυασμός της νέας προσέγγισης μοντελοποίησης της προσαρμογής του AD-RICE με το πλαίσιο μοντελοποίησης του FAIR, (Hof et al., 2009). Η αβεβαιότητα στο AD-FAIR μοντέλο εξετάζεται με ανάλυση ευαισθησίας, ενώ η τεχνολογική πρόοδος ορίζεται και σε αυτό το μοντέλο εξωγενώς. Το μοντέλο επίσης υπολογίζει τις οικονομικές επιπτώσεις από την κλιματική αλλαγή με ενσωματωμένη συνάρτηση για τις ακαθάριστες ζημιές (gross damage function):

$$\text{Gross Damage Function: } \frac{G_{Dr,t}}{Y_{r,t}} = a1,r \cdot \Delta T t + a2,r \cdot \Delta T t^{a3,r} \quad ,$$

Όπου t : περίοδος, r : περιοχή, $a1, a2, a3$: παράμετροι, ΔT : η μεταβολή της θερμοκρασίας και Y : ΑΕΠ

4.2.2 AIM/Dynamic Global

Το AIM/Dynamic Global αποτελεί ένα παγκόσμιο δυναμικό μοντέλο βελτιστοποίησης που χωρίζει τον πλανήτη σε έξι κύριες περιοχές, όπου για κάθε μια ξεχωριστά αναλύονται οι διάφοροι παράγοντες της οικονομίας. Το μοντέλο μεγιστοποιεί την παγκόσμια χρησιμότητα η οποία εξαρτάται από την τελική κατανάλωση για την

περίοδο 1995-2100. Η παγκόσμια χρησιμότητα ισούται με τον σταθμισμένο μέσο όρο των χρησιμότητων όλων των περιοχών που θεωρούνται στο μοντέλο (Ιαπωνία, ΗΠΑ, OECD, Πρώην Σοβιετική Ένωση, Κίνα και Το υπόλοιπο του πλανήτη). Το μοντέλο επιλύεται για μία περίοδο πενταετίας από το 1995 έως το 2000 και στη συνέχεια για περιόδους δεκαετίας από το 2000 μέχρι το τέλος του χρονικού ορίζοντα. Τα δεδομένα εισόδου αποτελούνται από το κεφάλαιο, την απασχόληση και τα ενεργειακά και μη ενεργειακά προϊόντα σε κάθε τομέα. Το μοντέλο AIM θεωρεί ότι υπάρχουν επενδύσεις εξοικονόμησης ενέργειας μόνο στον τομέα της παραγωγής και μέχρι το 2030 προσομοιώνει τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται και σήμερα (εξωγενής ενσωμάτωση τεχνολογιών στο μοντέλο). Στις εκτιμήσεις πέρα του 2030 συνυπολογίζεται η αλληλεπίδραση των επενδύσεων και της ενεργειακής απόδοσης έτσι ώστε οι εκπομπές να παραμείνουν σταθερές στα επίπεδα του 2030. Γενικότερα, μέχρι το 2100 εμφανίζεται σχετικά χαμηλή τεχνολογική καινοτομία. Οι εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα από ορυκτά καύσιμα υπολογίζονται ενδογενώς ενώ άλλες εκπομπές όπως οι εκπομπές της χρήσης γης και οι εκπομπές των βιομηχανικών διεργασιών υπολογίζονται εξωγενώς. Για την ανάλυση της αβεβαιότητας του AIM απαιτείται ανάλυση ευαισθησίας των παραμέτρων η ανάλυση σεναρίων (Ortiz and Markandya, 2009). Το μοντέλο δεν περιλαμβάνει καμία μέθοδος αποτίμησης των επιπτώσεων.

4.2.3 AIM/Enduse Global

Το AIM/Enduse Global είναι ένα μοντέλο που επικεντρώνεται στην αξιολόγηση των τεχνολογιών των ενεργειακών συστημάτων (technology-oriented system engineering model), βάσει δεδομένων πολιτικών μετριασμού της κλιματικής αλλαγής για το διάστημα 2005-2050. Πρόκειται για ένα δυναμικό, bottom-up, αναδρομικό μοντέλο το οποίο προσομοιώνει αλλαγές στην τεχνολογία, την κατανάλωση ενέργειας και τις εκπομπές αερίου του θερμοκηπίου.

Η επιλογή των τεχνολογιών πραγματοποιείται με αλγορίθμους γραμμικού προγραμματισμού, οι οποίοι έχουν ως στόχο να ελαχιστοποιήσουν τα συνολικά κόστη του συστήματος, ικανοποιώντας περιορισμούς όπως την μείωση των εκπομπών και τον περιορισμό ικανοποίησης της ζήτησης. Πρωταρχικό χαρακτηριστικό του μοντέλου είναι η δυνατότητα του να επιλέγει τις κατάλληλες τεχνολογίες μέσα από ένα σύνολο

τεχνολογιών, όχι μόνο για τον τομέα της παραγωγής ενέργειας αλλά και για τους τελικούς καταναλωτές. (Akashi et al., 2012)

Το συγκεκριμένο μοντέλο δεν θα πρέπει να συμπεριλαμβάνεται στην κατηγορία των IAM, διότι δεν περιέχει κανένα οικονομικό πλαίσιο αξιολόγησης και δεν πραγματοποιεί καμία αποτίμηση των ζημιών λόγω της κλιματικής αλλαγής. Η τεχνολογική εξέλιξη θεωρείται ενδογενώς και εξωγενώς. Η εξέταση της αβεβαιότητας των παραμέτρων του πραγματοποιείται με ανάλυση ευαισθησίας και με ανάλυση σεναρίων.

4.2.4 CETA-M

Το μοντέλο CETA (Carbon Emissions Trajectory Assessment) εξετάζει ένα σύνολο πληροφοριών σχετικά με την υπερθέρμανση του πλανήτη. Είναι και αυτό ένα μοντέλο βέλτιστης οικονομικής ανάπτυξης και βέλτιστης χρήσης της ενέργειας, το οποίο ενσωματώνει απεικονίσεις της συγκέντρωσης των αερίων του θερμοκηπίου, του ύψους της μέσης παγκόσμιας θερμοκρασίας και του μεγέθους των οικονομικών ζημιών που σχετίζονται με την αύξηση της θερμοκρασίας, (Peck and Teisberg, 1993). Η μελλοντική τεχνολογική εξέλιξη θεωρείται εξωγενής, ενώ η αβεβαιότητα στην έκδοση CETA-M(1993) προσδιορίζεται με ανάλυση της ευαισθησίας των παραμέτρων η με ανάλυση σεναρίων. Σε επόμενη πιο εξελιγμένη έκδοση του μοντέλου (CETA-R) οι Peck και Teisberg (1995) αξιολόγησαν μία από τις παραμέτρους του μοντέλου στοχαστικά. Το μοντέλο αυτό επίσης πραγματοποιεί υπολογισμό των νομισματικών επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής με damage function.

$$Ct = a.Lt.T^\lambda$$

Όπου t : περίοδος, C : ετήσιο κόστος υπερθέρμανσης, a : κλιμακωτή σταθερά, L : δείκτης απασχόλησης, T : αύξηση της θερμοκρασίας από την προ-βιομηχανική εποχή, λ : σταθερά δύναμης της damage function

4.2.5 DEMETER-1 & DEMETER-1CCS

Το DEMETER-1CCS είναι μοντέλο βέλτιστης ανάπτυξης με ενσωματωμένο μηχανισμό “Learning- by-doing” για τα ορυκτά καύσιμα και για τα μη συμβατικά καύσιμα. Επιπλέον, υπάρχει ενσωματωμένος ο μηχανισμός δέσμευσης και απομόνωσης του άνθρακα (CSS, που αναφέρεται στην διαδικασία συλλογής του CO₂ από μεγάλες πηγές όπως οι μονάδες ΠΗΕ και η τοποθέτησή του σε υπόγειο γεωλογικός σχηματισμός), ο οποίος αποτελεί μια επιπλέον επιλογή για τη μείωση των εκπομπών στην ατμόσφαιρα. Η αβεβαιότητα και σε αυτό το μοντέλο προσδιορίζεται με την ανάλυση της ευαισθησίας των παραμέτρων ή με ανάλυση σεναρίων (Gerlagh, 2006; Ortiz and Markandya, 2009). Η τεχνολογική πρόοδος θεωρείται ενδογενής ή εξωγενής. Το μοντέλο δεν διαθέτει συνάρτηση υπολογισμού των επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής.

4.2.6 DICE

Το DICE (Dynamic Integrated model of Climate and Economy) εξετάζει τις επιπτώσεις που έχει η κλιματική αλλαγή στην οικονομία με την βοήθεια της θεωρίας της οικονομικής ανάπτυξης (economic growth theory). Βάσει αυτής πραγματοποιούνται επενδύσεις κεφαλαίου, επενδύσεις στην εκπαίδευση και στην τεχνολογία οι οποίες επιφέρουν αύξηση της συνολικής μελλοντικής κατανάλωσης. Ένα από τα βασικά χαρακτηριστικά του μοντέλου είναι ότι κατά την παγκόσμια ανάλυση που πραγματοποιεί, αθροίζει συνολικά για όλες τις χώρες τα αποθέματα κεφαλαίου, την διείσδυση των νέων τεχνολογιών και το επίπεδο των εκπομπών, (Nordhaus and Yang, 1996).

Οι δύο βασικές μεταβλητές απόφασης του DICE είναι η εξοικονόμηση κεφαλαίου και οι εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου (GHG emissions). Η κατανομή του κεφαλαίου στην οικονομία είναι ενδογενής και βελτιστοποιεί την κατανάλωση με την πάροδο του χρόνου (οικονομικό μοντέλο). Κάθε περιοχή που εξετάζεται στο συγκεκριμένο παγκόσμιο μοντέλο χαρακτηρίζεται από ένα αρχικό απόθεμα κεφαλαίου, ένα αρχικό ύψος απασχόλησης, καθώς και από ένα εξωγενώς καθορισμένο επίπεδο τεχνολογίας. Η αρχική έκδοση του DICE πραγματοποιεί εξωγενής εκτίμηση της τεχνολογικής προόδου, ενώ στη συνέχεια προστίθεται και ενδογενής θεώρηση της εξέλιξης της

τεχνολογίας (Ortiz and Markandya, 2009). Για την ανάλυση της αβεβαιότητας, στο συγκεκριμένο μοντέλο, πραγματοποιείται ανάλυση της ευαισθησίας, ενώ ανάλυση Monte Carlo πραγματοποιείται σε μία πιο εξελιγμένη έκδοση του συγκεκριμένου μοντέλου από τους Nordhaus και Popp (1997), (Stanton et al., 2009).

Η συνάρτηση των ζημιών υποθέτει ότι οι κλιματικές αλλαγές είναι ανάλογες με την παγκόσμια παραγωγή και είναι πολυωνυμικές συναρτήσεις της μέσης παγκόσμιας μεταβολής της θερμοκρασίας. Η καμπύλη των συνολικών ζημιών προκύπτει από εκτιμήσεις των ζημιών για τις δώδεκα περιοχές του μοντέλου. Περιλαμβάνει τις εκτιμώμενες ζημιές για ευαίσθητους τομείς όπως της γεωργίας, του επιπέδου της θαλάσσιας στάθμης, της υγείας, των ζημιών που δεν σχετίζονται με το εμπόριο και των ζημιών από περιβαλλοντολογικές καταστροφές. Ο ίδιος ο Nordhaus το 2007 υποστήριξε ότι αυτή η συνάρτηση ζημιών είναι εξαιρετικά εικαστική λόγω της αδύναμης βάσης των εμπειρικών μελετών στις οποίες βασίζεται.

$$\text{Damage function: } R = \frac{1}{1+0,00284.T^2} \quad , \text{ όπου } T \text{ θερμοκρασία}$$

4.2.7 DICE2007

Το DICE2007 σε σχέση με το αρχικό μοντέλο DICE περιλαμβάνει backstop τεχνολογίες για την παραγωγή non-carbon-based ενεργειακών προϊόντων. Με αυτό το τρόπο είναι δυνατή η αντικατάσταση των υδρογονανθράκων με εναλλακτικά καύσιμα φιλικά προς το περιβάλλον. Η εξέλιξη των τεχνολογιών στο DICE2007 όπως και στο αρχικό DICE είναι εξωγενής και όχι ενδογενής. Βασική διαφορά με το αρχικό DICE είναι ότι πραγματοποιείται ανάλυση Monte Carlo για την αξιολόγηση της αβεβαιότητας. Ο Nordhaus πραγματοποίησε Monte Carlo ανάλυση με 100 δοκιμές, σε 8 παραμέτρους που αποτελούν είσοδοι του μοντέλου. (Cooper, 2008), (Ortiz and Markandya, 2009).

$$\text{Damage function: } \frac{D(t)}{Y} = 1 - \frac{1}{1+\eta.T^B}$$

Όπου $\eta = \eta$ (μη-καταστροφικές) + η (καταστροφικές) = 0.28% ποσοστό των ζημιών

η (μη-καταστροφικές) = 0.10%, η (καταστροφικές) = 0.18%, $\beta = 2$, το $D(T)/Y$ αντιπροσωπεύει την κλασματική μείωση της παραγωγής ως συνάρτηση της μέσης παγκόσμιας υπερθέρμανσης με αναφορά στην θερμοκρασία της προ-βιομηχανικής εποχής.

Για πολύ μικρές τιμές του $\eta \cdot T^B$, το κλάσμα γίνεται: $\frac{D(t)}{Y} \approx \eta \cdot T^B$

4.2.8 ENTICE

Το μοντέλο ENTICE αποτελεί μία παραλλαγή του DICE. Η ανάλυση του μοντέλου πραγματοποιείται σε παγκόσμιο επίπεδο, όπως ακριβώς και του DICE. Βασικό χαρακτηριστικό αυτής της προσέγγισης είναι ότι η τεχνολογική εξέλιξη ενσωματώνεται ενδογενώς και εξωγενώς. Συγκεκριμένα, ο ενδογενής υπολογισμός αφορά τις τεχνολογικές αλλαγές που βελτιώνουν την ενεργειακή απόδοση, οι οποίες θεωρείται ότι υποκινούνται από τις μεταβολές της τιμής των ενεργειακών προϊόντων και των συμπεριλαμβανομένων φόρων του άνθρακα. Επιπλέον, οι ενδογενείς τεχνολογικές αλλαγές μπορούν να προέλθουν από συσσωρευμένες επενδύσεις στην έρευνα και τη ανάπτυξη (R&D). (Ortiz and Markandya, 2009; Popp, 2004). Όσο αφορά την αβεβαιότητα, η ανάλυση της αβεβαιότητας πραγματοποιείται ντετερμινιστικά με ανάλυση ευαισθησίας και με εφαρμογή σεναρίων για τα δεδομένα εισόδου του μοντέλου.

$$\text{Damage function: } \Omega t = \frac{1}{1+a_1+Tt+a_2 \cdot Tt^2} ,$$

Οπού Tt : το επίπεδο αύξησης της θερμοκρασίας μετά την 1900 και a_1, a_2 παράμετροι της damage function

4.2.9 FEEM-RICE

Το μοντέλο FEEM-RICE αποτελεί μία βελτιωμένη έκδοση του μοντέλου RICE στο οποίο ενσωματώνεται ενδογενώς η τεχνολογική πρόοδος η οποία επηρεάζεται από πολιτικές που έχουν να κάνουν με την κλιματική αλλαγή αλλά και από οικονομικά κίνητρα. Στο μοντέλο συμπεριλαμβάνονται οι μηχανισμοί “Learning-by-doing” και “Learning-by-researching” για την τεχνολογική εξέλιξη. Η αβεβαιότητα και σε αυτό το μοντέλο όπως και στο RICE θα πρέπει να αναλυθεί με την εφαρμογή μίας ανάλυσης ευαισθησίας (Ortiz and Markandya, 2009).

$$\text{Damage function: } \Omega(n, t) = \frac{1 - b_1 n \cdot \mu(n, t)^{b_2}}{1 + \theta_1 \cdot \frac{1}{\exp(\text{SAD}(n, t))^{2.5}} \cdot T(t)^{\theta_2}}$$

όπου n : περιοχή, t : περίοδος,

$\theta_1, \theta_2, b_2, b_1, n$: οι συντελεστές του Nordhause

$\text{SAD}(n, t)$: απόθεμα κεφαλαίων που προορίζονται για την προσαρμογή, $\mu(n, t)$: κόστος μείωσης της κλιματικής αλλαγής, $T(t)$: μέση παγκόσμια θερμοκρασία

4.2.10 FAIR 2.1

Το FAIR 2.1 είναι ένα top-down μοντέλο βέλτιστης ανάπτυξης το οποίο περιλαμβάνει έξι ξεχωριστές λειτουργικές μονάδες. Πρώτη εισάγεται η μονάδα δημιουργίας σεναρίων όπου γίνεται εκτίμηση της αύξησης του ΑΕΠ έως το 2250. Έπειτα τοποθετείται η μονάδα υπολογισμού των εκπομπών η οποία υπολογίζει τις πολλαπλές εκπομπές των έξι αερίων του θερμοκηπίου που αναφέρονται στο πρωτόκολλο του Kyoto (CO₂, CH₄, N₂O, HFCs, PFCs και SF₆), (den Elzen and van Vuuren et al., 2007). Ακολουθεί η κλιματική μονάδα στη οποία υπολογίζονται οι επιπτώσεις της μεταβολής της θερμοκρασίας (den Elzen and Meinshausen et al., 2005), (den Elzen et al., 2007) και η μονάδα υπολογισμού της ελαχιστοποίησης του κόστους της κλιματικής αλλαγής (den Elzen et al., 2007). Στην συνέχεια τοποθετούνται η μονάδα υπολογισμού των επιπτώσεων, όπου υπολογίζονται τα άμεσα κόστη των ζημιών της κλιματικής αλλαγής. Τέλος, εισάγεται το μακροοικονομικό μοντέλο ανάπτυξης, όπου υπολογίζεται η άμεση και η έμμεση μείωση της κατανάλωσης λόγω του μετριασμού της κλιματικής αλλαγής και λόγω των επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής. Η αβεβαιότητα στο FAIR2.1 μελετάται ντετερμινιστικά με ανάλυση μελλοντικών σεναρίων. Μερικές από τις κύριες αβεβαιότητες είναι τα κόστη μείωσης της κλιματικής αλλαγής, η τήρηση του στόχου της μέγιστης επιτρεπόμενης αύξησης της θερμοκρασίας και της μέγιστης επιτρεπόμενης ποσότητας εκπομπών του CO₂.

Η ενότητα υπολογισμού των ζημιών στο FAIR 2.1 πραγματοποιεί εκτίμηση των άμεσων και των έμμεσων επιπτώσεων στην κατανάλωση. Για τον σκοπό αυτό, έχει επεκταθεί με ένα απλό μοντέλο οικονομικής ανάπτυξης που βασίζεται σε μία εξίσωση παραγωγής Cobb-Douglas. Αυτό το μοντέλο οικονομικής ανάπτυξης μπορεί να

χρησιμοποιηθεί για να εκτιμηθεί ο αντίκτυπος του αυξημένου ενεργειακού κόστους στην κατανάλωση. Η προσέγγιση αυτή χρησιμοποιείται συχνά στα ολοκληρωμένα μοντέλα αξιολόγησης για αυτό το σκοπό. Παρακάτω δίνονται οι εξισώσεις της ενότητας υπολογισμού των ζημιών.

Ενότητα Ζημιών:

$$Y_t = A \cdot K_t^a \cdot L_t^{(1-a)},$$

$$K_{(t+1)} = K_t - \eta \cdot K_t + I_t$$

$$Y_t = C_t + I_t + EC_t + D_t$$

Όπου t : περίοδος, Y : ΑΕΠ, A : τεχνολογική πρόοδος, K : κεφάλαιο, L : απασχόληση, a : ελαστικότητα της παραγωγής, I : επενδύσεις, n : απόσβεση, C : κατανάλωση, EC : κόστος μετριασμού, D : κόστος των ζημιών.

4.2.11 GRAPE

Το μοντέλο GRAPE (Global Relationship Assessment to Protect the Environment) είναι και αυτό ένα μοντέλο βέλτιστης ανάπτυξης (optimal growth) το οποίο αποτελείται από πέντε ενότητες (modules) που αλληλεπιδρούν μεταξύ τους. Οι ενότητες αυτές αποτελούν το μοντέλο Ενέργειας, το μοντέλο Οικονομίας, το μοντέλο Χρήσης γης, το μοντέλο Κλίματος και το μοντέλο υπολογισμού των επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής στην οικονομία. Το GRAPE είναι ένα παγκόσμιο μοντέλο το οποίο διαχωρίζει τον κόσμο σε δέκα περιοχές. Το βασικό έτος είναι το 2000 και η ανάλυση πραγματοποιείται με χρονικό ορίζοντα το 2100. Το μοντέλο μεγιστοποιεί την οικονομική χρησιμότητα λαμβάνοντας υπόψη το παγκόσμιο εμπορικό ισοζύγιο. Η θεωρήσεις της εξέλιξης της τεχνολογίας πραγματοποιούνται εξωγενώς, ενώ η αβεβαιότητα του μοντέλου εξετάζεται με την ανάλυση διαφορετικών σεναρίων (Journal, 2016).

Damage function: $R = \frac{1}{1+0,00284 \cdot T^2}$, όπου T είναι η μέση παγκόσμια θερμοκρασία

4.2.12 MERGE

Χαρακτηριστικό του μοντέλου του MERGE, όπως και σχεδόν όλων των μοντέλων βέλτιστης ανάπτυξης, είναι ότι αποτελείται από διαφορετικές αλληλεξαρτώμενες ενότητες (modules). Εδώ υπάρχουν τρεις ενότητες οι οποίες μοντελοποιούν τα τρία βασικά σημεία ενδιαφέροντος στην ανάλυση της κλιματικής αλλαγής. Τα τρία modules του βασικού μοντέλου MERGE είναι το οικονομικό μοντέλο, το μοντέλο υπολογισμού των εκπομπών των αερίων του θερμοκηπίου μέσω ενεργειακών και μη ενεργειακών διεργασιών και το μοντέλο ανάλυσης της παγκόσμιας κλιματικής αλλαγής το οποίο υπολογίζει τις επιπτώσεις της στην αγορά αλλά και τις επιπτώσεις εκτός εμπορίου. Η τεχνολογική πρόοδος είναι εξωγενής όπως και στο μοντέλο DICE ενώ είναι απαραίτητη η ανάλυση ευαισθησίας σε περίπτωση που χρειαστεί να εξεταστεί η αβεβαιότητα των αποτελεσμάτων (Manne and Richels, 2005). Όπως και στο μοντέλο WITCH, έτσι και στο MERGE η ανάλυση της αβεβαιότητας με τη μέθοδο Monte Carlo πραγματοποιείται σε μεταγενέστερη έκδοση (Kyrgios, 2008).

Οι ζημιές που προκαλούνται από την αλλαγή του κλίματος χωρίζονται σε δύο κατηγορίες: σε οικονομικές (ή εμπορικές ζημιές) και σε μη εμπορεύσιμες (ή άυλες ζημιές). Οι οικονομικές ζημιές για την περίοδο (t) και την περιοχή (n) ακολουθούν την υπόθεση που χρησιμοποιείται στο DICE όπου οι ζημιές αυξάνονται τετραγωνικά με την αλλαγή της θερμοκρασίας. Από την άλλη, οι μη οικονομικές ζημιές θεωρείται ότι ακολουθούν την προσέγγιση προθυμίας προς πληρωμή (δηλαδή κατά πόσο πρόθυμοι είναι οι άνθρωποι να πληρώσουν για την πρόληψη και την μείωση των κλιματικών αλλαγών). Η σχέση μεταξύ των μη εμπορεύσιμων αγαθών και του κατά κεφαλήν εισοδήματος θεωρείται ότι είναι σχήματος S, γεγονός που συνεπάγεται ότι οι χαμηλότερες εισοδηματικές περιφέρειες με χαμηλότερο ΑΕΠ βαθμονομούνται με τέτοιο τρόπο ώστε να μην υπερβαίνει το 100% του ΑΕΠ τους. Σύμφωνα με την εξίσωση των μη εμπορεύσιμων ζημιών κάθε περιοχή αποδίδει οικολογικές ζημιές ανεξάρτητα από το πού συμβαίνει η ζημιά, γεγονός που σημαίνει ότι οι άνθρωποι αποδίδουν την ίδια αξία στις απώλειες της βιοποικιλότητας, της ανθρώπινης υγείας και της άγριας φύσης, ανεξάρτητα από το αν οι απώλειες αυτές συμβαίνουν εντός ή εκτός των δικών τους ορίων.

Market damage function:

$$Dt,r = d1,r \cdot \Delta ATt,r^{d2,n} \cdot GDPt,r ,$$

όπου Dt,n : οικονομικές ζημιές για την περίοδο (t) και τη περιοχή (n), ΔAT : η μεταβολή της πραγματικής θερμοκρασίας; $d1,r$ και $d2,r$ είναι παράμετροι ζημιών

$$\text{Non-market damage function: } WTPt,r = \frac{d3,r \cdot \Delta ATt,r^{d4,r}}{1 + 100 \cdot \exp\left(\frac{-0,23 \cdot GDPt,r}{Pop_{t,r}}\right)}$$

όπου WTP είναι η πρόθεση για να ξοδευτούν χρήματα για μη εμπορικά αγαθά (*willingness-to-pay for non-market goods*), $Pop_{t,r}$: κεφάλαιο, $d3,r$ και $d4,r$ είναι παράμετροι

4.2.13 MIND

Το μοντέλο MIND (Model of Investment and Technological Development) είναι ένα IAM που αναλύει την παγκόσμια οικονομία και επικεντρώνεται περισσότερο στον παράγοντα της ενέργειας (πραγματοποιείται εκτενής αναπαράσταση του ενεργειακού συστήματος, τεχνολογίες και διεργασίες). Στο μοντέλο επιπλέον βρίσκεται ενσωματωμένη και ενδογενής τεχνολογική πρόοδος. Η δομή του μοντέλου συμβάλει στο να αποκτήσει ο εκάστοτε αναλυτής καλύτερη αντίληψη των συνδέσεων μεταξύ των παραγόντων της ενέργειας και της οικονομίας. Μία ανάλυση ευαισθησίας και αξιολόγηση των παραμέτρων του μοντέλου είναι απαραίτητη για να γίνει περισσότερο κατανοητός ο οικονομικός μηχανισμός, όπου στηρίζονται τα κόστη ευκαιρίας (opportunity costs) και ο βέλτιστος συνδυασμός μέτρων μετριασμού της κλιματικής αλλαγής (Edenhofer, 2006; Ortiz and Markandya, 2009). Δεν περιέχει συνάρτηση υπολογισμού των ζημιών (damage function).

4.2.14 RICE

Το μοντέλο RICE (Regional Integrated model of Climate and Economy) είναι ένα δυναμικό μοντέλο όπως και το DICE, με την διαφορά ότι αναλύει την οικονομική δραστηριότητα, υπολογίζει τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου και τις επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής όχι σε παγκόσμιο επίπεδο αλλά σε τοπικό επίπεδο. Πιο συγκεκριμένα, οι περιοχές για τις οποίες αναλύονται όλα τα παραπάνω είναι οι ΗΠΑ, Ιαπωνία, η Κίνα, η Ευρωπαϊκή Ένωση, Πρώην Σοβιετική ένωση, Ινδία, Βραζιλία και

Ινδονησία, (Ortiz and Markandya, 2009). Η τεχνολογική πρόοδος ενσωματώνεται στο μοντέλο εξωγενώς, ενώ η ανάλυση της αβεβαιότητας γίνεται ντετερμινιστικά με την εξέταση διαφορετικών σεναρίων.

$$\text{Damage function: } \Omega(t) = \frac{1 - b_{1,i} \cdot \mu_i(t)^{b_2}}{1 + \theta_{1,i} \cdot T(t)^{\theta_2}}$$

Όπου θ_1 , θ_2 είναι παράμετροι της συνάρτησης ζημιών, $\mu_i(t)$ είναι ο ρυθμός μείωσης των εκπομπών, $b_{1,i}$, b_2 είναι παράμετροι της συνάρτησης του κόστους μείωσης εκπομπών, περιοχές: ($i = 1, \dots, n = USA, Japan, Europe, \dots$), χρονική περίοδο: ($t = 1990, 2000, \dots$)

4.2.15 RICE – 99

Το μοντέλο RICE-99 αποτελεί μια ανανεωμένη έκδοση του RICE. Στην συγκεκριμένη έκδοση συμπεριλαμβάνονται τρία επιπλέον χαρακτηριστικά που αφορούν την ενέργεια και τις εκπομπές. Πρόκειται για την εισαγωγή μίας νέας παραμέτρου το μοντέλου άνθρακα-ενέργειας, η οποία εκπροσωπεί την ισοδύναμη σε άνθρακα ενεργειακή κατανάλωση (the carbon equivalent of energy consumption), την ενσωμάτωση μιας αναθεωρημένης αντιμετώπισης των ενεργειακών πόρων οι οποίοι δεν θεωρούνται πλέον ως ανεξάντλητοι και την εισαγωγή μίας πιο λεπτομερείς κλιματικής ενότητας (climate module), (Buonanno et al., 2003).

$$\text{Damage function: } \Omega(t) = \frac{1 - b_{1,i} \cdot \mu_i(t)^2}{1 + D(t)}, \quad D(t) = \theta_1 \cdot T(t) + \theta_2 \cdot T(t)^2$$

Όπου $T(t)$ είναι η μέση θερμοκρασία, το θ_i είναι παράμετρος της συνάρτησης ζημιών, $\mu_i(t)$ είναι ο ρυθμός ελέγχου της κλιματικής αλλαγής, χρονική περίοδος: ($t = 1990, 2000, \dots$), b_i είναι παράμετρος της συνάρτησης του κόστους μείωσης εκπομπών

4.2.16 WITCH

Το μοντέλο WITCH (World Induced Technical Change Hybrid Model) συνδυάζει ένα top-down μοντέλο βέλτιστης ανάπτυξης με ένα bottom-up μοντέλο ενεργειακού συστήματος. Όπως και το FEEM-RICE μοντέλο, έτσι κι αυτό έχει ενδογενής τεχνολογική πρόοδο για την παραγωγή ενέργειας αλλά και για τις ενεργειακές χρήσεις

του συστήματος. Το bottom-up τμήμα του μοντέλου εισάγει τον μηχανισμό “Learning-by-doing” για τις τεχνολογίες παραγωγής ενέργειας, ενώ το top-down τμήμα ενσωματώνει τη γνώση που προκύπτει από την έρευνα και την ανάπτυξη (R&D) υπολογίζοντας την συνεισφορά της στην ενεργειακή απόδοση του συστήματος. Στο συγκεκριμένο μοντέλο, όπως φυσικά και στα υπόλοιπα, υπάρχει και μία ενότητα για την ανάλυση του κλίματος (climate module). Η τελευταία υπολογίζει τις συγκεντρώσεις του CO₂ και τις μέσες θερμοκρασίες του περιβάλλοντος ως συνέπεια της χρήσης ορυκτών καυσίμων. Τα αποτελέσματα της κλιματικής ενότητας εισάγονται ως εισροές στην οικονομική ενότητα για τον υπολογισμό των επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής μέσω μιας συνάρτησης υπολογισμού των νομισματικών ζημιών. Το WITCH πραγματοποιεί την παραπάνω ανάλυση για δώδεκα περιοχές. Στο συγκεκριμένο μοντέλο απαιτείται ντετερμινιστική ανάλυση για τον προσδιορισμό της αβεβαιότητας (Bosetti et al., 2007), ενώ σε μια μεταγενέστερη έκδοση πραγματοποιείται και στοχαστική ανάλυση Monte Carlo (Bosetti et al., 2009).

$$\text{Damage function: } \Omega(t) = \frac{1}{1+\theta_1 n.T(t)+\theta_2 n.T(t)^2}$$

όπου θ_1, θ_2 είναι οι παράμετροι ζημιών του Nordhaus, T : μέση θερμοκρασία, χρονική περίοδος: ($t = 1990, 2000, \dots$), n : περιοχή

4.3 Ανάλυση

Στην παρούσα εργασία μελετήθηκε ένα βασικό σύνολο των μοντέλων αυτής της κατηγορίας. Στον Πίνακα 3 παρουσιάζονται πληροφορίες σχετικά με την προοπτική των μοντέλων, τον αριθμό των περιφερειών που εξετάζουν, την περίοδο πρόβλεψης που μπορούν να καλύψουν και την συνάρτηση υπολογισμού των ζημιών (damage function) του κάθε ένα από αυτά. Η βασική λειτουργία των συναρτήσεων υπολογισμού των ζημιών είναι να μεταφράζουν την ένταση των κλιματικών αλλαγών σε νομισματικούς όρους. Η προοπτική του μοντέλου περιγράφει τη συνολική προσέγγιση του πλαισίου μοντελοποίησης. Η προσέγγιση top-down εξετάζει το σύνολο του συστήματος και χρησιμοποιεί οικονομικές σχέσεις συμπεριφοράς μεταξύ των εξεταζόμενων υποσυστημάτων, ενώ οι προσεγγίσεις bottom-up αναπτύσσονται από τεχνική άποψη αρχίζοντας με λεπτομερή ανάλυση του τομέα του ενδιαφέροντος και

στη συνέχεια επεκτείνουν την εστίαση τους σε όλο το σύστημα. Άλλες προοπτικές είναι πιο ευέλικτες και μπορούν να περιγραφούν ως εξελιγμένες από μια υβριδική προοπτική. Οι υβριδικές προοπτικές συνδυάζουν διαφορετικά επίπεδα λεπτομέρειας για συγκεκριμένους τομείς ή για το συνολικό σύστημα. Μία συγκεκριμένη τάξη υβριδικών μοντέλων είναι τα μοντέλα οικονομικής και τεχνολογικής δομής, τα οποία συνδυάζουν μακροοικονομικές θεμελιώσεις συμπεριφοράς με αναπτυγμένη λεπτομέρεια μηχανικής και τεχνολογίας (βλ. για παράδειγμα, ενότητα 7).

Πίνακας 3 Ανασκόπηση των μοντέλων Βέλτιστης Ανάπτυξης

Μοντέλο	Οικονομική δομή	Πεδίο Γεωγραφικής Κάλυψης	Περίοδος προσομοίωσης	Κλιματικές επιπτώσεις στην οικονομία (συναρτήσεις ζημιάς)
AD-FAIR	top-down	Περιφερειακό (17)	2010-2100	$\frac{GDr,t}{Yr,t} = a1, r. \Delta Tt + a2, r. \Delta Tt^{a3, r},$ $a1, a2, a3:$ παράμετροι ζημιών, $t:$ περίοδος, $r:$ περιοχές, ΔT μεταβολή της θερμοκρασίας, $Y:$ ΑΕΠ
AIM/Dynamic Global	top-down	Παγκόσμιο (6 περιοχές)	1995-2100	Ξεχωριστά μοντέλα ανά τομέα
AIM/Enduse	bottom-up	Εθνικό (Ιαπωνία)	2005-2050	Δεν υπάρχει ενσωματωμένη οικονομική μονάδα
CETA-M	hybrid	Περιφερειακό (OECD, ROW)	2000-2150	$Ct = a.Lt.T^\lambda,$ $T:$ αύξηση της θερμοκρασίας μετά την προ-βιομηχανική εποχή, $\lambda:$ παράμετρος $t:$ περίοδος, $C:$ ετήσιο κόστος υπερθέρμανσης, $a:$ βαθμωτή σταθερά., $L:$ εργασία
DEMETER-1 & DEMETER-1CCS	top-down & bottom-up	Παγκόσμιο	150 χρόνια	Δεν υπάρχει ενσωματωμένη συνάρτηση ζημιών
DICE	top-down	Παγκόσμιο	1985-2105	$R = \frac{1}{1+0,00284.T^2},$ $T:$ παγκόσμια θερμοκρασία
DICE-2007	top-down	Παγκόσμιο	έως 2200	$\frac{D(t)}{Y} = 1 - \frac{1}{1+\eta.T^B},$ $\frac{D(t)}{Y}:$ κλασματική μείωση της παραγωγής, $B=2$ $\eta = \eta$ μη-καταστρ ζημ+ η καταστρ ζημι = 0.28% $T:$ παγκόσμια υπερθέρμανση σε σχέση με την προ-βιομηχανική για πολύ μικρές τιμές του $\eta.T^B$ προκύπτει: $\frac{D(t)}{Y} \approx \eta.T^B$
ENTICE	top-down	Παγκόσμιο	2000-2300	$\Omega t = \frac{1}{1+a1+Tt+a2.Tt^2},$ $T:$ παγκόσμια θερμοκρασία, $t:$ περίοδος, $a1$ & $a2:$ παράμετροι ζημιών

Μοντέλο	Οικονομική δομή	Πεδίο Γεωγραφικής Κάλυψης	Περίοδος προσομοίωσης	Κλιματικές επιπτώσεις στην οικονομία (συναρτήσεις ζημιάς)
FAIR2.1	top-down	Περιφερειακό (7)	2005-2250	$Y_t = A \cdot K t^a \cdot L t^{(1-a)}, K_{t+1} = K_t - n \cdot K_t + I_t, t: \text{period},$ $Y: \text{GDP}, K: \text{κεφάλαια}, L: \text{εργασία}, I: \text{επενδύσεις},$ $n: \text{απόσβεση}, a: \text{ελαστικότητα της παραγωγής (capital elasticity of production)}$
FEEM-RICE	top-down	Περιφερειακό (10)	έως 2200	$\Omega(n, t) = \frac{1 - b_1 \cdot n \cdot \mu(n, t)^{b_2}}{1 + \theta_1 \cdot \frac{1}{\exp(SAD(n, t))} \cdot \frac{T(t)^{\theta_2}}{2.5}}$ <p> <i>T: παγκόσμια θερμοκρασία</i> <i>$\theta_1, \theta_2, \theta_3, b_1$ και b_2, n: οι παράμετροι του Nordhause.</i> <i>n: περιοχή t: περίοδος, SAD: αποθέματα κεφαλαίων που προορίζονται για προσαρμογή (stock of capital devoted to adaptation)</i> <i>μ: κόστος μείωσης της κλιματικής αλλαγής</i> </p>
GRAPE	top-down	Περιφερειακό (10)	2000-2100	$R = \frac{1}{1 + 0,00284 \cdot T^2}$ <p><i>T: παγκόσμια θερμοκρασία</i></p>
MERGE	hybrid	Περιφερειακό (5)	2000-2150	<p><i>Ζημιές στην Αγορά (Market damages)</i></p> $D_t, r = d_1, r \cdot \Delta T_t, r^{d_2, n} \cdot GDP_t, r$ <p><i>ΔT: μεταβολή στην θερμοκρασία, t: περίοδος, r: περιοχή, GDP: ΑΕΠ</i></p> <p><i>Ζημιές εκτός αγοράς (non market)</i></p> $WTP_t, r = \frac{d_3, r \cdot \Delta T_t, r^{d_4, r}}{1 + 100 \cdot \exp\left(\frac{-0,23 \cdot GDP_t, r}{Pop_t, r}\right)}$ <p> <i>Pop_{t, r}: κεφάλαιο</i> <i>d_1, d_2, d_3, d_4: παράμετροι ζημιών</i> </p>
MIND	top-down	Παγκόσμιο	1995-2300	<i>δεν υπάρχει ενσωματωμένη συνάρτηση ζημιών</i>
RICE- 1994	top-down	Περιφερειακό (10)	1990-2200	$\Omega(t) = \frac{1 - b_1 \cdot i \cdot \mu_i(t)^{b_2}}{1 + \theta_1 \cdot i \cdot T(t)^{\theta_2}}$ <p> <i>T: παγκόσμια θερμοκρασία, t: περίοδος, r: περιοχή,</i> <i>μ: ρυθμός μείωσης εκπομπών</i> <i>b_1, b_2: παράμετροι της συνάρτησης του κόστους μείωσης εκπομπών</i> <i>θ_1, θ_2: παράμετροι της συνάρτησης ζημιών</i> </p>

Μοντέλο	Οικονομική δομή	Πεδίο Γεωγραφικής Κάλυψης	Περίοδος προσομοίωσης	Κλιματικές επιπτώσεις στην οικονομία (συναρτήσεις ζημιάς)
RICE-99	top-down	Περιφερειακό (8)	1995-2105	$\Omega(t) = \frac{1-b1.\mu(t)^2}{1+D(t)}, D(t) = \theta1.T(t) + \theta2.T(t)^2$ <i>T: παγκόσμια θερμοκρασία, μ: ρυθμός ελέγχου, $\theta1, \theta2$: παράμετροι της συνάρτησης ζημιών <i>b</i>: παράμετρος της συνάρτησης κόστους μείωσης εκπομπών , $t=1990, 2000, \dots$</i>
WITCH	hybrid	Περιφερειακό (12)	2000-2150	$\Omega t = \frac{1}{1+\theta1,n.Tt+\theta2,n.Tt^2}$ <i>T: παγκόσμια θερμοκρασία, t: περίοδος, n: περιοχή, $\theta1,n$ & $\theta2,n$: παράμετροι ζημιών</i>

Τα περισσότερα δομικά πλαίσια των μοντέλων αυτής της κατηγορίας είναι προσεγγίσεις top-down, με εξαίρεση το AIM / Enduse, το οποίο μπορεί επίσης να θεωρηθεί και ως μη ολοκληρωμένο μοντέλο αξιολόγησης (not IAM's), καθώς δεν συμπεριλαμβάνει καμία οικονομική ενότητα. Τα μοντέλα CETA-M, WITCH και MERGE χαρακτηρίζονται από μια προοπτική υβριδικού μοντέλου, ενώ το DEMETER-1 (CCS) είναι ένα κλασικό μοντέλο top-down, το οποίο ενσωματώνει στοιχεία από bottom-up προσέγγισης σχετικά με την εξέλιξη της μάθησης μέσω της πρακτικής εμπειρίας (learning-by-doing), όπως αναφέρεται στην βιβλιογραφία (Ortiz and Markandya, 2009).

Οι συναρτήσεις των ζημιών στα DICE-2007, MERGE, RICE, WITCH και AD-FAIR προέρχονται από τις εκτιμήσεις του Nordhaus και των συνεργατών του. Βάση αυτών, οι νομισματικές ζημιές λόγω της κλιματικής αλλαγής υπολογίζονται από μία συνάρτηση που εξαρτάται από την αύξηση της παγκόσμιας μέσης θερμοκρασίας (GTM). Η συνάρτηση αυτή χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό των επιπτώσεων που προκαλούνται σε όλους τους οικονομικούς τομείς που εξετάζονται, με την προϋπόθεσή της ύπαρξης βέλτιστης προσαρμογής στις κλιματικές αλλαγές. Η βασική πρόοδος που παρατηρείται σε σύγκριση με τις προηγούμενες εκδόσεις των μοντέλων DICE/RICE και των παράγωγων τους, είναι ότι οι πρόσφατες εκτιμήσεις των ζημιών βασίζονται σε ένα ευρύτερο φάσμα μελετών οι οποίες συμπεριλαμβάνουν περισσότερες εκτιμήσεις για περιοχές εκτός των Ηνωμένων Πολιτειών. Η συνάρτηση των επιπτώσεων του

GRAPE έχει την ίδια μορφή με εκείνη του RICE αλλά εφαρμόζει κάπως διαφορετικές (και μόνο μερικώς τεκμηριωμένες) παραμέτρους.

Όσο αφορά την εξέλιξη της τεχνολογίας, όλα τα μοντέλα βέλτιστης ανάπτυξης μεταξύ των εξεταζόμενων υποθέτουν εξωγενείς τεχνολογική πρόοδο, ενώ τα περισσότερα ενσωματώνουν επίσης και παραμέτρους που προσεγγίζονται ενδογενώς. Το μοντέλο WITCH φαίνεται να αποτελεί η μοναδική εξαίρεση στην κατηγορία επειδή η τεχνολογία σε αυτό εξελίσσεται αποκλειστικά ενδογενώς (Πίνακας 4). Σε αντίθεση με την προγενέστερη έκδοση του DICE, στο τελευταίο μοντέλο DICE-2007 (Nordhaus, 2008) και οι δύο μορφές τεχνολογικών αλλαγών που λαμβάνονται είναι εξωγενείς. Αυτό μπορεί να αποτελέσει σοβαρό περιορισμό στους υπολογισμούς και ειδικά σε όσους αφορούν τις τεχνολογικές αλλαγές εξοικονόμησης άνθρακα που προκαλούνται από τις μεταβολές των τιμών του άνθρακα.

Πίνακας 4 Τεχνολογική Πρόοδος και Ανάλυση της Αβεβαιότητας στα μοντέλα Βέλτιστης Ανάπτυξης

Μοντέλο	Τεχνολογική πρόοδος		Ανάλυση της αβεβαιότητας		Παράμετροι αβεβαιότητας
	Ενδογενούς	Εξωγενούς	Ντετερμινιστική	Στοχαστική	
AD-FAIR		✓	ανάλυση ευαισθησίας		τα κόστη των μελλοντικών ζημιών, τα κόστη προσαρμογής (Hof et al., 2009; Hof et al., 2012)
AIM/Dynamic Global	✓	✓	ανάλυση σεναρίων ανάλυση ευαισθησίας		ο ρυθμός κεφαλαιακής απόσβεσης (Xu and Masui, 2009), οι βελτιώσεις της ενεργειακής αποδοτικότητας (Masui et al., 2006)
AIM/Enduse		✓	ανάλυση σεναρίων ανάλυση ευαισθησίας		οι δημογραφικές τάσεις, ο ρυθμός της οικονομικής ανάπτυξης, η βιομηχανική δομή και η μεταφορά εμπορευμάτων, ο απαιτούμενος χώρος γραφείων, οι μεταφορές (Kainuma et al., 2000), η διαθεσιμότητα, οι επιδόσεις και το κόστος των νέων τεχνολογιών (Akashi et al., 2012)

Μοντέλο	Τεχνολογική πρόοδος		Ανάλυση της αβεβαιότητας		Παράμετροι αβεβαιότητας
	Ενδογενούς	Εξωγενούς	Ντετερμινιστική	Στοχαστική	
CETA-M		✓	ανάλυση σεναρίων ανάλυση ευαισθησίας		το ποσοστό βελτίωσης της ενεργειακής αποδοτικότητας, τα αποθέματα ορυκτών καυσίμων, τα ηλεκτρικά και μη ηλεκτρικά έξοδα backstop technologies, η θέρμανση ανά εκπομπές, τα κόστη μείωσης, οι εξωγενείς εκπομπές, ο κύκλος του άνθρακα, η εργασία, ο ρυθμό ανάπτυξης, τα προεξοφλητικά επιτόκια(discount rates) (Peck and Teisberg, 2013)
DEMETER-1 & DEMETER-1CCS	✓	✓	ανάλυση σεναρίων ανάλυση ευαισθησίας		τα κόστη CCS (αποθήκευσης και μεταφοράς άνθρακα) (Gerlagh and van der Zwaan, 2006)
DICE	✓	✓	ανάλυση ευαισθησίας	Monte Carlo ανάλυση	όλες οι παράμετροι του μοντέλου (το ποσοστό της απόσβεσης κεφαλαίου, η ελαστικότητα της παραγωγής, το ποσοστό μεταφοράς του CO ₂ , το καθαρό ποσοστό της κοινωνικής προτίμησης.) (Nordhaus and Yang, 1996), η ευαισθησία του κλίματος (Ackerman et al., 2010)
DICE-2007		✓		Monte Carlo ανάλυση	ο συνολικός παράγοντας της παραγωγικότητας, ο ρυθμός μείωσης του άνθρακα, η αύξηση του πληθυσμού, το κόστος των τεχνολογιών backstop, η παράμετρος των ζημιών, το κλάσμα της συγκράτησης διοξειδίου του άνθρακα στην ατμόσφαιρα, ο συντελεστής ευαισθησίας της θερμοκρασίας και η συνολική διαθεσιμότητα των υγρών καυσίμων (Nordhaus, 2007)

Μοντέλο	Τεχνολογική πρόοδος		Ανάλυση της αβεβαιότητας		Παράμετροι αβεβαιότητας
	Ενδογενούς	Εξωγενούς	Ντετερμινιστική	Στοχαστική	
ENTICE	✓	✓	ανάλυση σεναρίων ανάλυση ευαισθησίας		το κόστος ευκαιρίας της R&D, η απόκλιση μεταξύ των ιδιωτικών και των κοινωνικών συντελεστών απόδοσης των επενδύσεων σε R&D, η απόδοση της R&D στον τομέα της ενέργειας, η ελαστικότητα της R&D, η εξωγενής μείωση της έντασης της ρύπανσης (Popp, 2004)
FAIR2.1		✓	ανάλυση σεναρίων		η ευαισθησία του κλίματος, τα κόστη μετριασμού, τα κόστη των ζημιών, τα προεξοφλητικά επιτόκια, ο χρονικός ορίζοντας (Hof et al., 2008)
FEEM-RICE	✓	✓	ανάλυση ευαισθησίας		τα προεξοφλητικά επιτόκια, οι ζημιές λόγω της κλιματικής αλλαγής (Bosello, 2010)
GRAPE		✓	ανάλυση σεναρίων		τα κόστη CCS (carbon transport and storage) (Kurosawa, 2004)
MERGE		✓	ανάλυση σεναρίων (2005 version); Ανάλυση ευαισθησίας	Monte Carlo ανάλυση (έκδοση 2008); Ανάλυση ευαισθησίας	η αποδοτικότητα της τιμολόγησης του άνθρακα (efficiency price of carbon), οι στρατηγικές μετριασμού (Manne and Richels, 2005), η ευαισθησία του κλίματος, η αξία του άνθρακα (carbon value) (Kypreos, 2008)
MIND	✓	✓	ανάλυση ευαισθησίας		το κόστος των πόρων, της εργασίας και της R&D, η ενεργειακή R&D, ο ρυθμός μάθησης (learning rate) (Edenhofer et al., 2005)
RICE- 1994		✓	ανάλυση ευαισθησίας		όλες οι παράμετροι του μοντέλου (το ποσοστό απόσβεσης κεφαλαίου, η ελαστικότητα της παραγωγής, ο ρυθμός μεταφοράς του CO ₂ , το ποσοστό της κοινωνικής προτίμησης, etc.) (Nordhaus and Yang, 1996)

Μοντέλο	Τεχνολογική πρόοδος		Ανάλυση της αβεβαιότητας		Παράμετροι αβεβαιότητας
	Ενδογενούς	Εξωγενούς	Ντετερμινιστική	Στοχαστική	
RICE-99		✓	ανάλυση σεναρίων		ο ρυθμός αύξησης του πληθυσμού, ο παράγοντας της συνολικής παραγωγικότητας, η ενεργειακή αποτελεσματικότητα, οι αλλαγές στη χρήση γης, η ευαισθησία του κλίματος, το προεξοφλητικό επιτόκιο (Von Below and Persson, 2008)
WITCH	✓		ανάλυση σεναρίων έκδοση 2005	Monte Carlo ανάλυση (έκδοση 2008)	το κόστος μετριασμού (Bosetti et al., 2008)

Όπως φαίνεται στον Πίνακα 4 τα περισσότερα μοντέλα που εξετάζονται προσεγγίζουν την αβεβαιότητα με ντετερμινιστικό τρόπο: με ανάλυση σεναρίων ή με ανάλυση ευαισθησίας των παραμέτρων, ή και με τις δυο τεχνικές. Μερικά μοντέλα, όπως το DICE και το DICE-2007, εισάγουν στην ανάλυση της αβεβαιότητας και στοχαστική ανάλυση Monte Carlo (e.g. Nordhaus, 2007; Ackerman et al., 2010). Επιπλέον, τα μοντέλα αξιολόγησης MERGE και WITCH αναβαθμίστηκαν στις εκδόσεις τους για το 2008 ώστε να συμπεριλάβουν και την ανάλυση Monte Carlo στην αντιμετώπιση της αβεβαιότητας.

4.4 Το παγκόσμιο μοντέλο DICE

Το παγκόσμιο μοντέλο DICE (Dynamic Integrated Climate Economy), (Nordhaus και Yang, 1996) επιλέγεται στην παρούσα εργασία ως αντιπροσωπευτικό μοντέλο αυτής της κατηγορίας. Στο DICE οι οικονομικοί παράγοντες των περιοχών δεν αναλύονται ξεχωριστά για κάθε μία περιοχή, αλλά συγκεντρώνονται σε ένα ενιαίο επίπεδο παραγωγής, μετοχικού κεφαλαίου, τεχνολογίας και εκπομπών. Η πραγματοποίηση ξεχωριστής ανάλυσης της οικονομίας σε επίπεδο περιοχών εισάγεται στο RICE, το οποίο αποτελεί μια πολύ-περιφερειακή έκδοση του DICE. Η συνάρτηση της κοινωνικής ευημερίας υπολογίζει το σαφώς καθορισμένο σύνολο προτιμήσεων των καταναλωτών παγκοσμίως και ως αποτέλεσμα αυτού προσδιορίζει τις διαφορετικές πορείες κατανάλωσης που θα ακολουθηθούν. Το μοντέλο θέτει την ευημερία να αυξάνεται κατά κεφαλήν κατανάλωσης για κάθε γενιά, μειώνοντας συγχρόνως την

οριακή χρησιμότητα της κατανάλωσης. Δηλαδή, όσο περισσότερο καταναλώνει κανείς (ή όσο πλουσιότερος είναι), τόσο το λιγότερο πολύτιμη είναι μια επιπλέον μονάδα κατανάλωσης. Έτσι υποθέτοντας ότι οι μελλοντικές γενιές θα είναι πλουσιότερες από τις σημερινές, συνεπάγεται ότι η πρόσθετη κατανάλωση για αυτές θα είναι λιγότερο πολύτιμη από όσο είναι για τις σημερινές. Το μοντέλο διαθέτει δύο κεντρικές κανονιστικές παραμέτρους οι οποίες καθορίζουν τη σχετική βαρύτητα που δίνεται σε κάθε γενιά. Έτσι υπολογίζεται ο καθαρός ρυθμός των προτιμήσεων των καταναλωτών για διαφορετικές χρονικές περιόδους. Πρόκειται για μια υποκειμενική στάθμιση της κατανάλωσης για διαφορετικούς χρόνους. Όταν προκύπτει μια θετική τιμή συνεπάγεται ότι η άμεση κατανάλωση έχει εκτιμηθεί υψηλότερα από ότι η μελλοντική κατανάλωση. Αυτό συνήθως συμβαίνει όταν υπάρχει αυξημένη μεροληψία προς την παρούσα κατανάλωση. Επίσης υπολογίζεται η ελαστικότητα της οριακής χρησιμότητας της κατανάλωσης, η οποία δείχνει κατά πόσες επιπλέον μονάδες πέφτει αξία της χρησιμότητας σε σχέση με την αύξηση της κατανάλωσης. Για παράδειγμα, αν υποθέσουμε δεδομένη αύξηση της κατανάλωσης με την πάροδο του χρόνου, τότε εάν προκύψει μια μεγάλη τιμή της ελαστικότητας αυτό θα σημαίνει ότι μια πρόσθετη μονάδα κατανάλωσης έχει μεγαλύτερη αξία σήμερα από ότι θα έχει στο μέλλον.

Οι δύο βασικές μεταβλητές απόφασης για την οικονομία που χρησιμοποιεί το μοντέλο είναι το συνολικό ποσοστό αποταμίευσης για το φυσικό κεφάλαιο και ο ρυθμός ελέγχου των εκπομπών των αερίων του θερμοκηπίου. Συγκεκριμένα, η κατανάλωση θεωρείται ευρέως διαδεδομένη και περιλαμβάνει τα τρόφιμα, τα ακίνητα, τις περιβαλλοντικές ανέσεις και τις υπηρεσίες, ενώ η παραγωγή των προϊόντων και των υπηρεσιών αντιπροσωπεύεται από μια συνάρτηση παραγωγής κεφαλαίου Cobb-Douglas, καθώς επίσης και από την εργασία και την ενέργεια. Όσο αφορά την ενέργεια εξετάζονται δύο είδη: την κατανάλωση καυσίμων και ενέργειας που προέρχονται από άνθρακα και την κατανάλωση ενέργειας που προέρχεται από τεχνολογίες που δεν βασίζονται σε άνθρακα. Η τεχνολογική πρόοδος εισάγει νέες τεχνολογίες στην αγορά, οι οποίες αλλάζουν τα δεδομένα στην οικονομία και στην παραγωγή και κατανάλωση ενέργειας. Οι αλλαγές αυτές σχετίζονται με την μείωση της κατανάλωσης ενέργειας και κατ' επέκταση μείωση της χρήσης άνθρακα και της παραγωγής εκπομπών και δημιουργούν μεταβολές σε ολόκληρη την οικονομία.

Το χαρακτηριστικό που αναβαθμίζει το DICE-2007 από ένα απλό μοντέλο βέλτιστης ανάπτυξης σε ένα πλήρως ολοκληρωμένο μοντέλο αξιολόγησης είναι η σύνδεση ορισμένων γεωφυσικών σχέσεων που αποτυπώνουν τις επιπτώσεις της αλλαγής του κλίματος στην οικονομία. Οι σχέσεις αυτές συμπεριλαμβάνουν τον υπολογισμό του κύκλου του άνθρακα, μια εξίσωση υπολογισμού της ακτινοβολίας του ήλιου, τις εξισώσεις εκτίμησης της κλιματικής αλλαγής και μια εξίσωση υπολογισμού των οικονομικών ζημιών που προκύπτουν λόγω της κλιματικής αλλαγής. Σε αυτό το μοντέλο οι βιομηχανικές εκπομπές CO₂ αποτελούν το μοναδικό αέριο του θερμοκηπίου που μπορεί να τεθεί υπό έλεγχο και η συγκέντρωση του ποικίλλει ανάλογα με τη συνολική παραγωγή, τη χρονικά μεταβαλλόμενη αναλογία εκπομπών-εκροών και τον ρυθμό ελέγχου των εκπομπών. Το κόστος που συνεπάγεται από την λήψη αυστηρότερων πολιτικών για το κλίμα εκτιμάται σαν ποσοστό μείωσης της παραγωγής. Η εξίσωση της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας υπολογίζει τον αντίκτυπο της συσσώρευσης των αερίων του θερμοκηπίου στην ισορροπία της ακτινοβολίας στον πλανήτη. Οι κλιματικές εξισώσεις που αντλούν δεδομένα από τα μοντέλα γενικής κυκλοφορίας υπολογίζουν τη μέση θερμοκρασία της επιφάνειας του πλανήτη και τη μέση θερμοκρασία των πυθμένων των ωκεανών. Η εξίσωση των κλιματικών ζημιών μεταφράζει την αλλαγή του κλίματος σε οικονομικές ζημιές αξιοποιώντας τις εκτιμήσεις των οικονομικών επιπτώσεων από άλλες μελέτες.

5

Μοντέλα Γενικής Ισορροπίας (CGE)

5.1 Εισαγωγή

Σε αυτή τη κατηγορία παρουσιάζεται η βασική δομή των μοντέλων γενικής ισορροπίας, τα οποία χρησιμοποιούνται ευρέως για την απεικόνιση των αλληλεπιδράσεων μεταξύ κλίματος και οικονομίας (Wing, 2011). Τα μοντέλα CGE αποτελούν μια αλγεβρική απεικόνιση της περίπλοκης λειτουργίας της οικονομίας της αγοράς και βασίζονται σε ένα κεντρικό αφηρημένο θεωρητικό υπόβαθρο, το οποίο περιγράφει πως λειτουργεί ένα αποκεντρωμένο σύστημα τιμών. Συγκεκριμένα, τα μοντέλα θεωρούν ότι οι καταναλωτές δημιουργούν τη ζήτηση των αγαθών και μεγιστοποιούν τη χρησιμότητά τους, ενώ οι παραγωγοί προμηθεύουν τα αγαθά με μέγιστο κέρδος και σε τιμές που οδηγούν τις αγορές σε ισορροπία. Τα μοντέλα αυτά χαρακτηρίζονται ως υπολογιστικά επειδή διεξάγουν τη διαδικασία προσομοίωσης του πραγματικού κόσμου, με την χρήση αριθμητικών παραμέτρων οι οποίες αντλούνται από τα διαθέσιμα οικονομικά δεδομένα. Συνήθως οι παράμετροι για τις οποίες επιλύεται η διαδικασία αυτή είναι οι τιμές ισορροπίας και τα επίπεδα ζήτησης και προσφοράς. Ένα μεγάλο μέρος των οικονομικών δεδομένων προέρχονται από τους εθνικούς λογαριασμούς των περιφερειών για ένα συγκεκριμένο έτος. Εκεί παρέχονται οι απαιτούμενες πληροφορίες για τις δαπάνες των καταναλωτών που πραγματοποιήθηκαν για αγαθά και υπηρεσίες ανά τομέα παραγωγής, καθώς και για τα μερίδια παραγωγής όλων των παραγωγών. Ένα άλλο μέρος των δεδομένων που χρησιμοποιούνται είναι τα δεδομένα που προσδιορίζουν την ελαστικότητα των τιμών που σχετίζεται με τις απαιτήσεις της αγοράς και των διαθέσιμων προϊόντων. Αυτά τα δεδομένα προέρχονται συνήθως από μία εμπειρική εργασία που αναλύει τον τρόπο με τον οποίο οι καταναλωτές ανταποκρίνονται στις μεταβολές των τιμών. Με τη χρήση δεδομένων εθνικών λογαριασμών και ελαστικότητας οι παράμετροι των εξισώσεων CGE «βαθμονομούνται», έτσι ώστε η επίλυση ισορροπίας του αριθμητικού μοντέλου να αναπαράγει επακριβώς τα δεδομένα μιας πραγματικής οικονομίας, για ένα δεδομένο έτος.

Γενικά η ανάλυση των πολιτικών αποφάσεων για το κλίμα με χρήση CGE μοντέλων γίνεται με τον υπολογισμό των νέων ισορροπιών της αγοράς που θα επέλθουν έπειτα από την αλλαγή διαφόρων εξωγενών παραμέτρων της οικονομίας. Οι αλλαγές αυτές αποτελούν τις συνέπειες των πολιτικών αποφάσεων για το κλίμα. Η σύγκριση των συντελεστών της νέας αντισταθμιστικής ισορροπίας με τους αρχικούς συντελεστές ισορροπίας, όπως είναι το επίπεδο των τιμών, το επίπεδο δραστηριότητας καθώς και το επίπεδο χρησιμότητας, παρέχει πληροφορίες για την επίδραση ενός «σοκ» στην οικονομία.

Ένα από τα βασικά πλεονεκτήματα των CGE μοντέλων είναι η μοντελοποίηση των αλληλεπιδράσεων μεταξύ των διαφόρων τομέων της οικονομίας. Η μοντελοποίηση αυτή παρέχει την δυνατότητα να καταγράφουν όχι μόνο οι άμεσες επιπτώσεις μιας πολιτικής σε έναν τομέα της οικονομίας, αλλά να εντοπιστεί και η συνολική της επίδραση στους υπόλοιπους αλληλεξαρτώμενους τομείς της οικονομίας (γενική ισορροπία). Με αυτό το τρόπο υπολογίζεται η συνολική μεταβολή που επέρχεται στην κατανάλωση (ή στην χρησιμότητα), η οποία αποτελεί μέτρο σύγκρισης του αντίκτυπου στην ευημερία. Έτσι για παράδειγμα, ο φόρος του άνθρακα δεν θα αυξήσει μόνο το κόστος ορισμένων μορφών ενέργειας, αλλά θα επηρεάσει επίσης τη ζήτηση και την προσφορά άλλων αγαθών που σχετίζονται με την χρήση ενέργειας. Η δυνατότητα αυτή αποτελεί ένα από τα κύρια πλεονεκτήματα αυτών των μοντέλων σε σχέση με τα μοντέλα μερικής ισορροπίας, τα οποία επικεντρώνονται σε έναν ενιαίο τομέα ή σε σχέση με άλλα μοντέλα που δεν διαθέτουν λεπτομερή πολύ-τομεακή αναπαράσταση της οικονομίας. Για παράδειγμα, τα μοντέλα βέλτιστης ανάπτυξης που μοντελοποιούν την οικονομία ως ενιαίο τομέα δεν μπορούν να καταγράψουν αυτές τις γενικές επιδράσεις ισορροπίας, παρά το γεγονός ότι εστιάζουν στην ευρύτερη κατανόηση της μακροπρόθεσμης δυναμικής. Μια επισκόπηση των αναθεωρημένων μοντέλων CGE μπορεί να βρεθεί στον Πίνακα 5.

Τα μοντέλα CGE παραδοσιακά επικεντρώνονται στην αξιολόγηση κόστους. Τα κόστη που μελετώνται συχνότερα είναι το κόστος μείωσης των εκπομπών, το κόστος της εφαρμογής των εναλλακτικών πολιτικών μετριασμού και το κόστος των ζημιών που προκαλούνται από την κλιματική αλλαγή. Ιδιαίτερη προσοχή επίσης δίδεται στην εξέταση του κόστους αλλά και του οφέλους της προσαρμογής στις κλιματικές αλλαγές.

Για παράδειγμα, η εξέταση της επίδρασης που θα έχει ο φόρος του άνθρακα στην οικονομία και στις εκπομπές των αερίων του θερμοκηπίου αποτελεί μία τυποποιημένη εφαρμογή για τα CGE μοντέλα. Ο αντίκτυπος πάνω στο διεθνές εμπόριο θα μπορούσε να εξεταστεί από ένα μοντέλο πολλαπλών περιφερειών με διεθνές εμπόριο, το οποίο θα αναδείκνυε τον τρόπο με τον οποίο οι πολιτικές φορολογίας του άνθρακα θα μπορούσαν να αποδώσουν σε περίπτωση που διαφορετικές χώρες εφαρμόζουν διαφορετικούς φορολογικούς συντελεστές (Elliott et al., 2010). Ένας τυπικός τρόπος καταγραφής των επιπτώσεων της αλλαγής του κλίματος από ένα μοντέλο CGE είναι η μοντελοποίηση των απότομων αλλαγών μέσα από διαφορετικές εκδοχές των εξελίξεων στην οικονομία. Οι αυξανόμενες θερμοκρασίες για παράδειγμα, μπορούν να επηρεάσουν τις καταναλωτικές δαπάνες με αύξηση της ζήτησης για κλιματισμό το καλοκαίρι και με μείωση της ζήτησης για θέρμανση του χειμώνα. Η επιρροή αυτή μπορεί να καταγραφεί με την εισαγωγή μιας παραμέτρου «σοκ» στη συνάρτηση δαπανών του αντιπροσωπευτικού καταναλωτή. Η παράμετρος σοκ αυξάνεται ανάλογα με τον βαθμό μείωσης της παραγωγικότητας ψύξης του κλιματισμού λόγω της κλιματικής αλλαγής, οδηγώντας σε αύξηση των δαπανών που απαιτούνται για ένα δεδομένο επίπεδο θερμοκρασίας χώρου με αποτέλεσμα τελικά να επηρεάζει αρνητικά την ευημερία των νοικοκυριών. Με παρόμοιο τρόπο μπορούν να εισαχθούν παράμετροι «σοκ» για να καταγραφούν οι μεταβολές στην παραγωγικότητα των πρωτογενών παραγόντων σε διάφορες βιομηχανίες. Εάν η κλιματική αλλαγή μειώσει (ή αυξήσει) την απόδοση ορισμένων καλλιεργειών, τότε μπορεί να χρησιμοποιηθεί μια παράμετρος «σοκ» για να καταγραφεί η μειωμένη παραγωγικότητα (η το αυξημένο όφελος) στον γεωργικό τομέα.

5.2 Συνοπτική παρουσίαση των μοντέλων γενικής

ισορροπίας

5.2.1 AIM

Το μοντέλο AIM (ολοκληρωμένο μοντέλο Ασίας-Ειρηνικού) είναι ένα αναδρομικό δυναμικό μοντέλο ισορροπίας της παγκόσμιας οικονομίας που χρησιμοποιείται για την ανάλυση των επιπτώσεων των σεναρίων που τέθηκαν από το Κιότο. Το μοντέλο AIM αποτελείται από ένα μοντέλο εκπομπών των αερίων του θερμοκηπίου (AIM /

emission), ένα μοντέλο φαινομένων θέρμανσης (AIM / climate) και ένα μοντέλο επιπτώσεων θέρμανσης (AIM / impact). Πρόκειται για ένα μοντέλο top-down που κατατάσσει τα παραγόμενα αγαθά σε 11 είδη, όπου τα επτά είναι ενεργειακά αγαθά και τα υπόλοιπα τέσσερα είναι μη ενεργειακά αγαθά. Το μοντέλο εξετάζει τρεις τομείς σε κάθε περιοχή: τον τομέας παραγωγής, τον τομέα των νοικοκυριών και τον τομέα της κυβέρνησης. Το CO₂ και τα υπόλοιπα αέρια του θερμοκηπίου παράγονται από όλους τους τομείς. Για παράδειγμα ο τομέας της παραγωγής της ηλεκτρικής ενέργειας και των μη ενεργειακών αγαθών χρησιμοποιεί ορυκτά καύσιμα ως πρώτη ύλη και εκπέμπει ταυτόχρονα ρύπους, ενώ οι τομείς των νοικοκυριών και της κυβέρνησης χρησιμοποιούν ορυκτά καύσιμα για τις μεταφορές και επίσης εκπέμπουν CO₂. Η τεχνολογική πρόοδος θεωρείται εξωγενής, ενώ η αβεβαιότητα προσεγγίζεται ντετερμινιστικά με ανάλυση σεναρίων και ανάλυση ελαστικότητας παραμέτρων.

5.2.2 AIM/Material

Το AIM / Material είναι ένα εθνικό υπολογιστικό μοντέλο γενικής ισορροπίας με αναδρομική δυναμική, το οποίο αναπτύχθηκε για να αξιολογήσει την ενσωμάτωση των πολιτικών για την αλλαγή του κλίματος και τη διαχείριση των αποβλήτων. Πρόκειται για ένα top-down μοντέλο με 41 οικονομικούς τομείς και 49 είδη αγαθών όπου τα στερεά απόβλητα κατηγοριοποιούνται σε 18 τύπους. Το μοντέλο υπολογίζει την ισορροπία του οικονομικού ισολογισμού και του ισολογισμού των υλικών στην παραγωγική δραστηριότητα. Η εφαρμογή του μοντέλου έδειξε ότι η εισαγωγή απορριμμάτων από πλαστικές ύλες, ως δευτερογενή καύσιμα στη βιομηχανία σιδήρου και χάλυβα, αποτελεί μία από τις πλέον αποτελεσματικές επιλογές μείωσης των εκπομπών CO₂, ενώ η εισαγωγή οχημάτων με χαμηλές εκπομπές, ως πολιτικό μέτρο μείωσης των εκπομπών CO₂, έχει αρνητικές επιπτώσεις στο πρόβλημα των αποβλήτων λόγω της παραγωγικής δραστηριότητας που απαιτείται. Η τεχνολογική εξέλιξη στο μοντέλο θεωρείται εξωγενής, ενώ η αβεβαιότητα προσεγγίζεται ντετερμινιστικά με ανάλυση σεναρίων και ανάλυση ελαστικότητας παραμέτρων.

5.2.3 Dynamic GTAP

Το dynamic GTAP είναι ένα πολύ-τομεακό (multi-sector), πολύ-περιφερειακό (multi-region), αναδρομικό, top-down μοντέλο εφαρμοσμένης γενικής ισορροπίας. Πρόκειται

για μια επέκταση του πρότυπου μοντέλου GTAP η οποία συμπεριλαμβάνει τη διεθνή κινητικότητα κεφαλαίου, την ενδογενή συσσώρευση κεφαλαίου και μια θεωρία προσαρμοστικών προσδοκιών για τις επενδύσεις (οι αποφάσεις για επενδύσεις λαμβάνονται βάσει μελλοντικών προσδοκιών η οποίες στηρίζονται σε πρόσφατα ιστορικά δεδομένα). Το μοντέλο είναι κατάλληλο για ανάλυση μεσοπρόθεσμης και μακροπρόθεσμης κλιματικής πολιτικής λόγω της δυναμικής διαδικασίας υπολογισμού των λύσεων της προσομοίωσης. Οι συγκριτικές τιμές των λύσεων της τελικής προσομοίωσης επηρεάζονται δυναμικά από τις χρονικές διαδρομές που οδήγησαν σε αυτές, διότι ο ίδιος ο χρόνος είναι μια μεταβλητή η οποία υπόκειται σε εξωγενείς αλλαγές μαζί με τη συνήθη πολιτική, την τεχνολογία και τις δημογραφικές μεταβλητές. Η αβεβαιότητα προσεγγίζεται με ανάλυση ευαισθησίας των αβέβαιων παραμέτρων.

5.2.4 G-CUBED

Πρόκειται για ένα δυναμικό, διαχρονικό μοντέλο γενικής ισορροπίας της παγκόσμιας οικονομίας που συνδυάζει μακροοικονομικά μοντέλα και υπολογιστικά μοντέλα γενικής ισορροπίας σε ένα ενοποιημένο πλαίσιο μίας top-down δομής. Αποτελείται από οκτώ οικονομικές περιοχές: τις Ηνωμένες Πολιτείες, την Ιαπωνία, την Αυστραλία, το υπόλοιπο του OECD, την Ανατολική Ευρώπη και την πρώην Σοβιετική Ένωση, την Κίνα, τις εξαγωγείς πετρελαίου αναπτυσσόμενες χώρες και όλες τις υπόλοιπες αναπτυσσόμενες χώρες. Σε κάθε περιφέρεια η παραγωγή κατανέμεται σε 12 τομείς: πέντε ενεργειακοί τομείς (ηλεκτρικές επιχειρήσεις, επιχειρήσεις φυσικού αερίου, διύλιση πετρελαίου, εξόρυξη άνθρακα και εξόρυξη αργού πετρελαίου και αερίου) και επτά μη ενεργειακοί κλάδοι (εξόρυξη μη ενεργειακών πόρων, γεωργία, δασοκομία και προϊόντα ξυλείας, διαρκή αγαθά, μη διαρκή αγαθά, μεταφορές και υπηρεσίες). Κάθε οικονομία ή περιοχή του μοντέλου αποτελείται από πολλούς οικονομικούς παράγοντες: τα νοικοκυριά, την κυβέρνηση, τον χρηματοπιστωτικό τομέα και τους 12 τομείς παραγωγής που αναφέρονται παραπάνω. Η τεχνολογική πρόοδος θεωρείται εξωγενής και η αβεβαιότητα προσεγγίζεται ντετερμινιστικά με ανάλυση σεναρίων.

5.2.5 GEM-E3

Το μοντέλο GEM-E3 είναι ένα top-down μοντέλο γενικής ισορροπίας, που περιγράφει την οικονομία, το ενεργειακό σύστημα και το περιβάλλον σε κάθε κράτος μέλος της

Ευρωπαϊκής Ένωσης. Οι εθνικές οικονομίες συνδέονται μεταξύ τους με το ενδογενές εμπόριο. Σε όλες τις χώρες εφαρμόζεται η ίδια δομή μοντέλου, αλλά οι παράμετροι και οι μεταβλητές είναι εξειδικευμένες. Υπάρχουν δεκαοκτώ οικονομικοί τομείς: 4 για την προμήθεια και τη διανομή της ενέργειας και 14 που αντιπροσωπεύουν τους υπόλοιπους κύριους τομείς της οικονομίας. Η συνάρτηση παραγωγής σε κάθε τομέα χρησιμοποιεί την μορφή Σταθερής Ελαστικότητας Υποκατάστασης (CES). Οι δύο βασικοί παράγοντες παραγωγής είναι το κεφάλαιο και η εργασία. Η ανάλυση της αβεβαιότητας προσεγγίζεται στοχαστικά με ανάλυση Monte Carlo ή ντετερμινιστικά με ανάλυση σεναρίων.

5.2.6 GREEN

Το GREEN είναι ένα πολύ-τομεακό, πολύ-περιφερειακό, δυναμικό μοντέλο με bottom-up δομή. Περιλαμβάνει δώδεκα περιοχές (τέσσερις χώρες του OECD/ περιοχές και οκτώ περιοχές εκτός OECD) και δώδεκα αντίστοιχα υπομοντέλα. Το μοντέλο υπογραμμίζει τις σχέσεις μεταξύ της εξάντλησης των ορυκτών καυσίμων, της παραγωγής ενέργειας, της χρήσης ενέργειας και των εκπομπών CO₂. Σε κάθε περιοχή το βασικό μοντέλο αναπτύσσεται βάσει των εξωγενών ρυθμών αύξησης του ΑΕΠ, της αύξησης του πληθυσμού και του βαθμού της τεχνολογικής προόδου στη χρήση ενέργειας. Η μονάδα υπολογισμού της παραγωγής περιλαμβάνει έντεκα τομείς, όπου πέντε από αυτούς αφορούν την παραγωγή και τη διανομή ενέργειας (άνθρακας, πετρέλαιο, φυσικό αέριο και ηλεκτρική ενέργεια) και μπορούν να αντικατασταθούν από τεχνολογίες backstop. Η αβεβαιότητα των παραμέτρων αναλύεται ντετερμινιστικά με ανάλυση σεναρίων.

5.2.7 GTAP-E

Το GTAP-E είναι ένα μοντέλο γενικής ισορροπίας που αποτελείται από 37 βιομηχανίες σε 20 χώρες που ανήκουν σε 10 σύνθετες περιοχές. Το GTAP-E διαφέρει από το πρότυπο μοντέλο GTAP επειδή προσθέτει μια ρητή σύνθετη εισροή κεφαλαίου-ενέργειας στη δομή παραγωγής. Το GTAP-E ενσωματώνει τις εκπομπές του διοξειδίου του άνθρακα από την χρήση ορυκτών καυσίμων καθώς και έναν μηχανισμό για την εμπορία αυτών των εκπομπών σε διεθνές επίπεδο. Το μοντέλο περιλαμβάνει bottom-up engineering προσέγγιση και top-down economic προσέγγιση. Η προσέγγιση bottom-

υρ συχνά αρχίζει με λεπτομερή επεξεργασία των διαδικασιών ή των τεχνολογιών παραγωγής ενέργειας και καταλήγει να υπολογίζει τον πιο αποτελεσματικό τρόπο παραγωγής ενέργειας. Από την άλλη, η προσέγγιση top-down ξεκινά με μια λεπτομερή περιγραφή της μακροοικονομίας και της διεθνούς οικονομίας από όπου στην συνέχεια απορρέει η ζήτηση της ενέργειας που δημιουργείται. Η ζήτηση αυτή οφείλεται στην ζήτηση που παρουσιάζει η αγορά για την παραγωγή διαφόρων προϊόντων και στα μέτρα μείωσης του κόστους που λαμβάνονται. Η αβεβαιότητα των παραμέτρων αναλύεται με ντετερμινιστική ανάλυση σεναρίων.

5.2.8 GTEM

Το GTEM είναι ένα αναδρομικό δυναμικό μοντέλο γενικής ισορροπίας της παγκόσμιας οικονομίας που βασίζεται στη βάση δεδομένων του GTAP 4.0 (Global Trade Analysis Project). Περιλαμβάνει 50 βιομηχανίες σε 45 χώρες και περιοχές. Η κάλυψη των αερίων του θερμοκηπίου στο GTEM περιλαμβάνει τις εκπομπές του διοξειδίου του άνθρακα, του μεθανίου και του οξειδίου του αζώτου, τα οποία αντιπροσωπεύουν περίπου το 99% των παγκόσμιων ανθρωπογενών εκπομπών των αερίων του θερμοκηπίου. Το μοντέλο έχει δομή top-down και η τεχνολογική πρόοδος θεωρείται εξωγενής. Η ανάλυση της αβεβαιότητας είναι ντετερμινιστική με ανάλυση σεναρίων και στατιστικές καμπύλες για παρελθούσες περιόδους για την αξιολόγηση των τάσεων της κλιματικής αλλαγής.

5.2.9 ICES

Το ICES (Inter-temporal Computable Equilibrium System) είναι ένα αναδρομικό, δυναμικό, πολύ-τομεακό και πολύ-περιφερειακό μοντέλο CGE, το οποίο αναπτύσσεται κυρίως με στόχο την ανάλυση των επιπτώσεων και των πολιτικών της κλιματικής αλλαγής. Σε αντίθεση με τα ολοκληρωμένα μοντέλα αξιολόγησης, οι ζημιές λόγω της αλλαγής του κλίματος δεν είναι ενδογενείς στο μοντέλο. Το πρότυπο λειτουργεί από το 2001 έως το 2050. Αρχικά είχε δημιουργηθεί για να αναπαράγει τις πιθανές διαδρομές ανάπτυξης του ΑΕΠ για κάθε περιφέρεια σύμφωνα με το σενάριο A2 IPCC. Στη συνέχεια χρησιμοποιήθηκε για την εκτίμηση των οικονομικών επιπτώσεων της αλλαγής του κλίματος για αύξηση 1,2C° και 3,2C° για την περίοδο 2000-2050, με πιθανό εύρος θερμοκρασιών που σχετίζεται με αυτό του σεναρίου. Η τεχνολογική

αλλαγή θεωρείται εξωγενής και η ανάλυση αβεβαιότητας είναι ντετερμινιστική με ανάλυση σεναρίων.

5.2.10 IGEM

Το μοντέλο γενικής ισορροπίας (IGEM) είναι ένα δυναμικό top-down μοντέλο της οικονομίας των Η.Π.Α., το οποίο θεωρεί την ύπαρξη οικονομικής ανάπτυξης λόγω της συσσώρευσης κεφαλαίου, της τεχνολογικής εξέλιξης και της αύξησης του πληθυσμού. Περιλαμβάνει 35 βιομηχανίες, εκ των οποίων οι 21 είναι μεταποιητικές και οι 5 σχετίζονται με την ενέργεια. Επίσης το μοντέλο είναι εξοπλισμένο με μία σειρά πινάκων που περιλαμβάνουν ένα σύνολο συντελεστών «externality», ο ρόλος των οποίων είναι να διαμορφώνουν τον υπολογισμό του ύψους των εκπομπών άνθρακα. Ο υπολογισμός των εκπομπών άνθρακα λαμβάνει υπόψιν του όλες τις πηγές από τις οποίες μπορεί να προέρχονται αυτές οι εκπομπές. Συγκεκριμένα συμπεριλαμβάνονται οι εκπομπές άνθρακα από την χρήση ορυκτών καυσίμων, το ποσοστό των εκπομπών άνθρακα από τις συνολικές εκπομπές των αερίων του θερμοκηπίου και από τις εκπομπές ενός σύνθετου συνόλου ολικών αερίων του θερμοκηπίου το MMTCO₂. Η ανάπτυξη των συντελεστών «externality» της IGEM βασίστηκε στα ιστορικά δεδομένα που προήλθαν απ την βάση δεδομένων του EPA 2004 για τις εκπομπές και τις δεξαμενές των εκπομπών των αερίων του θερμοκηπίου των ΗΠΑ. για την περίοδο 1990-2002 και από τη μηνιαία ανασκόπηση ενέργειας του EIA. Η αβεβαιότητα στο μοντέλο προσεγγίζεται ντετερμινιστικά με ανάλυση σεναρίων και στοχαστικά με ανάλυση Monte Carlo. Η τεχνολογική πρόοδος θεωρείται ενδογενής και εξωγενής.

5.2.11 IMACLIM-R

Το IMACLIM-R είναι ένα πολύ-τομεακό, πολύ-περιφερειακό, αναδρομικό μοντέλο ανάπτυξης με top-down δομή που προβάλλει σε ετήσια βάση την παγκόσμια οικονομία μέχρι το 2100. Πρόκειται για ένα πλαίσιο μοντελοποίησης με πέντε περιοχές, 10 οικονομικούς τομείς και δύο είδη μεταφοράς. Για τους τομείς της ηλεκτρικής ενέργειας και της βιομηχανίας υπάρχει πλήρη απεικόνιση της παραγωγής και της διάρκειας ζωής του εξοπλισμού. Η αρχιτεκτονική του IMACLIM-R περιλαμβάνει πέντε λεπτομερείς δυναμικές μονάδες που αφορούν την προσφορά και την τελική ζήτηση της ενέργειας. Οι μονάδες αυτές αντιπροσωπεύουν την εξόρυξη ορυκτών καυσίμων, την παραγωγή

ηλεκτρικής ενέργειας, τις οικιακές χρήσεις ενέργειας, τις μεταφορές και την βιομηχανία. Το IMACLIM-R υπολογίζει τις εκπομπές του CO₂ από την καύση ορυκτών καυσίμων χρησιμοποιώντας τα σταθερά ενεργειακά ισοζύγια και τους συντελεστές εκπομπών των καυσίμων. Η αβεβαιότητα αναλύεται ντετερμινιστικά με ανάλυση σεναρίων και η τεχνολογική πρόοδος θεωρείται ενδογενής.

5.2.12 LINKAGE

Το μοντέλο LINKAGE είναι ένα δυναμικό παγκόσμιο top-down υπολογιστικό μοντέλο γενικής ισορροπίας (CGE) με έτος βάσης το 2001. Η τελευταία έκδοση του μοντέλου βασίστηκε στο σύνολο δεδομένων του GTAP6.0 και χρησιμοποιήθηκε ευρέως για την ανάλυση σημαντικών πολιτικών μεταρρυθμίσεων σχετικά με το περιβάλλον. Το μοντέλο πρόσφατα υλοποιήθηκε στο GAMS12 όπου οι εξισώσεις του ουσιαστικά απαλλάχθηκαν από αναφορές σε συγκεκριμένες διαστάσεις όπως την περιοχή, τον τομέα ή τον χρόνο. Η τεχνολογική πρόοδος στο μοντέλο θεωρείται εξωγενής και η ανάλυση της αβεβαιότητας γίνεται μέσω ανάπτυξη σεναρίων.

5.2.13 MIRAGE

Το MIRAGE είναι ένα πολύ-περιφερειακό, πολύ-τομεακό υπολογιστικό μοντέλο γενικής ισορροπίας με top-down δομή, το οποίο αναπτύχθηκε για την ανάλυση της εμπορικής πολιτικής. Πρόκειται για ένα δυναμικό μοντέλο που εξετάζει υπό το πρίσμα του ατελή ανταγωνισμό τους τομείς της βιομηχανικής παραγωγής και των υπηρεσιών, προκειμένου να δώσει πιο ρεαλιστική εικόνα της παγκόσμιας οικονομίας. Το μοντέλο χρησιμοποιεί τη βάση δεδομένων GTAP 6. Η πολύ-τομεακή σύνθεση του συνόλου της ενδιάμεσης κατανάλωσης προέρχεται από μια συνάρτηση με μορφή CES. Η αβεβαιότητα αναλύεται ντετερμινιστικά με ανάλυση ευαισθησίας των παραμέτρων, ενώ η τεχνολογική αλλαγή θεωρείται εξωγενής.

5.2.14 MIT EPPA

Το EPPA είναι ένα αναδρομικό, δυναμικό, πολύ-περιφερειακό, πολύ-τομεακό, υπολογιστικό μοντέλο γενικής ισορροπίας της παγκόσμιας οικονομίας με top-down δομή, (Yang et al., 1996). Στη βασική έκδοση του μοντέλου υπάρχουν 8 τομείς

(γεωργία, άνθρακας, αργό πετρέλαιο, πετρέλαιο, φυσικό αέριο, ηλεκτρική ενέργεια, προϊόντα υψηλής ενεργειακής έντασης και άλλα βιομηχανικά προϊόντα). Κάθε ένας από τους οκτώ κλάδους διαθέτει μια δομή με μορφή CES πολλαπλών επιπέδων, η οποία συνδυάζει την παραγωγή των άλλων τομέων ως υλικές ή ενεργειακές εισροές και χρησιμοποιεί τους εργαζόμενους και το κεφάλαιο ως πρωταρχικούς παράγοντες. Το μοντέλο επιλύει μια σειρά από νέες ισορροπίες για μελλοντικές περιόδους, βασισμένες σε υποθέσεις σχετικά με τις εξωγενείς τάσεις στο ρυθμό αύξησης του πληθυσμού, της παραγωγικότητας της εργασίας, της τεχνολογικής εξέλιξης, καθώς και τις ενδογενείς μεταβολές των αποθεμάτων κεφαλαίου. Το ΕΡΡΑ καλύπτει 12 περιφέρειες. Η τεχνολογική αλλαγή έχει επεκταθεί σε ενδογενής το 2003. Η αβεβαιότητα αναλύεται ντετερμινιστικά με ανάλυση σεναρίων και στοχαστικά με ανάλυση Monte Carlo.

5.2.15 MS-MRT

Το Μοντέλο MS-MRT (Multi-Sector Multi-Region Trade) είναι ένα δυναμικό, υβριδικό μοντέλο γενικής ισορροπίας με πολλές περιοχές, που έχει σχεδιαστεί για να μελετήσει τις επιπτώσεις του περιορισμού των εκπομπών του άνθρακα στο εμπόριο και στην οικονομική ευημερία σε διάφορες περιοχές του κόσμου. Το μοντέλο περιλαμβάνει μια αναλυτική αναπαράσταση των βιομηχανικών κλάδων βασισμένη στο σύνολο δεδομένων GTAP4. Το μοντέλο MS-MRT έχει ως έτος αναφοράς το 1995 και επιλύεται σε πενταετή διαστήματα τα οποία καλύπτουν τον ορίζοντα από το 2000 έως το 2030. Σε αυτό το πλαίσιο μοντελοποίησης ο κόσμος χωρίζεται σε δέκα γεωπολιτικές περιοχές και έξη βιομηχανικούς τομείς (τέσσερις που σχετίζονται με την ενέργεια: πετρελαίου, άνθρακα, φυσικού αερίου και ηλεκτρικής ενέργειας και δύο που σχετίζονται με τα ενεργειακά αγαθά (Energy-Intensive Sectors) και τα μη ενεργειακά αγαθά). Η αβεβαιότητα μελετάται με υπολογισμό της ελαστικότητας των αβέβαιων παραμέτρων και η τεχνολογική αλλαγή θεωρείται εξωγενής.

5.2.16 SGM 2004

Το μοντέλο δεύτερης γενιάς (SGM) είναι ένα υπολογιστικό υβριδικό μοντέλο γενικής ισορροπίας το οποίο σχεδιάστηκε ειδικά για την ανάλυση θεμάτων που σχετίζονται με την ενέργεια, την οικονομία και τις εκπομπές των αερίων του θερμοκηπίου. Χωρίζει τον κόσμο σε 14 περιοχές. Συμπεριλαμβάνει ένα ευρύ φάσμα εκπομπών των αερίων

του θερμοκηπίου και ένα σύνολο δεδομένων των αποθεμάτων κεφαλαίου για μεγάλη χρονική περίοδος. Προσδιορίζει με σαφήνεια τις αλληλεπιδράσεις της εξέλιξης της τεχνολογίας και της οικονομίας και την διαχείριση των ενεργειακών αποθεμάτων της γης. Το μοντέλο είναι σχεδιασμένο για να απεικονίζει την αλληλεπίδραση των τομέων που συμβάλλουν στην παραγωγή των αερίων του θερμοκηπίου, υπολογίζοντας παράλληλα τα ύψη των εκπομπών και χρησιμοποιώντας εκτεταμένα συνάρτηση παραγωγής με μορφή CES. Το μοντέλο έχει ως έτος βάσης το 1990 και επιλύει σε πενταετή διαστήματα που καλύπτουν τον ορίζοντα από το 2020. Για τον προσδιορισμό των προοπτικών της παγκόσμιας υπερθέρμανσης (Global Warming Potential) το μοντέλο χρησιμοποιεί τα σενάρια του IPCC τα οποία παρέχουν τιμές για 20, 100 και 500 χρόνια. Στο SGM η τεχνολογική αλλαγή προσδιορίζεται εξωγενώς και διατίθεται ένα πλήθος επιλογών για τους πιθανούς τρόπους εξέλιξης. Η αβεβαιότητα αναλύεται ντετερμινιστικά με ανάλυση σεναρίων (IPCC) και υπολογισμό ελαστικότητας.

5.2.17 WIAGEM

Το WIAGEM (World Integrated Assessment General Equilibrium Model) είναι ένα ολοκληρωμένο top-down μοντέλο γενικής ισορροπίας το οποίο ενσωματώνει στην δομή του τρεις ξεχωριστές ενότητες: οικονομική, ενεργειακή και κλιματική. Το WIAGEM βασίζεται σε 25 παγκόσμιες περιφέρειες, συγκεντρωμένες σε 11 εμπορικές περιοχές και 14 οικονομικούς τομείς σε κάθε περιοχή. Το μοντέλο ενσωματώνει όλα τα αέρια του θερμοκηπίου που επηρεάζουν την παγκόσμια θερμοκρασία, τη διακύμανση της στάθμης της θάλασσας και τις εκτιμώμενες πιθανές επιπτώσεις όσον αφορά το κόστος και τα οφέλη της κλιματικής αλλαγής. Οι ζημιές στην αγορά και εκτός της αγοράς αξιολογούνται με την προσέγγιση του Tol (2001) για το κόστος των ζημιών. Το μοντέλο βασίζεται στα δεδομένα του GTAP 4.0. Η παραγωγή της ενέργειας περιγράφεται από μια συνάρτηση με μορφή CES. Η τεχνολογική πρόοδος προσδιορίζεται εξωγενώς. Η περίοδος προσομοίωσης είναι για 50 έτη, έως το 2050.

5.3 Ανάλυση

Στον Πίνακα 5 παρουσιάζεται μια ανασκόπηση του συνόλου των υπολογιστικών μοντέλων γενικής ισορροπίας που εξετάστηκαν στην παρούσα εργασία. Παρατίθενται

επίσης συγκεντρωμένα στοιχεία για την οικονομική δομή, την γεωγραφική κάλυψη και την περίοδο προσομοίωσης των μοντέλων με σκοπό την παροχή δυνατότητας σύγκρισης και ευκολότερης κατανόησης των πλαισίων μοντελοποίησης. Όπως φαίνεται από τα στοιχεία τα περισσότερα μοντέλα της κατηγορίας έχουν top-down οικονομική δομή με εξαίρεση το MEMO, το οποίο είναι προσανατολισμένο στην λεπτομερή αναπαράσταση των ενεργειακών συστημάτων και έχει bottom-up δομή. Κάποιες άλλες προσεγγίσεις προσπαθούν να συνδυάσουν τις τεχνολογικές και τις οικονομικές προσεγγίσεις σε μία ενιαία υβριδική δομή, με σκοπό να πετύχουν πιο ολοκληρωμένη αξιολόγηση των ενεργειακών συστημάτων μέσω μακροοικονομικών εξισώσεων. Η περίοδος προσομοίωσης είναι σχετικά μικρή και δεν ξεπερνάει τα 100 έτη. Όπως και στις υπόλοιπες κατηγορίες μοντέλων και εδώ συναντάμε ποικιλία στην γεωγραφική κάλυψη των μοντέλων, τα οποία μπορεί να είναι παγκόσμια, περιφερειακή η εθνική.

Πίνακας 5 Ανασκόπηση των Υπολογιστικών Μοντέλων Γενικής Ισορροπίας

Μοντέλο	Οικονομική δομή	Πεδίο Γεωγραφικής Κάλυψης	Περίοδος προσομοίωσης
AIM	top-down	Περιφερειακό (21)	1990-2100
AIM/Material	top-down	Εθνικό (Ιαπωνία)	1995-2010
Dynamic GTAP	top-down	Παγκόσμιο	1997-2025
G-CUBED	top-down	Περιφερειακό (8)	2000-2100
GEM-E3	top-down	Περιφερειακό (Ευρώπη)	1996-2020
GREEN	top-down	Παγκόσμιο	1985-2050
GTAP-E	top-down	Περιφερειακό (5)	
GTEM	top-down	Παγκόσμιο	1997-2100
ICES	top-down	Περιφερειακό(14)	2001-2050
IGEM	top-down	Περιφερειακό (ΗΠΑ)	2000-2060
IMACLIM-R	top-down	Περιφερειακό (5)	1997-2100
LINKAGE	top-down	Παγκόσμιο	2004-2080
MEMO	bottom-up	Εθνικό	2010-2030
MIRAGE	top-down	Περιφερειακό	2000-2020
MIT EPPA	top-down	Περιφερειακό (16)	2000-2100
MS-MRT	hybrid	Περιφερειακό (10)	2000-2030

Μοντέλο	Οικονομική δομή	Πεδίο Γεωγραφικής Κάλυψης	Περίοδος προσομοίωσης
SGM 2004	hybrid	Παγκόσμιο	2000-2050
WIAGEM	top-down	Περιφερειακό (25)	2000-2050
WORLDSCAN	top-down	Περιφερειακό (16)	2000-2050

Οι τεχνολογικές αλλαγές και η αβεβαιότητα παρουσιάζονται στον Πίνακα 6. Σε αυτό το τομέα, τα CGE μοιάζουν με τα μοντέλα βέλτιστης ανάπτυξης, δεδομένου ότι παρουσιάζουν κυρίως εξωγενής τεχνολογική πρόοδο, αν και τα GEM-E3, IGEM, IMACLIM-R και MIT EPPA περιέχουν τεχνολογικά χαρακτηριστικά που προσδιορίζονται ενδογενώς. Ένα άλλο κοινό χαρακτηριστικό των δυο κατηγοριών είναι η ντετερμινιστική αντιμετώπιση της αβεβαιότητας μέσω σεναρίων ή μέσω εκτίμησης της ευαισθησίας των παραμέτρων. Μοναδική εξαίρεση στις εφαρμογές μοντελοποίησης των CGE, που βρέθηκαν στη βιβλιογραφία, φαίνεται να αποτελεί το μοντέλο MIT EPPA, στο οποίο ελήφθησαν δείγματα ανθρωπογενών εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου και προδρόμων αερίων οι οποίες εκτιμήθηκαν με στοχαστική ανάλυση Monte Carlo (Webster et al., 2002, Webster et al., 2003).

Πίνακας 6 Τεχνολογική Πρόοδος και Ανάλυση της Αβεβαιότητας στα μοντέλα Γενικής Ισορροπίας

Μοντέλο	Τεχνολογική Πρόοδος		Ανάλυση της Αβεβαιότητας		Παράγοντας Αβεβαιότητας
	Ενδογενούς	Εξωγενούς	Ντετερμινιστικά	Στοχαστικά	
AIM		✓	ανάλυση σεναρίων		η αύξηση του πληθυσμού, η ανάπτυξη της οικονομίας, η ευαισθησία του κλίματος (Matsuoka et al., 1995), η δομή της βιομηχανικής παραγωγής, η σύνθεση προϊόντων, ο ρυθμός ενσωμάτωσης της νέας τεχνολογίας, οι εξωτερικές πτυχές της περιβαλλοντικής πολιτικής (Wen et al., 2014)

Μοντέλο	Τεχνολογική Πρόοδος		Ανάλυση της Αβεβαιότητας		Παράγοντας Αβεβαιότητας
	Ενδογενούς	Εξωγενούς	Ντετερμινιστικά	Στοχαστικά	
AIM/Material		✓	ανάλυση σεναρίων		Η παραγωγικότητα της εργασίας, η μείωση των εισροών των μη ενεργειακών υλικών (non-energy material input reduction), η βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης, το ενεργειακό μείγμα (Masui et al., 2006)
Dynamic GTAP		✓	ανάλυση σεναρίων		Το μείγμα πολιτικών (Walmsley et al., 2006), ο συνολικός παράγοντας παραγωγικότητας (Ianchovichina et al., 2001), οι δημογραφικές τάσεις (Tyers and Shi, 2012)
G-CUBED		✓	ανάλυση σεναρίων		ο καθεστώς χορήγησης αδειών εκπομπών (McKibbin and Wilcoxon, 2009)
GEM-E3	✓		ανάλυση σεναρίων		το μείγμα πολιτικών (Nilsson, 1999)
GREEN		✓	ανάλυση σεναρίων		η δομή της αγοράς (Burniaux, 1998)
GTAP-E		✓	ανάλυση σεναρίων		ο καθεστώς χορήγησης αδειών εκπομπών (Nijkamp et al., 2005)
GTEM		✓	ανάλυση σεναρίων		η προσφορά εργασίας, η χρήση γης, οι φυσικοί πόροι, η πληθυσμιακή ανάπτυξη (Pant et al., 2007), το καθεστώς εμπορίας εκπομπών, η οικονομική ανάπτυξη, η αύξηση της κατανάλωσης (Tulpué et al., 1998)

Μοντέλο	Τεχνολογική Πρόοδος		Ανάλυση της Αβεβαιότητας		Παράγοντας Αβεβαιότητας
	Ενδογενούς	Εξωγενούς	Ντετερμινιστικά	Στοχαστικά	
ICES		✓	ανάλυση σεναρίων		η αύξηση της θερμοκρασίας (Bosello et al., 2009), το καθεστώς κατανομής των αδειών εκπομπών άνθρακα (Bosello et al., 2010)
IGEM	✓	✓	ανάλυση σεναρίων		η δομή του μηχανισμού αντικατάστασης του άνθρακα (Fawcett, 2011),
IMACLIM-R	✓		ανάλυση σεναρίων		η ανάπτυξη της οικονομίας, η τεχνολογική πρόοδος, το μείγμα πολιτικών (Waisman et al., 2012)
LINKAGE		✓	ανάλυση σεναρίων		η ανάπτυξη της αγροτικής παραγωγής (Zhai and Zhuang, 2012)
MEMO		✓	ανάλυση σεναρίων και ανάλυση ευαισθησίας		το μείγμα πολιτικών, το μείγμα διαθέσιμων τεχνολογιών (Bukowski and Kowal, 2010),
MIRAGE		✓	ανάλυση σεναρίων		η δομή της αγοράς (Bchir et al., 2003)
MIT EPPA	✓	✓	ανάλυση σεναρίων	Monte Carlo ανάλυση, στατιστική ανάλυση	το γράφημα burden sharing (Viguiet et al., 2003), οι ανθρωπογενείς εκπομπές όλων των αερίων του θερμοκηπίου, του αεροζόλ και των προδρόμων αερίων του θερμοκηπίου (Webster et al., 2002; Webster et al., 2003)
MS-MRT		✓	ανάλυση σεναρίων		η δομή του συστήματος εμπορίας εκπομπών (Bernstein et al., 1999b)

Μοντέλο	Τεχνολογική Πρόοδος		Ανάλυση της Αβεβαιότητας		Παράγοντας Αβεβαιότητας
	Ενδογενούς	Εξωγενούς	Ντετερμινιστικά	Στοχαστικά	
SGM 2004		✓	ανάλυση σεναρίων και ανάλυση ευαισθησίας		η τεχνολογική ετοιμότητα, οι τιμές του άνθρακα, τα επιτόκια (Schumacher and Sands, 2006)
WIAGEM		✓	ανάλυση σεναρίων και ανάλυση ευαισθησίας		τα επίπεδα σταθεροποίησης των εκπομπών (Kemfert and Truong, 2007), οι περιορισμοί των ακτινοβολιών, το σύνολο των αερίων του θερμοκηπίου, οι ελαστικότητες μείωσης των εκπομπών (Kemfert et al., 2006)
WORLDSCAN		✓	ανάλυση σεναρίων		τα επίπεδα σταθεροποίησης των εκπομπών (Bollen and Gieen, 1999)

Ένα από τα μειονεκτήματα των CGE είναι ότι δεν λαμβάνουν υπόψιν την ύπαρξη θετικών αντίκτυπων στην οικονομία από τα μέτρα για την κλιματική αλλαγή. Δεδομένου ότι η οικονομία στα μοντέλα CGE είναι πάντα βέλτιστη, οποιοδήποτε περιορισμοί των αερίων του θερμοκηπίου συνεπάγονται αναγκαστικά αρνητικό αντίκτυπο με αύξηση του κόστους ή των απωλειών στην παραγωγή. Σε αντίθεση με τα Μακροοικονομικά μοντέλα που συζητήθηκαν στην ενότητα 6, στα μοντέλα CGE δεν υπάρχει τρόπος να προκύψουν κέρδη από το μέτρα μετριασμού. Ο DeCanio (2003) διεξάγει μια λεπτομερή και θεμελιώδη κριτική στην υποκείμενη θεωρητική βάση των μοντέλων CGE.

6

Μοντέλα Μερικής Ισορροπίας

6.1 Εισαγωγή

Παρόλο που παρατηρούνται κάποιες ομοιότητες μεταξύ των μοντέλων γενικής και μερικής ισορροπίας, ως προς τη λειτουργία και την δομή τους, στην ουσία οι δύο κατηγορίες διαφέρουν σημαντικά σε σχέση με τα μεγέθη που εξετάζουν και τα αποτελέσματα που παράγουν αντίστοιχα. Σε αντίθεση με τα μοντέλα γενικής ισορροπίας, η ανάλυση της μερικής ισορροπίας επικεντρώνεται σε συγκεκριμένη αγορά ή τομέα, θεωρώντας τα υπόλοιπα μεγέθη της οικονομίας αμετάβλητα. Τα μοντέλα αυτά βρίσκουν εφαρμογή όταν θεωρητικά οι εξεταζόμενες αλλαγές επηρεάζουν κυρίως μία αγορά και αναμένεται να έχουν σχετικά μικρό αντίκτυπο στην υπόλοιπη οικονομία. Η ανάλυση της μερικής ισορροπίας χρησιμοποιείται ευρέως για την εκτίμηση των επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής σε διάφορους τομείς της οικονομίας, επειδή έχει το πλεονέκτημα να παρέχει μια πιο λεπτομερή ανάλυση σε σύγκριση με μια γενική αξιολόγηση ισορροπίας. Από την άλλη, το μειονέκτημα αυτής της ανάλυσης έγκειται στην αδυναμία καταγραφής των ευρύτερων επιπτώσεων των τομεακών αλλαγών που επηρεάζουν όλους τους υπόλοιπους τομείς της οικονομίας.

Ένας από τους πρώτους τομείς στον οποίο εφαρμόστηκε η ανάλυση της μερικής ισορροπίας για την εκτίμηση των επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής ήταν η γεωργία. Για την εκτίμηση των επιπτώσεων στη γεωργία έχουν διαμορφωθεί δύο προσεγγίσεις μέτρησης των ζημιών, η μία χρησιμοποιεί στατιστική ανάλυση και η άλλη βιοφυσική μελέτη. Η βιοφυσική προσέγγιση χρησιμοποιήθηκε για την εκτίμηση των ζημιών στον γεωργικό τομέα στις ΗΠΑ από τον Mendelsohn, (Mendelsohn et al., 1999). Συγκεκριμένα, για την πρόβλεψη των μεταβολών της απόδοσης των καλλιεργειών, χρησιμοποιήθηκαν μοντέλα προσομοίωσης με ενσωματωμένες συναρτήσεις υπολογισμού των νομισματικών ζημιών, τα αποτελέσματα των οποίων προωθήθηκαν σαν εισροές σε ένα μοντέλο περιφερειακής μερικής ισορροπίας του αμερικανικού γεωργικού τομέα. Όπως συμβαίνει και με τους υπολογισμούς των μοντέλων γενικής

ισορροπίας η μεταβολή της απόδοσης των καλλιεργειών επηρέασε τα αποτελέσματα της συνάρτησης παραγωγής, επιφέροντας μια νέα ισορροπία με μεταβολή στην ευημερία και με αύξηση του ύψους των οικονομικών ζημιών που προκλήθηκαν.

Στη στατιστική προσέγγιση η καλλιέργεια της γης εξαρτάται από πολλές διαφορετικές εισροές παραγωγής και θεωρείται ετερογενής με διαφορετικές επιρροές από το περιβάλλον ανά χρονική περίοδο και περιοχή. Το κόστος των παραγωγών εξαρτάται από την αποτελεσματικότητα της παραγωγής, τις τιμές των συντελεστών παραγωγής και τις εξωγενείς περιβαλλοντικές εισροές όπως το κλίμα, η ποιότητα του εδάφους, η ποιότητα του αέρα και η ποιότητα των υδάτων. Η οικονομική θεωρία για την εκμετάλλευση της γης υποδεικνύει ότι όταν η είσοδος και η έξοδος οδηγούν σε μηδενικά καθαρά κέρδη υπάρχει τέλειος ανταγωνισμός. Στην περίπτωση αυτή η αξία της παραγωγής πρέπει να είναι ίση με τα καθαρά έσοδα από τη γη, όπου τα έσοδα από την γη συνδέονται άμεσα με την αξία της γης. Βάση αυτών η στατιστική προσέγγιση χρησιμοποιεί ένα μοντέλο «Ricardian» που επιτρέπει την μέτρηση του αντίκτυπου της μεταβολής μίας κλιματικής μεταβλητής μέσω των επιπτώσεων που υφίσταται η αξία της γης. Οι οικονομικές απώλειες λόγω της μεταβολής του κλίματος για παράδειγμα, μπορεί να προκύψουν σε περίπτωση που η αλλαγή ενός κλιματικού παράγοντα καταστρέψει την παραγωγή και οδηγήσει σε μείωση των μελλοντικών τιμών της αξίας και του μισθώματος της γης. Έτσι αν οι τιμές για όλες τις υπόλοιπες αγορές θεωρηθούν αμετάβλητες, τότε η αξία των ζημιών της περιβαλλοντικής αλλαγής καταγράφεται από τη μεταβολή της συνολικής αξίας της γης. Στην ανάλυση Mendelsohn et al., 1999 χρησιμοποιήθηκαν διασταυρούμενα δεδομένα για την αξία της γης μαζί με 12 κλιματικές μεταβλητές θερμοκρασίας και βροχόπτωσης για διαφορετικές πολιτείες, προκειμένου να εκτιμηθούν οι επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής (καθώς και της μέσης θερμοκρασίας) στις τιμές των ιδιοκτησιών. Ακολούθως υποβαθμίστηκαν οι συνολικές αξίες της καλλιεργήσιμης γης και των σχετικών οικονομικών μεταβλητών προκειμένου να προσδιοριστεί ο οριακός αντίκτυπος κάθε κλιματικής μεταβλητής. Ουσιαστικά ο σχεδιασμός και η πρόβλεψη των επιπτώσεων της αλλαγής του κλίματος βασίστηκαν στα δεδομένα για τις μεταβολές της θερμοκρασίας και των καιρικών συνθηκών για συγκεκριμένες χρονικές περιόδους ανά περιοχή.

Οι βιοφυσικές και οι στατιστικές προσεγγίσεις μερικής ισορροπίας έχουν χρησιμοποιηθεί σε πολλούς τομείς της οικονομίας για την εκτίμηση των επιπτώσεων

της κλιματικής αλλαγής. Συνήθως προστίθενται στις τομεακές αναλύσεις συνοδευόμενες από συνεκτικές υποθέσεις για να προσδιορίσουν την αξία των συνολικών ζημιών σε μια οικονομία. Αυτή η συνολική αξία όμως, δεν ενσωματώνει τις επιπτώσεις εκτός της αγοράς που παρατηρούνται στους τομείς της υγείας και της βιοποικιλότητας.

Τα βιοφυσικά μοντέλα αποτελούν μια συνεργασία της βιοφυσικής και της οικονομικής επιστήμης όπου προσδιορίζεται η φυσική πορεία της επίδρασης του κλίματος στην οικονομία. Στηρίζονται στην άντληση πληροφοριών σχετικά με την εκτίμηση των «φυσικών επιπτώσεων» της κλιματικής αλλαγής για συγκεκριμένους τομείς της οικονομίας, οι οποίες προέρχονται από εργασίες της φυσικής επιστήμης όπως είναι τα κλιματικά μοντέλα, τα μοντέλα επιπτώσεων των κλιματικών αλλαγών και τα εργαστηριακά πειράματα. Οι πληροφορίες αυτές στη συνέχεια μετατρέπονται σε νομισματικές αξίες με διάφορες μεθόδους όπως είναι οι υπολογισμοί πρώτης τάξης, τα μοντέλα μερικής ισορροπίας και οι πιθανοτικές εκτιμήσεις. Οι μέθοδοι της οικονομικής αποτίμησης που χρησιμοποιούνται για την νομισματική αξία του φυσικού αντίκτυπου μπορεί είτε να παρέχουν μια εκτίμηση των ζημιών σε έναν συγκεκριμένο τομέα όπως η γεωργία, είτε τις αξίες των ζημιών σε πολλούς διαφορετικούς τομείς όπως ο τουρισμός, η γεωργία, η δασοκομία, η βιοποικιλότητα κλπ. Στη συνέχεια οι ζημιές προστίθενται και υπολογίζεται η συνολική ζημιά της κλιματικής αλλαγής σε μια περιοχή. Για παράδειγμα η επίπτωση που έχει η αύξηση της στάθμης της θάλασσας στην απώλεια των ακτών και της γης προσδιορίζεται βάσει τεχνικών μελετών, ενώ στη συνέχεια υπολογίζονται οι νομισματικές απώλειες από το κόστος της προστασίας των ακτών και από το κόστος της απώλειας και της προστασίας της γης. Ένα από τα μειονεκτήματα αυτών των προσεγγίσεων είναι η μη ενσωμάτωση των ζημιών εκτός εμπορίου που αφορούν την υγεία και την βιοποικιλότητα. Για αυτές τις εκτιμήσεις απαιτούνται διαφορετικές οικονομοτεχνικές μελέτες που θα μπορούσε να περιλαμβάνουν τα κόστη των ιατρικών εξόδων, τα κόστη των απωλειών της παραγωγικότητας και τα έσοδα από την προθυμία των πολιτών να πληρώσουν για την λήψη προληπτικών μέτρων, (Tol et al.,2010).

Η συνολική εκτίμηση των οικονομικών επιπτώσεων στην οικονομία, που προκύπτει από την συγκέντρωση των επιμέρους εκτιμήσεων για κάθε τομέα, θεωρητικά θα φέρει διαφορετικά αποτελέσματα από αυτά που θα προέκυπταν από την αξιολόγηση τους με

ένα αξιόπιστο μακροοικονομικό μοντέλο ή ένα μοντέλο γενικής ισορροπίας, όπου ενσωματώνονται όλες οι αλληλεπιδράσεις της αγοράς. Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα που αναδεικνύει την σημασία της καταγραφής των αλληλεπιδράσεων στην αγορά μπορεί να βρεθεί στη βιβλιογραφία με τον όρο «rebound effect» (Sorrell, 2009). Πιο συγκεκριμένα αναφέρεται στην βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης που εκ πρώτης όψεως αναμένεται να οδηγήσει άμεσα σε μείωση της κατανάλωσης ενέργειας και της εκπομπής αερίων του θερμοκηπίου. Το συμπέρασμα αυτό θα μπορούσε να προκύψει από μια ανάλυση που εξετάζει μεμονωμένα τον άμεσο αντίκτυπο των πολιτικών μέτρων εξοικονόμησης ενέργειας μέσω την αξιοποίηση τεχνολογιών με βέλτιστη ενεργειακή απόδοση. Ωστόσο η εμπειρική και θεωρητική βιβλιογραφία δείχνουν ότι συχνά παρατηρείται ένα φαινόμενο κατά το οποίου οποιαδήποτε εξοικονόμηση που προέρχεται από ενεργειακή αποδοτικότητα οδηγεί σε αύξηση της κατανάλωσης ενέργειας. Αυτό συμβαίνει διότι η βελτιωμένη ενεργειακή απόδοση επιφέρει μείωση του κόστους της χρησιμοποιούμενης ενέργειας η οποία οδηγεί σε αυξημένη χρήση ενέργειας και σε ανάπτυξη νέων προϊόντων που καταναλώνουν ενέργεια. Ως τόσο η βελτίωση της αποδοτικότητας της ενέργειας αποτελεί βασικός στόχος για τις σύγχρονες περιβαλλοντικές πολιτικές, όπου λαμβάνονται και παράλληλα μέτρα για την αποτροπή της αύξησης της κατανάλωσης λόγω της μείωσης των τιμών. Τα μέτρα αυτά συνήθως λαμβάνονται με την επιβολή πρόσθετων φόρων στην κατανάλωση ενέργειας.

Συχνά τα μοντέλα γενικής ισορροπίας έχοντας ανάγκη από περισσότερο λεπτομερή ανάλυση και ποσοτικοποίηση των ζημιών χρησιμοποιούν ως εισροές τα αποτελέσματα των εξισώσεων υπολογισμού των ζημιών που υπάρχουν στα πλαίσια μοντελοποίησης μερικής ισορροπίας. Ένα αντίστοιχο παράδειγμα αποτελεί το μοντέλο γενικής ισορροπίας IGEM το οποίο χρησιμοποιεί επιμέρους τομεακές ζημιές ως εισροές για τους υπολογισμούς του, (Jorgenson et al., 2004). Η χρήση μίας προσέγγισης υπολογισμού των ζημιών που βασίζεται σε πιο λεπτομερείς εμπειρικές τομεακές μελέτες ενισχύει την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων και διακρίνει το IGEM από πολλά άλλα μοντέλα γενικής ισορροπίας. Γενικά η συναρτήσεις υπολογισμού των ζημιών χρησιμοποιούνται για να περιγράψουν τον τρόπο με τον οποίο μεταβάλλονται τα μοναδιαία κόστη παραγωγής ή τα ύψη των εισροών των συντελεστών εισόδου, ανάλογα με την κλιματική αλλαγή. Για παράδειγμα για τους τομείς της γεωργίας, της δασοκομίας, της ενέργειας και του νερού, χρησιμοποιείται μια συνάρτηση ζημιών για

να συσχετιστεί η ποσοστιαία μεταβολή του κόστους παραγωγής ανά μονάδα, με τις αλλαγές της θερμοκρασίας και των βροχοπτώσεων. Η μεταβολή της μοναδιαίας τιμής της παραγωγής για μια δεδομένη ποσότητα (λόγω των επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής) χρησιμοποιείται στο μοντέλο για να αναπαραστήσει την μεταβολή της παραγωγικότητας ή των εισροών που απαιτούνται για την παραγωγή της ίδιας ποσότητας ενός αγαθού. Αυτή η αλλαγή της παραγωγικότητας ενσωματώνεται στον σχετικό τομέα του CGE μοντέλου για να διαμορφώσει τις συνολικές οικονομικές επιπτώσεις των κλιματικών αλλαγών.

Ένα από τα πλεονεκτήματα της τομεακής ανάλυσης μερικής ισορροπίας είναι ότι επιτρέπει μια πολύ πιο λεπτομερή κατανόηση των διαφόρων κλιματικών επιπτώσεων και μια πιο εκλεπτυσμένη εκτίμηση των συγκεκριμένων επιπτώσεων στα υπόλοιπα τμήματα της οικονομίας. Μια πρόσφατη μελέτη γνωστή ως PESETA χρησιμοποίησε αξιόπιστα μοντέλα γενικής ισορροπίας με ενσωμάτωση ξεχωριστών τομεακών μελετών για την πραγματοποίηση μιας πανευρωπαϊκής ανάλυσης των κλιματικών επιπτώσεων σε πέντε βασικούς τομείς της οικονομίας (τη γεωργία, τον τουρισμό, τις πλημμύρες των ποταμών, τα παράκτια συστήματα και την υγεία). Η μελέτη επεσήμανε τα μειονεκτήματα άλλων περιφερειακών ολοκληρωμένων μελετών αξιολόγησης οι οποίες βασίζονται σε ελλειπείς συναρτήσεις υπολογισμού των ζημιών που συσχετίζουν την παγκόσμια θερμοκρασία με το ΑΕΠ (όπως συμβαίνει στα περισσότερα IAM που μεγιστοποιούν την ευημερία). Συγκεκριμένα επισήμανε ότι αυτές οι προσεγγίσεις υπολογισμού των ζημιών συχνά βασίζονται σε βιβλιογραφία που εισάγει διαφορετικά και πιθανώς ασυνεπή κλιματικά σενάρια. Για παράδειγμα οι εκτιμήσεις των ζημιών που προκύπτουν δεν εμπεριέχουν επαρκή γεωγραφική και κλιματική ανάλυση, αφού λαμβάνουν υπόψιν τους μόνο τη μέση θερμοκρασία και τη μέση βροχόπτωση, αντί να χρησιμοποιούν μια κατάλληλη ανάλυση χρόνου και χώρου με ένα πληρέστερο σύνολο κλιματικών μεταβλητών. Αντίθετα η PESETA ακολούθησε μια αριθμητική bottom-up προσέγγιση, όπου η αξιολόγηση των επιπτώσεων βασίστηκε σε πολύ πιο λεπτομερείς τομεακές αναλύσεις οι οποίες προέρχονταν από τις εξεταζόμενες περιφέρειες. Προκειμένου να παραχθεί πιο αξιόπιστη αξιολόγηση των ζημιών, χρησιμοποιήθηκαν κοινά κλιματικά σενάρια για ένα μεγάλο χρονικό διάστημα. Στη συνέχεια οι επιπτώσεις που προέκυψαν για κάθε τομέα τροφοδοτήθηκαν σε ένα υπολογιστικό μοντέλο γενικής ισορροπίας (GEM-E3) το οποίο πραγματοποιούσε την τελική εκτίμηση των επιπτώσεων, αφού είχαν ενσωματωθεί και οι αλληλεπιδράσεις της αγοράς. Ένα άλλο

πρόσφατο παράδειγμα εθνικής αξιολόγησης της κλιματικής αλλαγής που πραγματοποιήθηκε με την εισαγωγή μιας προσέγγισης μερικής ισορροπίας σε μία CGE top-down ανάλυση μπορεί να βρεθεί στην επισκόπηση της αλλαγής του κλίματος του Garnaut (2008).

6.2 Συνοπτική παρουσίαση των μοντέλων μερικής ισορροπίας

6.2.1 GIM

Το Global Impact Model (**GIM**) είναι ένα top-down μοντέλο μερικής ισορροπίας το οποίο υπολογίζει τις επιπτώσεις στην αγορά για κάθε οικονομικό τομέα, κάθε χώρας της ευρύτερης περιοχής που αναλύει. Το μοντέλο συνδυάζει μελλοντικά σενάρια IPCC, λεπτομερείς χωρικές προσομοιώσεις που παράγονται από τα μοντέλα γενικής κυκλοφορίας της ατμόσφαιρας (general circulation models), χαρακτηριστικά για κάθε τομέα, συναρτήσεις απόκρισης του κλίματος και συναρτήσεις προσαρμογής. Ο σκοπός αυτού του συνδυασμού είναι να προσδιοριστούν οι επιπτώσεις σε κάθε χώρα από τον εκάστοτε οικονομικό τομέα. Τα μελλοντικά παγκόσμια σενάρια IPCC που χρησιμοποιούνται περιλαμβάνουν προβολή των εκπομπών των βασικών αερίων του θερμοκηπίου και τις προβλεπόμενες μεταβολές της θερμοκρασίας και της στάθμης της θάλασσας έως το 2100. Η τεχνολογική πρόοδος στο μοντέλο θεωρείται ενδογενής και η αβεβαιότητα των παραμέτρων αναλύεται ντετερμινιστικά με ανάλυση σεναρίων.

6.2.2 MiniCAM 1.0

Το **MiniCAM 1.0** είναι ένα ολοκληρωμένο top-down μοντέλο. Οι κύριες μονάδες του MiniCAM 1.0 είναι το μοντέλο εκπομπών Edmonds-Reilly-Barns (Edmonds and Reilly, 1985, Barns et al., 1991), το μοντέλο MAGICC της παγκόσμιας ατμοσφαιρικής απόκρισης στα αέρια του θερμοκηπίου (Wigley et al., 1993) και οι συναρτήσεις υπολογισμού των ζημιών (market and non-market damage functions) του μοντέλου MERGE (Manne et al., 1993). Για μελλοντική ανάλυση των αβεβαιοτήτων έχει προστεθεί ένας κώδικας Monte Carlo. Το μοντέλο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να ερευνηθεί μια σειρά επιλογών πολιτικής για τις εκπομπές και να συμπεριλάβει στην

ανάλυση του τις αβέβαιες τιμές των παραμέτρων του κλιματικού συστήματος, όπως απεικονίζεται από την ανάλυση του MAGICC. Οι προσομοιώσεις περιλαμβάνουν προβλέψεις για τις μελλοντικές επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής για μια περίοδο 100 ετών. Η τεχνολογική πρόοδος προσδιορίζεται ενδογενώς και εξωγενώς.

6.2.3 TIAM-ECN

Το TIAM-ECN είναι ένα τεχνολογικά προσανατολισμένο bottom-up μοντέλο, γραμμικής βελτιστοποίησης, το οποίο προσομοιώνει την ανάπτυξη του παγκόσμιου ενεργειακού συστήματος από το στάδιο εξόρυξης ενεργειακών πόρων έως την τελική χρήση ενέργειας, για μεγάλο χρονικό διάστημα, συνήθως περίπου 100 χρόνια. Ο αρχικός περιφερειακός διαχωρισμός του TIAM χωρίζει τον κόσμο σε 15 διαφορετικές γεωγραφικές περιοχές: Αφρική, Αυστραλία, Νέα Ζηλανδία, Καναδάς, Κεντρική και Νότια Αμερική, Κίνα, Μέση Ανατολή, Ηνωμένες Πολιτείες, Δυτική Ευρώπη, Ανατολική Ευρώπη, Πρώην Σοβιετική Ένωση, Ινδία, Ιαπωνία και Μεξικό. Η αντικειμενική συνάρτηση του μοντέλου αποτελείται από το συνολικό κόστος επένδυσης και λειτουργίας σε ολόκληρο το χρονικό ορίζοντα, συγκεντρωτικά για όλες τις περιοχές. Το μοντέλο βασίζεται σε μία προσέγγιση μερικής ισορροπίας όπου οι απαιτήσεις τελικής χρήσης ανταποκρίνονται στις τιμές τελικής χρήσης. Η εκτέλεση σεναρίων με το TIAM περιλαμβάνει την ελαχιστοποίηση της αντικειμενικής συνάρτησης του κόστους. Η βάση δεδομένων του TIAM είναι εκτεταμένη και περιλαμβάνει εκατοντάδες τεχνολογίες για ένα ευρύ φάσμα διαφορετικών τομέων. Το διαπεριφερειακό εμπόριο είναι διαθέσιμο για όλα τα σχετικά ορυκτά καύσιμα, καθώς και για τις άδειες των εκπομπών. Οι τιμές των καυσίμων καθορίζονται ενδογενώς από το μοντέλο, ενώ οι εξωγενώς καθορισμένες απαιτήσεις για ενεργειακές υπηρεσίες διαμορφώνονται με ελαστικότητα τιμών, ώστε να αντιδρούν στις μεταβολές των τιμών.

6.3 Ανάλυση

Τα τρία μοντέλα μερικής ισορροπίας που εξετάστηκαν στη παρούσα εργασία παρουσιάζονται στον Πίνακα 7. Είναι προφανές ότι ο προσδιορισμός της τεχνολογικής εξέλιξης διαφέρει μεταξύ των τριών μοντέλων. Μόνο το μοντέλο GCAM (πρώην γνωστό ως MiniCAM) παρουσιάζει την ενδογενή και την εξωγενή προοπτική της τεχνολογικής πρόοδου, ενώ το GIM και το TIAM-ENC λαμβάνουν την τεχνολογική πρόοδο μόνο ως ενδογενής ή μόνο ως εξωγενής αντίστοιχα. Και τα τρία μοντέλα

παρουσιάζουν παγκόσμια κάλυψη. Ως προς τη δομή τους το GIM και το MiniCAM βασίζονται σε top-down προσέγγιση, ενώ το TIAM-ENC αντιθέτως, έχει ενεργειακή bottom-up δομή. Σε αντίθεση με τα GIM και TIAM- ECN, για το MiniCAM έχουν υπάρξει εφαρμογές με στοχαστική ανάλυση των αβέβαιων παραμέτρων μέσω αναλύσεων Monte Carlo (Scott et al., 1999).

Πίνακας 7 Ανασκόπηση των μοντέλων Μερικής Ισορροπίας

Μοντέλο	GIM	MiniCAM/GCAM	TIAM-ECN
Οικονομική δομή	top-down	hybrid	bottom-up
Πεδίο Γεωγραφικής Κάλυψης	Παγκόσμιο (178 περιοχές)	Παγκόσμιο (14)	Παγκόσμιο (36 περιοχές)
Περίοδος Προσομοίωσης	1990-2100	1990-2100	2010-2100
Τεχνολογική Πρόοδος	Ενδογενής	Ενδογενής και Εξωγενής	Εξωγενής
Ανάλυση Αβεβαιότητας	Ντετερμινιστικά με ανάλυση σεναρίων	Ντετερμινιστικά με ανάλυση σεναρίων και Στοχαστικά με ανάλυση Monte Carlo	Ντετερμινιστικά με ανάλυση σεναρίων
Παράγοντες Αβεβαιότητας	Η αξιοπιστία των μοντέλων κλιματικής πρόβλεψης (Mendelsohn and Williams, 2004)	Το μείγμα πολιτικών, τις εκπομπές, η ατμοσφαιρική συγκέντρωση, οι ραδιενεργές εκπομπές, η μέση παγκόσμια θερμοκρασία και η ευαισθησία του κλίματος, οι ζημίες για την περίπτωση χωρίς παρέμβαση, το κόστος σταθεροποίησης των εκπομπών, το κόστος σταθεροποίησης της ατμόσφαιρας, (Scott et al., 1999)	Τα επίπεδα των ραδιενεργών εκπομπών (van der Zwaan et al., 2013)

7

Μακρό-οικονομετρικά Μοντέλα

7.1 Εισαγωγή

Η ανάπτυξη των μοντέλων γενικής ισορροπίας ξεκίνησε τη δεκαετία του 90, λόγω τις ραγδαίας επιδείνωσης των κλιματικών συνθηκών και της αυξανόμενης ανάγκης για ολοκληρωμένη ανάλυση των κλιματικών ζητημάτων. Οι συνθήκες αυτές ώθησαν την ανάπτυξη αξιόπιστων μοντέλων όπως το GREEN του OECD, το GGE μοντέλο GEM-E3 και του οικονομετρικού μοντέλου E3ME εισόδου εξόδου, το οποίο εισήγαγε την ενέργεια και τις εκπομπές στην οικονομική του ανάλυση. Το E3ME είναι ένα πολύ-περιφερειακό μοντέλο Ενέργειας, Περιβάλλοντος και Οικονομίας της Ευρώπης και μαζί με τις παραλλαγές του παραμένει ένα από τα πιο σημαντικά μακροοικονομικά μοντέλα για την αξιολόγηση της κλιματικής πολιτικής και των αλληλεπιδράσεων του κλίματος και της οικονομίας. Ένα παρόμοιο μοντέλο είναι και το E3MG με την διαφορά ότι επικεντρώνεται σε παγκόσμιο επίπεδο. Επίσης στην ίδια κατηγορία ανήκουν και το παγκόσμιο μακροοικονομικό και ενεργειακό μοντέλο της Οξφόρδης και το μοντέλο MDM-E3 που επικεντρώνεται στην οικονομία του Ηνωμένου Βασιλείου.

7.2 Συνοπτική παρουσίαση των μακρο-οικονομετρικών μοντέλων

7.2.1 E3ME

Το E3ME (Cambridge Econometrics, 2009) είναι ένα μακροοικονομικό δυναμικό μοντέλο προσομοίωσης τύπου post-Keynesian με υβριδική δομή. Έχει σχεδιαστεί για την αξιολόγηση των πολιτικών μετριασμού των εκπομπών των αερίων του θερμοκηπίου και των συστημάτων εμπορίας εκπομπών, για μικρή και μεσαία περίοδος προσομοίωσης (έως το 2020). Μπορεί να προσομοιώσει τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ

των εναέριων μεταφορών και 41 άλλων βιομηχανικών τομέων σε μια συγκεκριμένη περιοχή (π.χ. ένα κράτος μέλος της Ε.Ε.) ή σε μια ομάδα περιφερειών (την Ε.Ε.). Η ικανότητα προσομοίωσης των αλληλεπιδράσεων μεταξύ της οικονομίας, της ζήτησης και προσφοράς ενέργειας και των περιβαλλοντικών εκπομπών του παρέχει πλεονέκτημα έναντι των υπολοίπων μοντέλων. Η αβεβαιότητα αναλύεται στοχαστικά με Bayesian ανάλυση. Και η τεχνολογική πρόοδος καθορίζεται ως ενδογενής.

7.2.2 E3MG

Το **E3MG** ενσωματώνει το bottom-up μοντέλο ενεργειακής τεχνολογίας (ETM) στο πλαίσιο ενός top-down μακροοικονομικού μοντέλου υψηλής ανάλυσης. Έχει χρησιμοποιηθεί για τη διερεύνηση πολιτικών για τον μετριασμό της κλιματικής αλλαγής και της βιώσιμης ανάπτυξης μέσα σε ένα ολοκληρωμένο σύστημα προσέγγισης μοντελοποίησης (Modeling Assessment). Αυτή η έκδοση περιλαμβάνει ενδογενείς τεχνολογικές αλλαγές και αναλύει την αβεβαιότητα με στοχαστική Bayesian ανάλυση. Οι προσομοιώσεις του μοντέλου αναπαριστούν τις μεταβολές στις συγκεντρώσεις του CO₂ στην ατμόσφαιρα και ενισχύουν το φαινόμενο του θερμοκηπίου σε χρονικές περιόδους των 50 και 100 ετών η και περισσότερο.

7.3 Ανάλυση

Τα μακροοικονομικά μοντέλα ανήκουν στην κατηγορία των υβριδικών μοντέλων διότι αποτελούνται από έναν συνδυασμό ενός μακροοικονομικού top-down μοντέλου και μίας bottom-up μοντελοποίησης των ενεργειακών συστημάτων. Ο στόχος της ενσωμάτωσης των δύο τύπων μοντέλων είναι η αποτύπωση μιας δυναμικής, μη γραμμικής εικόνας της οικονομικής αλλαγής σε ένα λεπτομερές πλαίσιο αναπαράστασης των βιομηχανικών τομέων. Η διαφορά μεταξύ των στατικών και των μακροοικονομικών μοντέλων συνίσταται στο γεγονός ότι τα πρώτα απλά υπολογίζουν συγκριτικές μακροπρόθεσμες λύσεις ισορροπίας, ενώ τα δεύτερα είναι σε θέση να παρακολουθούν τη χρονική πορεία της οικονομίας και να επεμβαίνουν δυναμικά με βραχυχρόνιες προσαρμογές της ανισορροπίας. Για την επίτευξη αυτής της δυναμικής επέμβασης των μακροοικονομικών μοντέλων ενσωματώνουν εξισώσεις που εντοπίζουν την τροχιά των εθνικών οικονομικών μεγεθών και την πορεία των

υπόλοιπων σχετικών στοιχείων της οικονομικής δραστηριότητας, όπως η εργασία, η αποταμίευση και η κατανάλωση. Η εκτίμηση αυτών των εξισώσεων γίνεται οικονομετρικά, καθώς η συνολική δυναμικότητα της παραγωγής συνήθως προσομοιώνεται ως συνάρτηση των συνολικών εισροών κεφαλαίου και εργασίας ή σπανιότερα ως συνάρτηση της ενέργειας και των υλικών. Οι συναλλαγές μεταξύ των οικονομικών τομέων περιγράφονται με μοντέλα εισροών και εκροών. Η συνολική ζήτηση των τομέων υπολογίζεται μέσω των διαθέσιμων ιστορικών δεδομένων (π.χ. για τις ενεργειακές υπηρεσίες και τα τρόφιμα), επιτρέποντας την προβολή των μελλοντικών τάσεων της ζήτησης που θα προέκυπταν από την επιβολή πρόσθετων φόρων στον άνθρακα ή εξαιτίας άλλων πολιτικών για το κλίμα. Η ακρίβεια αυτών των προβλέψεων εξαρτάται από το βαθμό στον οποίο οι ιστορικές αλλαγές που προκάλεσαν αλλαγές των τιμών στο παρελθόν (π.χ. οι τεχνολογικές αλλαγές) είναι πιθανό να αποτελέσουν καλό δείκτη για την ανάδειξη των μελλοντικών αλλαγών στη ζήτηση.

Πίνακας 8 Ανασκόπηση των Μακροοικονομικών Μοντέλων

Μοντέλο	E3ME6.0	E3MG	MDM-E3	Oxford Global Macroeconomic and Energy Model
Οικονομική δομή	υβριδική (Cambridge Econometrics, 2014): top-down (ενεργειακή) και bottom-up (παροχή ηλεκτρισμού)	υβριδική (Barker and Scricciu, 2010): top-down (αλληλεπιδράσεις, ανατροφοδότηση και slip-over effects μεταξύ των απαιτούμενων επενδύσεων, τις αποδόσεις τους και της υπόλοιπης οικονομίας) και bottom-up (ενεργειακή τεχνολογία)	υβριδική (Barker et al., 2007): top-down και bottom-up (λιγότερο λεπτομερές ενεργειακό υπομοντέλο)	top-down
Πεδίο Γεωγραφικής Κάλυψης	Παγκόσμιο (59 περιοχές)	Παγκόσμιο (20 περιοχές)	Εθνικό	Παγκόσμιο (22 περιοχές)
Περίοδος Προσομοίωσης	1990-2100	1971-2100	Έως το 2030	2005-2020
Τεχνολογική Πρόοδος	Ενδογενής	Ενδογενής	Εξωγενής	Εξωγενής
Ανάλυση Αβεβαιότητας	Ντετερμινιστικά (ανάλυση σεναρίων); Στοχαστικά πιθανοτική ανάλυση)	Ντετερμινιστικά (ανάλυση σεναρίων); Στοχαστικά πιθανοτική ανάλυση)	Ντετερμινιστικά (ανάλυση σεναρίων)	Ντετερμινιστικά (ανάλυση σεναρίων)

Παράγοντες Αβεβαιότητας	Όλες οι παράμετροι του μοντέλου (Mercure et al., 2017), το επίπεδο συντονισμού των δημοσιονομικών πολιτικών (Barker, 1998; Barker, 1999)	το μείγμα πολιτικών, οι τιμές του άνθρακα, το ύψος των επενδύσεων, η δομή του συστήματος εμπορίας εκπομπών (Barker et al., 2012), τα επίπεδα διείσδυσης της νέας τεχνολογίας (Dagoumas and Barker, 2010)	το μείγμα πολιτικών (Barker et al., 2007, Ekins and Etheridge, 2006)	ο συνδυασμός των κλιματικών πολιτικών, η δομή του συστήματος συναλλαγών (Cooper et al., 1999)
-------------------------	--	--	--	---

Σε αντίθεση με τα μοντέλα βέλτιστης ανάπτυξης και τα CGE μοντέλα, τα μακροοικονομικά μοντέλα δεν θεωρούν ότι η συμπεριφορά των αγορών είναι δεδομένη σε βραχυπρόθεσμο και μεσοπρόθεσμο επίπεδο και ότι η ζήτηση και η προσφορά απορρέουν από τη βελτιστοποίηση της συμπεριφοράς των καταναλωτών και των παραγωγών. Τα μακροοικονομικά μοντέλα είναι κατά κανόνα μοντέλα ανισορροπίας τα οποία προσεγγίζουν μακροπρόθεσμα την ισορροπία στην προσφορά και την ζήτηση. Λόγω της έλλειψης βελτιστοποίησης χαρακτηρίζονται ως μοντέλα προσομοίωσης, τα οποία αντιπροσωπεύουν όσο το δυνατόν περισσότερο τη δυναμική του πραγματικού κόσμου. Η οικονομία και το ενεργειακό σύστημα περιγράφονται από ένα σύνολο κανόνων που δεν οδηγούν υποχρεωτικά σε πλήρη ισορροπία. Ορισμένα μακροοικονομικά μοντέλα επιτρέπουν επίσης τη διαρθρωτική ανεργία που οφείλεται σε ανεπαρκής ζήτηση εργασίας από ορισμένους κλάδους, μακροπρόθεσμα. Αντιθέτως τα μοντέλα CGE συνήθως υποθέτουν ότι δεν υπάρχει ανεργία ή ότι η αγορά εργασίας ανανεώνεται. Το μακροοικονομικό μοντέλο Post-Keynesian E3ME υπολογίζει την απασχόληση με διαφοροποιημένες εξισώσεις ανά είδος και τομέα, π.χ. οι ώρες εργασίας υπολογίζονται για άντρες και γυναίκες ξεχωριστά, για διαφορετικές ηλικίες και τομείς, επιτρέποντας έτσι στο μοντέλο να προβλέπει ακριβέστερα τους αριθμούς των εργαζομένων με πλήρη απασχόληση και με μερική απασχόληση. Η ανισορροπία στην αγορά εργασίας η στην ανεργία αποτελεί συνεπώς χαρακτηριστικό αυτής της κατηγορίας μοντέλων. Για το λόγο αυτό, μερικές φορές υποστηρίζεται ότι τα CGE μοντέλα είναι καταλληλότερα για την περιγραφή μακροχρόνιας συμπεριφοράς σταθερής κατάστασης, ενώ τα μακροοικονομικά μοντέλα για την πρόβλεψη βραχυπρόθεσμων αποτελεσμάτων. Η παράλληλη εξέλιξη αυτών των πολύ διαφορετικών μοντέλων οδήγησε σε μια συνεχιζόμενη αντιπαράθεση μεταξύ των κοινοτήτων των οικονομετρικών (εισόδου εξόδου) και των CGE μοντέλων. Ο Robinson (2006) παρέχει μια αξιοσημείωτη αναφορά στην ιστορική ένταση μεταξύ των CGE και των μακροοικονομικών μοντέλων και των θεωρητικών δυσκολιών του συνδυασμού των προσεγγίσεων. Οι Kratena και Streicher (2009) από την άλλη,

προσπαθούν να προσδιορίσουν καλύτερα τα βασικά χαρακτηριστικά που διαφοροποιούν τις δύο προσεγγίσεις και συμπεραίνουν ότι η απόσταση μεταξύ τους είναι μικρότερη από όσο αναφέρεται συνήθως.

Μία από τις διαφοροποιήσεις που παρατηρούνται μεταξύ των μοντέλων της κατηγορίας αναφέρεται στην προσέγγιση μοντελοποίησης του E3ME η οποία έχει την δυνατότητα υπολογισμού αρνητικού κόστους των μέτρων μετριασμού, θεωρώντας ότι η επιβολή πολιτικών για το κλίμα μπορεί πράγματι να οδηγήσει σε αύξηση της απασχόλησης και της παραγωγής. Δεδομένου ότι σε αυτό το μοντέλο είναι δυνατή η διαρθρωτική ανεργία, η μετάβαση σε μια οικονομία χαμηλών εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα μπορεί να ενισχύσει την ζήτηση εργασίας προκειμένου να μειωθεί η απώλεια της παραγωγής. Στο μοντέλο E3MG μέρος των επιπτώσεων των συνεπαγόμενων τεχνολογικών αλλαγών που απορρέουν από τις πολιτικές για το κλίμα είναι η αύξηση της ανάπτυξης μέσω της αυξημένης μεταφοράς εργασίας από παραδοσιακούς σε σύγχρονους τομείς (Edenhofer et al., 2006).

Δεδομένου ότι πολλά μοντέλα CGE υποθέτουν ότι η οικονομία είναι πάντα σε βέλτιστο επίπεδο και σε κατάσταση πλήρους απασχόλησης, οι τυχόν περιορισμοί που απορρέουν από τις πολιτικές για το κλίμα μπορούν να οδηγήσουν μόνο σε πρόσθετο κόστος για την οικονομία, με αποτέλεσμα οι επιλογές με θετικό αντίκτυπο στην οικονομία να είναι αδύνατες. Αντιθέτως τα μακροοικονομικά μοντέλα επιτρέπουν την πιθανότητα ότι οι πολιτικές για το κλίμα μπορούν να μειώσουν τις ατέλειες της αγοράς με δευτερεύον όφελος. Με αυτόν τον τρόπο το κόστος για την προστασία του κλίματος μπορεί να μειωθεί ή ακόμα και να γίνει αρνητικό. Οι ατέλειες της αγοράς αποτελούν θεμελιώδες χαρακτηριστικό των περισσότερων μακροοικονομικών μοντέλων, καθώς πολλά από αυτά στηρίζονται στην κενυσιανή παράδοση. Διαφορετικά είδη ατελειών ωστόσο, ενσωματώνονται συχνά και στα μοντέλα CGE και συνήθως συνυπολογίζονται στα περισσότερα bottom-up μοντέλα ενεργειακών συστημάτων.

8

Μοντέλα Ενεργειακών Συστημάτων

8.1 Εισαγωγή

Ενώ τα περισσότερα IAM που έχουν αναφερθεί έως τώρα επικεντρώνονται στον προσδιορισμό των οικονομικών και κοινωνικών ζημιών που είναι πιθανόν να προκληθούν από τις μελλοντικές κλιματικές αλλαγές, τα μοντέλα των ενεργειακών συστημάτων επικεντρώνονται στον τομέα της ενεργειακής παραγωγής, με σκοπό να προσδιοριστούν οι τεχνολογικές λεπτομέρειες λειτουργίας και οι αλλαγές τις τεχνολογίας των συστημάτων παραγωγής που μπορούν να επιφέρουν τον μετριασμό των εκπομπών των αερίων του θερμοκηπίου με το ελάχιστο κόστος μετριασμού. Με την πάροδο του χρόνου τα μοντέλα που αναπτύχθηκαν εξελίχθηκαν σε ολοκληρωμένα μοντέλα αξιολόγησης που παρέχουν υποστήριξη των πολιτικών αποφάσεων σχετικά με την ενεργειακή πολιτική. Αιτία της ανάπτυξης τους αποτέλεσε η υπάρχουσα ανάγκη της ανάλυση της ενεργειακής και περιβαλλοντικής πολιτικής για ένα πλαίσιο μοντελοποίησης με υψηλό επίπεδο τεχνολογικής σαφήνειας και λεπτομέρειας, το οποίο υπερβαίνει τις δυνατότητες των μακροοικονομικών μοντέλων, όπου δεν διαφοροποιούνται τα διαθέσιμα αποθέματα τεχνολογίας. Η συνεχώς αυξανόμενη ανάγκη για λεπτομέρεια σε τεχνολογικό επίπεδο οδήγησε τη δεκαετία του '70 στην ανάπτυξη μίας ξεχωριστής κλάσης τεχνολογικά προσανατολισμένων μοντέλων, γνωστών ως μοντέλα "bottom-up", η οποία συνεχίζει να αναπτύσσεται με σκοπό την αντιμετώπιση αυτής της ανάγκης. Ενώ αρχικά αναπτύχθηκαν για την ακριβή αναπαράσταση του σχεδιασμού των ενεργειακών πόρων και σε οικονομικό επίπεδο ξεκίνησαν με απλά, ενιαία λογιστικά εργαλεία, σύντομα εξελίχθηκαν σε πολύπλοκα και δυναμικά πλαίσια βελτιστοποίησης και προσομοίωσης για την αξιολόγηση της ενεργειακής και κλιματικής πολιτικής σε τοπικό, εθνικό και διεθνές επίπεδο (Greening and Bataille, 2009). Όπως αναφέρει ο Mundaca (2010), αυτά τα μοντέλα αποτελούν αναλυτικές παραστάσεις του συστήματος ενέργειας-οικονομίας, που περιλαμβάνουν λεπτομερείς περιγραφές των υφιστάμενων και των νέων ενεργειακών τεχνολογιών και μπορούν να προσομοιώσουν τις εναλλακτικές τεχνολογικές οδούς. Τα αποτελέσματα

της εφαρμογής αυτών των μοντέλων δεν αφορούν μόνο τον προσδιορισμό του μέσου χαμηλότερου κόστους για την επίτευξη των στόχων των εκπομπών, αλλά και τον προσδιορισμό ορισμένων θεμάτων που αφορούν το κλίμα, την οικονομία και την ενέργεια, συμπεριλαμβανομένων των καλύτερων τεχνολογικών ευκαιριών, του κόστους των εναλλακτικών πολιτικών μετριασμού και της δυνατότητας του συστήματος για καλύτερη ενεργειακή απόδοση.

Λόγω των χαρακτηριστικών λειτουργίας τους και των αποτελεσμάτων που παράγουν τα μοντέλα ενεργειακών συστημάτων εντάσσονται στις κατηγορίες των μοντέλων βελτιστοποίησης και των μοντέλων προσομοίωσης. Τα μοντέλα βελτιστοποίησης επεξεργάζονται πληροφορίες σχετικά με το κόστος και τους περιορισμούς των χαρακτηριστικών μιας τεχνολογίας για να αξιολογήσουν την τεχνολογία ως «καλύτερη», «λιγότερο δαπανηρή» ή «βέλτιστη». Το μοντέλο θεωρεί ότι ο καταναλωτής συμπεριφέρεται λογικά, επιλέγοντας οικονομικότερες και αποδοτικότερες λύσεις, ενώ ο ενεργειακός εφοδιασμός πραγματοποιείται σύμφωνα με τις ενεργειακές απαιτήσεις και με χρήση τεχνολογιών που έχουν το ελάχιστο κόστους του κύκλου ζωής τους. Για την εκτίμηση του ελάχιστου κόστους επίτευξης ενός στόχου μετριασμού το μοντέλο λαμβάνει έναν περιορισμό για τα επιτρεπόμενα επίπεδα των εκπομπών. Τα μοντέλα προσομοίωσης έχουν σχεδιαστεί για να καταγράφουν την τεχνολογική και οικονομική δυναμική της εξεταζόμενης περιοχής όσο το δυνατόν πιο ρεαλιστικά. Αντί να επιδιώκουν να βρουν τη λύση με το χαμηλότερο κόστος, προσδιορίζουν τις λύσεις που θα υποστήριζε το πολιτικό σύστημα σε περιπτώσεις πολιτικού σοκ. Σε αυτή τη μοντελοποίηση οι παραγωγοί και οι καταναλωτές μπορούν να πραγματοποιούν δραστηριότητες παραγωγής και κατανάλωσης που έχουν διαφορετικούς στόχους αντίστοιχα, σε αντίθεση με τα μοντέλα βελτιστοποίησης όπου συνήθως η ανάθεση στόχων λειτουργεί υπό το πρίσμα ενός ενιαίου παράγοντα λήψης αποφάσεων. Υπάρχουν πολλά μοντέλα προσομοίωσης με διαφορετικούς βαθμούς πολυπλοκότητας το κάθε ένα. Γενικά για την εξεύρεση ενός συνόλου λύσεων ισορροπίας μεταξύ των τιμών και της ζήτησης της αγοράς χρησιμοποιείται μια διαδοχική επαναληπτική διαδικασία προσομοίωσης. Με την εφαρμογή της εκάστοτε πολιτικής οι τιμές επηρεάζονται, ενεργοποιώντας την επαναληπτική διαδικασία του μοντέλου μέχρι να βρεθεί μια νέα ισορροπία. Τα αποτελέσματα που προκύπτουν είναι πολύ ευαίσθητα στις δυναμικές σχέσεις μεταξύ των παραγόντων της οικονομίας και τα είδη των τεχνολογιών που επιλέγονται κάθε φορά. Για παράδειγμα η προσομοίωση των

αναγκαίων πολιτικών μέτρων για την επίτευξη συγκεκριμένων στόχων μετριασμού των εκπομπών GHG θα οδηγούσε σε πολύ διαφορετικά αποτελέσματα εάν λαμβάνονταν υπόψιν η επίδραση της χρήσης των τεχνολογιών δέσμευσης και αποθήκευσης άνθρακα ή κάποιων άλλων backstop τεχνολογιών, σε σύγκριση με τα αναγκαία μέτρα που θα λαμβάνονταν χωρίς την χρήση τους.

8.2 Συνοπτική παρουσίαση των μοντέλων ενεργειακών συστημάτων

8.2.1 EFOM

Το EFOM αναπτύχθηκε αρχικά στη δεκαετία του '70. Πρόκειται για ένα εργαλείο βελτιστοποίησης συστήματος, πολλαπλών χρονικών περιόδων, που βασίζεται σε γραμμικό προγραμματισμό. Ο στόχος του είναι να ελαχιστοποιεί το συνολικό κόστος για την κάλυψη της εξωγενούς προσδιορισμένης ενεργειακής ζήτησης μιας χώρας. Το μοντέλο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ανάλυση του συνολικού σχεδιασμού ενός ενεργειακού συστήματος ή για την ανάλυση ενός επιμέρους τομέα.

8.2.2 ERIS

Το πρότυπο μοντέλο ERIS (Energy Research and Investment Strategy) είναι ένα εργαλείο για τη δοκιμή διαφορετικών προσεγγίσεων και μεθόδων επίλυσης που σχετίζονται με την ενδογενή ενσωμάτωση της τεχνολογικής αλλαγής στα ενεργειακά μοντέλα. Το αρχικό πρωτότυπο μοντέλο περιέχει μια έκδοση με γραμμικό προγραμματισμό και μη γραμμικό προγραμματισμό, η οποία επιτρέπει τη μη γραμμική διατύπωση των καμπυλών μάθησης (IIASA & NTUA). Αργότερα προστέθηκε μια επέκταση που συμπεριλαμβάνει στοχαστικές επιλογές και επιλογές αποφυγής κινδύνων. Το ERIS αντιπροσωπεύει την παγκόσμια αγορά ηλεκτρικής ενέργειας που παρέχεται από πολλές τεχνολογίες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με ενδογενείς καμπύλες μάθησης.

8.2.3 GENIE

Το GENIE είναι ένα μοντέλο του παγκόσμιου ενεργειακού συστήματος με ενσωματωμένες καμπύλες εμπειρίας (experience curves). Το μοντέλο χωρίζει τον κόσμο σε τέσσερις περιοχές (Βόρεια, Νότια, Δυτικά και Ανατολικά) και διαθέτει 10 διαφορετικές τεχνολογίες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας (προηγμένων βιοκαυσίμων, άνθρακα, πετρελαίου, φυσικού αερίου, συνδυασμένου κύκλου ΠΗΕ με αεριοστρόβιλους (CCGT combined cycle gas turbine), κυψελών καυσίμου (οι οποίες πρακτικά παράγουν ηλεκτρισμό από την καύση υδρογόνου), πυρηνικών (υδροηλεκτρικών και φωτοβολταϊκών). Το GENIE είναι ένα δυναμικό μη γραμμικό μοντέλο βελτιστοποίησης το οποίο υλοποιείται λαμβάνοντας την ιδανική πρόβλεψη, ενώ ο στόχος του είναι να ελαχιστοποιηθεί η παρούσα αξία του συνολικού κόστους για το παγκόσμιο ηλεκτρικό σύστημα. Θεωρείται ότι οι πληροφορίες ανταλλάσσονται ελεύθερα μεταξύ των περιφερειών και έτσι υπάρχει μία καμπύλη συνολικής εμπειρίας για κάθε νέα τεχνολογία. Μία από τις σημαντικότερες διαφορές μεταξύ αυτού του μοντέλου και των άλλων με ενδογενείς καμπύλες μάθησης είναι το γεγονός ότι οι μειώσεις του κόστους που οφείλονται στην εμπειρία δεν έχουν σημείο κορεσμού, αλλά συνεχίζονται επ' άπειρων, ενώ η σταθεροποίηση του κόστους οφείλεται στον κορεσμό της αγοράς.

8.2.4 GET-LFL

Το GET-LFL είναι ένα επαναληπτικό μοντέλο βελτιστοποίησης με Περιορισμένη Προοπτική Διερεύνηση (Limited Foresight) το οποίο ενσωματώνει τη μάθηση μέσω συσσώρευση εμπειρίας (learning-by-doing). Το μοντέλο μπορεί να μελετήσει τα σενάρια για την σταθεροποίηση των συγκεντρώσεων του CO₂ στην ατμόσφαιρα, ενώ συγχρόνως διαθέτει καμπύλες μάθησης για την μετατροπή της ενέργειας και του κόστους επένδυσης.

8.2.5 MARKAL / TIMES

Η οικογένεια MARKAL / TIMES είναι ενεργειακά, οικονομικά και περιβαλλοντικά μοντέλα που υποστηρίζουν πολλές τεχνολογικές λεπτομέρειες. Οι MARKAL / TIMES αναπτύχθηκαν σε μια συνεργασία με την πρωτοβουλία του Διεθνούς Οργανισμού

Ενέργειας στο πλαίσιο του προγράμματος Ανάλυσης των Τεχνολογιών των Ενεργειακών Συστημάτων η οποία ξεκίνησε το 1978. Η MARKAL ξεκίνησε να αναπτύσσεται από το 1980, ενώ η TIMES από το 2000. Η TIMES είναι μια πλατφόρμα παραγωγής bottom-up μοντέλων με πολλαπλές τεχνολογικές επιλογές, η οποία χρησιμοποιεί γραμμικό προγραμματισμό για την υλοποίηση ενός ενεργειακού συστήματος χαμηλού κόστους, που βελτιστοποιείται σύμφωνα με έναν αριθμό περιορισμών από τους χρήστες, σε μεσοπρόθεσμους και μακροπρόθεσμους χρονικούς ορίζοντες. Με λίγα λόγια, το TIMES χρησιμοποιείται για την εξερεύνηση πιθανών ενεργειακών συστημάτων με χρήση πολλαπλών διαφορετικών σεναρίων. Μια έκδοση του MARKAL αναπτύχθηκε το 1998 από το ECN (Energy research Centre of the Netherlands) με σκοπό να συμπεριλάβει την ενδογενή τεχνολογική μάθηση (MARKAL-ELT), αλλά δεν διανέμεται επίσημα. Επίσης τα μοντέλα Global TIMES και το μοντέλο ολοκληρωμένης αξιολόγησης TIMES (TIAM) περιλαμβάνουν πλήρως σύνολο κλιματικών εξισώσεων και σεναρίων μετριασμού για μια προκαθορισμένη αύξηση της παγκόσμιας θερμοκρασίας.

8.2.6 MEDEE 2

Το MEDEE 2 είναι ένα bottom-up μοντέλο σχεδιασμένο να αξιολογεί τη μακροπρόθεσμη ενεργειακή ζήτηση μιας χώρας σε συνδυασμό με ένα σενάριο που προβάλλει τις κύριες πτυχές της κοινωνικής, οικονομικής και τεχνολογικής εξέλιξης της συγκεκριμένης χώρας. Αν και η μακροοικονομική ενότητα είναι απλή, παρέχει ένα συνεκτικό οικονομικό πλαίσιο για την αξιολόγηση των εναλλακτικών κοινωνικοοικονομικών σεναρίων, αξιολογώντας τις επιπτώσεις των μεταβολών των ενεργειακών αναγκών στο ποσοστό του σχηματισμού κεφαλαίου (π.χ. το ποσοστό του ΑΕΠ που εισέρχεται στην επένδυση). Αυτή η προσέγγιση αναλύει λεπτομερώς την εθνική ζήτηση ενέργειας λαμβάνοντας υπόψιν ένα πλήθος τελικών χρήσεων ανά τομέα (οικίες, υπηρεσίες, μεταφορές και βιομηχανία). Η συνολική τελική ζήτηση προβλέπεται για τους ακόλουθους τύπους τελικής μορφής ενέργειας: ορυκτά καύσιμα (βιοκαύσιμα, πετρέλαιο και φυσικό αέριο), ηλεκτρική ενέργεια, οπτάνθρακα και ηλιακή ενέργεια.

8.2.7 MedPro

Το MedPro ανήκει στην οικογένεια των μοντέλων MEDEE η οποία αναπτύχθηκε στη δεκαετία του 1970. Πρόκειται για ένα bottom-up μοντέλο πρόβλεψης της ζήτησης το οποίο επιτρέπει στους χρήστες να εκτιμούν τον αντίκτυπο των πολιτικών για την ενεργειακή απόδοση σε επίπεδο χώρας. Το MedPro αντιμετωπίζει τη ζήτηση ενέργειας ανάλογα με τον κύριο τομέα (βιομηχανία, νοικοκυριά, υπηρεσίες, μεταφορές κλπ) και ανάλογα με τις κύριες κατηγορίες χρήσης των τομέων αντίστοιχα (τελική χρήση της ενέργειας, ηλεκτρικές συσκευές, είδη οχημάτων μεταφοράς). Συγχρόνως η προσέγγιση bottom-up που χρησιμοποιείται επιτρέπει την αξιολόγηση της χρήσης της ζητούμενης ενέργειας ανά τομέα και την ανάλυση των επιπτώσεων των διαφόρων κλιματικών πολιτικών, με την χρήση διαφορετικών σεναρίων και αναλύσεων ευαισθησίας των τιμών.

8.2.8 MESSAGE

Το MESSAGE (Μοντέλο Εναλλακτικών Στρατηγικών Παροχής Ενέργειας και οι Γενικές Περιβαλλοντικές Επιπτώσεις τους) είναι ένα παγκόσμιο μοντέλο σχεδιασμένο για να μοντελοποιεί την δυναμικότητα των ενεργειακών συστημάτων. Είναι ένα μοντέλο βελτιστοποίησης τεχνολογικών συστημάτων που χρησιμοποιείται για τον μακροπρόθεσμο και μεσοπρόθεσμο σχεδιασμό των ενεργειακών συστημάτων (Messner and Strubegger, 1995, Riahi et al., 2012). Το MESSAGE διαιρεί τον κόσμο σε 11 περιοχές, καθεμία από τις οποίες χαρακτηρίζεται από λεπτομερή αναπαράσταση του ενεργειακού συστήματος που την αντιπροσωπεύει. Ο βασικός στόχος του προτύπου είναι να βελτιστοποιήσει την απόδοση των διαφόρων επιλογών των τεχνολογιών των ενεργειακών συστημάτων με την πάροδο του χρόνου, προκειμένου να ικανοποιηθούν οι καθορισμένες περιφερειακές ενεργειακές απαιτήσεις με το χαμηλότερο συνολικό κόστος. Το MESSAGE διαθέτει ένα πολύ ευρύ χαρτοφυλάκιο ενεργειακών τεχνολογιών που καλύπτει τεχνολογίες εξόρυξης πόρων, μετατροπής καυσίμων, παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και θερμότητας καθώς και τεχνολογίες τελικής χρήσης. Τέλος, το MESSAGE παρακολουθεί τις πηγές των αερίων θερμοκηπίου (GHG) και εκτιμά τις ανθρωπογενείς εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου στο πλαίσιο μίας διαδικασίας βελτιστοποίησης.

8.2.9 NEMS

Το NEMS χρησιμοποιείται από την EIA (Energy Information Administration του Αμερικανικού Υπουργείου Ενέργειας) για την ανάδειξη των επιπτώσεων που επιφέρουν οι πολιτικές αξιοποίησης των τεχνολογιών εναλλακτικής ενέργειας και οι διάφορες υποθέσεις σχετικά με τις αγορές ενέργειας. Οι επιπτώσεις αυτές εκτιμώνται για τους τομείς της ενέργειας, της οικονομίας και του περιβάλλοντος στις Ηνωμένες Πολιτείες. Συνολικά το NEMS αντιπροσωπεύει τη συμπεριφορά των αγορών ενέργειας και τις αλληλεπιδράσεις τους με την αμερικανική οικονομία σε ετήσια βάση έως το έτος 2030. Το μοντέλο επιτυγχάνει την ισορροπία μεταξύ της προσφοράς και της ζήτησης των προϊόντων που προέρχονται από τομείς υψηλής κατανάλωσης ενέργειας (energy-intensive sectors), υπολογίζοντας τις τιμές τους με τέτοιο τρόπο, ώστε να εξισορροπήσει τις ποσότητες που οι παραγωγοί είναι πρόθυμοι να εισάγουν στην αγορά με τις ποσότητες που οι καταναλωτές επιθυμούν να καταναλώσουν. Το σύστημα αντικατοπτρίζει την οικονομία της αγοράς, τη δομή της βιομηχανίας, τις υπάρχουσες ενεργειακές πολιτικές και τους κανονισμούς που επηρεάζουν τη συμπεριφορά της αγοράς.

8.2.10 POLES

Το POLES είναι ένα παγκόσμιο ενεργειακό και οικονομικό μοντέλο, μερικής ισορροπίας που προσομοιώνει τον ενεργειακό τομέα έως το 2050. Το μοντέλο περιλαμβάνει πλήρη μοντελοποίηση της ροής ενέργειας (από την παραγωγή έως τη ζήτηση τελικού χρήστη) και των εκπομπών των αερίων του θερμοκηπίου. Η διαδικασία της προσομοίωσης χρησιμοποιεί ετήσια δυναμική αναδρομική μοντελοποίηση με ενδογενείς διεθνείς τιμές της ενέργειας και παρέχει δυνατότητα για μετέπειτα προσαρμογή της προσφοράς και της ζήτησης για κάθε περιοχή του κόσμου αντίστοιχα. Το POLES είναι προσαρμοσμένο για να υλοποιεί προσομοιώσεις για διάφορα θέματα που σχετίζονται με την ενέργεια (τις ενεργειακές πολιτικές, την προώθηση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, της ενεργειακής αποδοτικότητας, τα ζητήματα ενεργειακής ασφάλειας κ.λπ.), καθώς και ζητήματα που σχετίζονται με το κλίμα (τους περιορισμούς των εκπομπών GHG, την κατανομή της προσπάθειας μετριασμού μεταξύ των χωρών κ.λπ.). Χάρη του σχεδιασμού του το μοντέλο συλλαμβάνει όλες τις επιπτώσεις του τρόπου λειτουργίας των ενεργειακών συστημάτων, καθορίζοντας

ενδογενείς τιμές για τα καύσιμα και υλοποιώντας εθνικές προβλέψεις συνεκτικές του παγκόσμιου περιβάλλοντος.

8.2.11 PRIMES

Το ενεργειακό μοντέλο PRIMES επικεντρώνεται στη μελέτη των μηχανισμών της αγοράς με σκοπό την ανάδειξη των τιμών οι οποίες είναι ικανές να επηρεάζουν την προσφορά και τη ζήτηση της ενέργειας, καθώς και την επίδραση της εξέλιξης της τεχνολογίας. Η δομή του μοντέλου είναι αρθρωτή και χωρίζεται σε ενότητες οι οποίες διαφέρουν ανά τομέα. Οι ενότητες αυτές αποσκοπούν στην προσομοίωση τις συμπεριφοράς των οικονομικών παραγόντων, τις αλληλεπιδράσεις τους και των αντίκτυπο που έχουν στις αγορές όσο το δυνατόν πιο κοντά στην πραγματικότητα. Το μοντέλο συνδυάζει ένα μακροοικονομικό θεμέλιο λειτουργίας με τεχνολογικές και μηχανολογικές λεπτομέρειες των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας. Το PRIMES παρέχει λεπτομερείς προβλέψεις για την ενεργειακή προσφορά και ζήτηση, τις τιμές της ενέργειας και τις επενδύσεις σε νέες τεχνολογίες στο μέλλον, καλύπτοντας ολόκληρο το ενεργειακό σύστημα, συμπεριλαμβανομένων των εκπομπών και το εμπόριο των βασικών energy-intensive προϊόντων σε όλη την Ευρώπη, για κάθε μεμονωμένη ευρωπαϊκή χώρα. Το PRIMES υποστηρίζει την διαδικασία ανάλυσης των σημαντικών θεμάτων της ενεργειακής πολιτικής και της αγοράς.

8.2.12 WEM

Το μοντέλο WEM (World Energy Model) είναι ένα μοντέλο προσομοίωσης μεγάλης κλίμακας σχεδιασμένο να αναπαράγει τον τρόπο λειτουργίας των αγορών ενέργειας. Πρόκειται για ένα βασικό εργαλείο που χρησιμοποιείται για τη δημιουργία λεπτομερών προβολών ανά τομέα και ανά περιφέρεια για τα σενάρια Παγκόσμιας Ενεργειακής Προβολής (World Energy Outlook - WEO). Το μοντέλο αποτελείται από τρεις βασικές ενότητες: α) ενότητα για την τελική κατανάλωση ενέργειας (καλύπτει κατοικίες, υπηρεσίες, γεωργία, βιομηχανία (energy-intensive και non-energy-intensive) και μεταφορές), β) ενότητα για την μετατροπή της ενέργειας (βιομηχανία παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και θερμότητας, διυλιστήρια και άλλες δραστηριότητες μετασχηματισμού ενέργειας) και γ) την ενότητα παροχής ενέργειας.

8.3 Ανάλυση

Υπάρχει μεγάλος αριθμός γενικών ανασκοπήσεων των υφιστάμενων μοντέλων ενεργειακών συστημάτων (π.χ. Worrell et al., 2004 και Jebaraj and Iniyar, 2006). Για παράδειγμα η έρευνα Mundaca et al. 2010 παρέχει μια ανασκόπηση των μοντέλων με ιδιαίτερη έμφαση στην ενεργειακή απόδοση και προσδιορίζει μια ξεχωριστή κατηγορία μοντέλων που ονομάζονται «λογιστικά μοντέλα». Ο Πίνακας 9 παρουσιάζει μια επισκόπηση των μοντέλων ενεργειακών συστημάτων, συμπεριλαμβανομένου της κάλυψης του συστήματος, της μαθηματικής και της οικονομικής δομής τους και της γεωγραφικής και της χρονικής κάλυψης που παρέχουν.

Πίνακας 9 Ανασκόπηση των Μοντέλων Ενεργειακών Συστημάτων

Μοντέλο	Κάλυψη συστήματος	Μαθηματική Δομή	Οικονομική δομή	Πεδίο Γεωγραφικής Κάλυψης	Περίοδος Προσομοίωσης
Calliope	Μερικής ισορροπίας	Βελτιστοποίησης	Bottom-up	Εθνικό	2000-2050
DNE21+	Περιορισμένη μακροοικονομική ανάδραση	Βελτιστοποίησης	Economic-Engineering	Περιφερειακό (77)	2000-2100
EFOM	Μερικής ισορροπίας	Βελτιστοποίησης	Bottom-up	Εθνικό	1974-2020
ERIS	Μερικής ισορροπίας	Βελτιστοποίησης	Bottom-up	Περιφερειακό (12)	1990-2050
GENIE	Περιορισμένη μακροοικονομική ανάδραση	Βελτιστοποίησης	Bottom-up	Περιφερειακό (4)	1995-2050
GET-LFL	Μερικής ισορροπίας	Βελτιστοποίησης	Bottom-up	Παγκόσμιο	2000-2050
MARKAL/TIMES	Μερικής ισορροπίας	Βελτιστοποίησης	Bottom-up	Περιφερειακό (5)	1990-2050
MEDEE 2	Μερικής ισορροπίας	Προσομοίωσης	Bottom-up	Εθνικό	1990-2040
MESSAGE	Μερικής ισορροπίας	Βελτιστοποίησης	Hybrid	Περιφερειακό (11)	2005-2100
NEMS	Περιορισμένη μακροοικονομική ανάδραση	Ισορροπία αγοράς	Economic-Engineering	Εθνικό (ΗΠΑ)	2000-2030
POLES	Μερικής ισορροπίας	Ισορροπία αγοράς	Economic-Engineering	Περιφερειακό (18)	1980-2100
PRIMES	Μερικής ισορροπίας	Ισορροπία αγοράς	Economic-Engineering	Περιφερειακό (Ευρώπη)	2005-2050

Μοντέλο	Κάλυψη συστήματος	Μαθηματική Δομή	Οικονομική δομή	Πεδίο Γεωγραφικής Κάλυψης	Περίοδος Προσομοίωσης
WEM	Περιορισμένη μακροοικονομική ανάδραση	Βελτιστοποίησης	Hybrid	Περιφερειακό (25)	2015-2040

Η τεχνολογική σαφήνεια και λεπτομέρεια με τις οποίες είναι σχεδιασμένα τα μοντέλα ενεργειακών συστημάτων τους επιτρέπουν να εξετάζουν θέματα όπως το πώς οι διάφορες πολιτικές αποφάσεις μπορούν να προωθήσουν την εμπορευματοποίηση και τη διάδοση της τεχνολογίας, ενώ συγχρόνως έχουν επικριθεί για έλλειψη μικροοικονομικού ρεαλισμού και «μακροοικονομικής πληρότητας». Από την άποψη του μικροοικονομικού ρεαλισμού έχουν επικριθεί ότι τα αποτελέσματά τους είναι υπερβολικά αισιόδοξα, όσο αφορά το ύψος των κερδών που επιτυγχάνεται με την επίτευξη της ενεργειακής αποδοτικότητας με τεχνολογίες χαμηλών εκπομπών, σε σύγκριση με το κέρδος που επιτυγχάνεται με τις φθηνές τεχνολογίες. Μέρος του προβλήματος είναι ότι τα μοντέλα bottom-up επικεντρώνονται κυρίως στο οικονομικό κόστος χωρίς να λαμβάνουν υπόψη τους παράγοντες όπως οι μεγαλύτεροι κίνδυνοι, τα μεγάλα κόστη και οι μεγαλύτερες περίοδοι αποπληρωμής, που σχετίζονται με τις επενδύσεις στην ενεργειακή απόδοση. Για παράδειγμα, αν συγκρίνουμε την αποδοτικότητα δύο λαμπτήρων που φαίνεται να παρέχουν την ίδια υπηρεσία ως προς τη ένταση φωτεινότητας, θα διαπιστώσουμε ότι παρουσιάζουν διαφορές ως προς τον κίνδυνο πρόωρου τερματισμού του χρόνου ζωής, τη περίοδο αποπληρωμής τους, του σχήματος τους, την απόχρωση τους ή του χρόνου που χρειάζεται ένας λαμπτήρας για να φτάσει σε πλήρη ένταση. Ομοίως τα μέσα μαζικής μεταφοράς και τα ιδιωτικά οχήματα από μία άποψη μπορεί να παρέχουν την ίδια υπηρεσία προσωπικής μεταφοράς, όμως οι έρευνες δείχνουν ότι ορισμένοι καταναλωτές θεωρούν ότι τα μέσα μαζικής μεταφοράς παρουσιάζουν περισσότερες δυσκολίες και παρέχουν λιγότερη άνεση. Με την ενσωμάτωση περισσότερων παραμέτρων για τη μέτρηση των προτιμήσεων των καταναλωτών, όπως οι προτιμήσεις χρόνου ή η αντίληψη των κινδύνων, τα μοντέλα θα είναι σε καλύτερη θέση να εξηγήσουν και να προβλέψουν την πιθανή ζήτηση και διάδοση των νέων τεχνολογιών. Για αυτόν τον λόγο, μερικά μοντέλα αναθεωρούνται και επιχειρούν να συλλάβουν περισσότερο αυτόν τον ρεαλισμό συμπεριφοράς για την ανάλυση των πολιτικών για την ενεργειακή απόδοση (Mundaca et al., 2010).

Τα μοντέλα των ενεργειακών συστημάτων τείνουν να υπολογίζουν σχετικά χαμηλό το κόστος μετριασμού της κλιματικής αλλαγής, επειδή ως μοντέλα μερικής ισορροπίας, λαμβάνουν υπόψιν τους μόνο τις επιπτώσεις των στρατηγικών μείωσης των εκπομπών αγνοώντας τους βρόχους ανατροφοδότησης και τις αλληλεπιδράσεις με άλλους τομείς της οικονομίας. Ωστόσο υπάρχουν εξαιρέσεις που περιέχουν τέτοιου είδους ανατροφοδότηση, οι οποίες μπορούν να βρεθούν στην βιβλιογραφία (e.g. Karkatsoulis et al., 2017). Ένα αξιοσημείωτο παράδειγμα είναι ότι τα μοντέλα υποθέτουν σταθερό επιτόκιο για την χρηματοδότηση των επενδύσεων στον ενεργειακό τομέα. Ωστόσο μια φιλόδοξη πολιτική για το κλίμα θα οδηγήσει σε υποτίμηση των κεφαλαιακών αποθεμάτων σε ορισμένους τομείς και συνεπώς θα μεταβάλει την απόδοση των επενδύσεων στον ενεργειακό τομέα, καθώς και την ταυτόχρονη ανακατανομή των επενδύσεων σε διάφορους άλλους τομείς. Αυτή η δυναμική των επενδύσεων αποτελεί καθοριστικός παράγοντας για το μακροοικονομικό κόστος το οποίο δεν υπολογίζεται από την ανάλυση της μερικής ισορροπίας. Για τον ίδιο λόγο, τα περισσότερα μοντέλα ενεργειακών συστημάτων τείνουν να παραμελούν τις αρνητικές συνέπειες των επενδύσεων (Edenhofer et al., 2006).

Όπως δείχνει ο Πίνακας 9, όλα τα μοντέλα των ενεργειακών συστημάτων είναι bottom-up. Εξαιρέση αποτελούν τα υβριδικά μοντέλα (Greening and Bataille, 2009) που είναι bottom-up σε συνδυασμό με μακροοικονομική top-down δομή, όπως είναι το MESSAGE και το WEM (Urban et al., 2007) και τα μοντέλα economic-engineering που συνδυάζουν μικροοικονομικά θεμέλια συμπεριφοράς με λεπτομέρειες της τεχνολογίας (όπως DNE21+, NEMS, POLES και PRIMES). Σε μια ευρύτερη προοπτική υπάρχουν πολυάριθμοι τρόποι με τους οποίους τα μοντέλα bottom-up έχουν ενσωματώσει μακροοικονομικά στοιχεία στην δομή τους, όπου αυτά μπορεί να προέρχονται από μοντέλα βέλτιστης ανάπτυξης, από μακροοικονομικά μοντέλα ή από υπολογιστικά μοντέλα γενικής ισορροπίας. Οι μακροοικονομικές ανατροφοδοτήσεις αυτών των μοντέλων επικεντρώνονται στην επίδραση των μέτρων μετριασμού των εκπομπών που επιβαρύνουν το κόστος της ενέργειας και κατά συνέπεια το κόστος της παραγωγής των προϊόντων και των υπηρεσιών που προέρχονται από βιομηχανίες υψηλής κατανάλωσης ενέργειας (energy-intensive-industries). Σε αυτό το πλαίσιο οι μακροοικονομικές ανατροφοδοτήσεις των μοντέλων bottom-up καταγράφουν την άμεση προσαρμογή στη ζήτηση αυτών των αγαθών και υπηρεσιών, χωρίς όμως να

προσδιορίζουν τις δευτερογενείς μακροοικονομικές επιπτώσεις, όπως η μεταβολή των μισθών, του κόστους κεφαλαίου, των συναλλαγματικών ισοτιμιών και των εθνικών προϋπολογισμών, που προκύπτουν από τις μεταβολές των τιμών της ενέργειας. Όταν οι κυβερνητικές ενεργειακές πολιτικές είναι μετριοπαθείς δεν παρατηρούνται σημαντικές μακροοικονομικές επιπτώσεις στην οικονομία, αλλά καθώς οι πολιτικές καθίστανται πιο φιλόδοξες, όπως απαιτείται για μια ταχεία μείωση των εκπομπών GHG ή για μια μεγάλη στροφή προς τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, οι μακροοικονομικές συνέπειες συνιστούν σημαντικό παράγοντα για την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων της πολιτικής (Greening and Bataille, 2009).

Ακριβώς όπως τα μοντέλα bottom-up προσπαθούσαν να ξεπεράσουν τις αδυναμίες τους συνδυάζοντας στοιχεία από οικονομικές top-down δομές, έτσι έχουν γίνει και πολλές προσπάθειες από μοντέλα top-down να ενισχύσουν την τεχνολογική τους σαφήνεια ενσωματώνοντας στοιχεία τεχνολογικών bottom-up προσεγγίσεων. Η ενσωμάτωση της τεχνολογικής αλλαγής στα πλαίσια μοντελοποίησης top-down, γενικά πραγματοποιήθηκε με τη χρήση δύο βασικών παραμέτρων: την ελαστικότητα υποκατάστασης (ESUB) και τον δείκτη αυτόνομης ενεργειακής απόδοσης (AEEI). Οι μονάδες ESUB χρησιμοποιούνται για να καταγράψουν τον βαθμό στον οποίο μια σχετική μεταβολή των τιμών θα επηρεάσει την υποκατάσταση μεταξύ οποιωνδήποτε δύο ζευγών συνολικών εισροών (κεφαλαίου, εργασίας, ενέργειας, υλικών κ.λ.π) και μεταξύ δυο διαφορετικών μορφών τελικής ενέργειας. Γενικά, όσο πιο εύκολο είναι να αντικατασταθεί το κεφάλαιο για ενέργεια ή μια μορφή ενέργειας με μια άλλη, τόσο μικρότερο είναι το κόστος μείωσης της χρήσης ενέργειας ή των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου. Ο δείκτης AEEI δίνει τον ρυθμό με τον οποίο η τεχνολογική εξέλιξη ανεξάρτητα από τις τιμές βελτιώνει την ενεργειακή παραγωγικότητα και εξαρτάται μόνο από τις αλλαγές της τεχνολογίας και του κύκλου εργασιών του κεφαλαίου. Όταν ο AEEI είναι υψηλός σημαίνει ότι η οικονομία γίνεται ενεργειακά αποδοτικότερη. Η ESUB και ο AEEI εκτιμώνται συχνά από συγκεντρωτικά ιστορικά δεδομένα και για αυτό η αξιοπιστία τους είναι ευάλωτη σε πιθανές αλλαγές των πολιτικών καθεστώτων, όπως για παράδειγμα η επικέντρωση των πολιτικών σε χαμηλές έως μηδενικές εκπομπές GHG μπορεί να έχει σημαντικό αντίκτυπο στον AEEI και στην ESUB. Αυτή η ανεπάρκεια των μοντέλων top-down εξηγεί εν μέρει την ώθηση προς μεγαλύτερη τεχνολογική λεπτομέρεια και την καθιέρωση ενδογενών τεχνολογικών αλλαγών. Μία άλλη πλευρά αυτής της αδυναμίας των top-down δομών είναι το γεγονός ότι

αντιπροσωπεύουν την τεχνολογική πρόοδο ως ένα αφηρημένο και συγκεντρωτικό φαινόμενο, κάτι που μπορεί να είναι επαρκές για την αξιολόγηση παραγόντων όπως οι φόροι και οι εμπορεύσιμες άδειες, αλλά δεν είναι επαρκές για την αξιολόγηση πολιτικών που είναι επικεντρωμένες στην τεχνολογία. Υπάρχουν πολλοί διαφορετικοί τρόποι ενσωμάτωσης των στοιχείων των τεχνολογικών προσεγγίσεων στα μοντέλα top-down, όμως υπάρχουν περιορισμοί όσον αφορά την ποσότητα των τεχνολογικών λεπτομερειών που μπορούν να ενσωματωθούν χωρίς να προκύψουν υπολογιστικές και άλλες δυσκολίες.

Η τεχνολογική αλλαγή καθώς και η αβεβαιότητα στα εξεταζόμενα μοντέλα των ενεργειακών συστημάτων παρουσιάζονται στον Πίνακα 10. Είναι προφανές ότι υπάρχει ισορροπία μεταξύ των μοντέλων όσον αφορά την θεώρηση της τεχνολογικής πρόοδο ως ενδογενής ή εξωγενής. Ωστόσο η ανάλυση της αβεβαιότητας αντιμετωπίζεται και πάλι κυρίως με ντετερμινιστικές προσεγγίσεις, δηλαδή ανάλυση σεναρίων και ευαισθησίας, με την πιο σημαντική εξαίρεση να είναι το μοντέλο MARKAL / TIMES, το οποίο παρουσιάζει και στοχαστική ανάλυση Monte Carlo.

Πίνακας 10 Τεχνολογική Πρόοδος και Ανάλυση της Αβεβαιότητας στα μοντέλα Ενεργειακών Συστημάτων

Μοντέλο	Τεχνολογική Πρόοδος		Ανάλυση Αβεβαιότητας		Παράγοντας Αβεβαιότητας
	Ενδογενής	Εξωγενής	Ντετερμινιστική	Στοχαστική	
DNE21+	✓	✓	ανάλυση σεναρίων		το κόστος των εναλλακτικών δράσεων για την μείωση των εκπομπών (Akimoto et al., 2010) οι επιπτώσεις των πολιτικών μέτρων, ο φόρος του άνθρακα, τα επίπεδα σταθεροποίησης των εκπομπών (Akimoto et al., 2004), η ζήτηση της ενέργειας (Yamaji et al., 2000)
EFOM		✓	ανάλυση σεναρίων		οι στρατηγικές ελαχιστοποίησης του κόστους (van der Voort, 1982), η αύξηση της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας (Plinke et al., 1990)

Μοντέλο	Τεχνολογική Πρόοδος		Ανάλυση Αβεβαιότητας		Παράγοντας Αβεβαιότητας
	Ενδογενής	Εξωγενής	Ντετερμινιστική	Στοχαστική	
ERIS	✓		ανάλυση σεναρίων ανάλυση ευαισθησίας	υποκειμενική πιθανότητα	η εξέλιξη της τεχνολογίας (Kypreos et al., 2000), ρυθμός υποτίμησης (Barreto and Kyraios, 2004)
GENIE	✓		ανάλυση σεναρίων		το ύψος των επενδύσεων σε νέες τεχνολογίες, η ισχύουσα πολιτική μετριασμού (Mattsson and Wene, 1997)
GET-LFL	✓		ανάλυση σεναρίων		τα επίπεδα σταθεροποίησης των εκπομπών, η εξέλιξη της τεχνολογίας (Hedenus et al., 2006)
MARKAL/TIMES	✓	✓	ανάλυση σεναρίων ανάλυση ευαισθησίας	στοχαστικός προγραμματισμός, Monte Carlo ανάλυση (Seebregts et al., 2002)	το προεξοφλητικό επιτόκιο, οι τιμές των ορυκτών καυσίμων, οι περιορισμοί των εκπομπών (Seebregts et al., 2000), κόστος εξωτερικών παραγόντων (Rafaj and Kypreos, 2007),
MEDEE 2		✓	ανάλυση σεναρίων		το μείγμα πολιτικών (Lapillonne, 1980)
MESSAGE		✓	ανάλυση σεναρίων ανάλυση ευαισθησίας		το προεξοφλητικό επιτόκιο, ο χρόνος λειτουργίας των ανεμογεννητριών, το κόστος των πυρηνικών σταθμών κατά τη διάρκεια της νύχτας (Hainoun et al., 2010), η ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας, οι περιορισμοί των αερίων του θερμοκηπίου (Sullivan et al., 2013)
NEMS		✓	ανάλυση σεναρίων		η ενέργεια που καταναλώνουν τα ηλεκτρικά οχήματα (Yu, 2008)
POLES	✓		ανάλυση σεναρίων		η αλλαγή του κλίματος (Mima and Criqui, 2009), η σταθεροποίηση των εκπομπών (Kitous et al., 2010)

Μοντέλο	Τεχνολογική Πρόοδος		Ανάλυση Αβεβαιότητας		Παράγοντας Αβεβαιότητας
	Ενδογενής	Εξωγενής	Ντετερμινιστική	Στοχαστική	
PRIMES		✓	ανάλυση σεναρίων		η μείωση των εκπομπών του CO ₂ (Capros et al., 1999), το εύρος των μέτρων μετριασμού που λαμβάνονται, η καθυστέρηση της δράσης για το κλίμα, οι καθυστερήσεις αξιοποίησης των νέων τεχνολογιών (Capros et al., 2012)
WEM		✓	ανάλυση σεναρίων		το μείγμα πολιτικών (Kesicki and Yanagisawa, 2015)

Καθώς τα μοντέλα προσπαθούν να παρουσιάσουν την πραγματικότητα με τον καλύτερο δυνατό τρόπο, η αβεβαιότητα που προκύπτει από την ανάλυση του ενεργειακού συστήματος έχει εξελιχθεί σε ένα πολύ σημαντικό ζήτημα. Για τον λόγο αυτό η ανάλυση της αβεβαιότητας ασχολείται με την αβεβαιότητα ορισμένων παραμέτρων (μεταβλητών ή και εισροών) που επηρεάζουν τη λήψη αποφάσεων. Για ορισμένα μοντέλα έχουν σχεδιαστεί σενάρια τα οποία ποσοτικοποιούν τις επιπτώσεις ορισμένων πολιτικών που επηρεάζουν την ζήτηση, π.χ. η οδηγία για την ενεργειακή απόδοση, η πολιτική οικολογικού σχεδιασμού κ.λ.π. (MEDEEs, PRIMES, EFOM) ή την προσφορά, π.χ. η τιμολόγηση του άνθρακα, το ανώτατο όριο εκπομπών, τις πυρηνικές οδηγίες κλπ. (PRIMES, EFOM). Σε άλλα μοντέλα η ανάλυση σεναρίων επικεντρώνεται στην προβολή των τιμών των καυσίμων, την πρόοδο της τεχνολογίας και τα μακροοικονομικά δεδομένα (PRIMES, WEM, NEMS, POLES, MARKAL/TIMES, GET-LFL, GENIE). Σε άλλες περιπτώσεις όπως στο ERIS, στο MARKAL και στο MESSAGE η αβεβαιότητα αντιμετωπίζεται πιο ξεκάθαρα. Το ERIS για παράδειγμα, ενσωματώνει μια στοχαστική επέκταση, προκειμένου να αντιμετωπίσει την αβεβαιότητα των επενδύσεων στον ενεργειακό τομέα και στον τομέα έρευνας και ανάπτυξης (R&D). Η στοχαστική εκδοχή του MARKAL/TIMES αποτελείται από πολλαπλά σενάρια (καταστάσεις του κόσμου) όπου το καθένα έχει τη δυνατότητα να εμφανιστεί μέσα σε μία ενιαία συνεκτική δομή. Ένα παράδειγμα εφαρμογής του μοντέλου είναι η άσκηση που διεξήχθη για το ενεργειακό σύστημα του Κεμπέκ του Καναδά κατά την οποία εκτιμήθηκε η βέλτιστη στρατηγική επενδύσεων για διάφορα επίπεδα εκπομπών των αερίων του θερμοκηπίου. Επίσης το μοντέλο

MESSAGE έχει αναβαθμιστεί με μια μεταγενέστερη έκδοση, τη Robust MESSAGE, με σκοπό την πραγματοποίηση στοχαστικής ανάλυσης της αβεβαιότητας των ενεργειακών συστημάτων σε μεσοπρόθεσμο και μακροπρόθεσμο επίπεδο.

Στην βιβλιογραφία υπάρχει μεγάλος αριθμός ανασκοπήσεων των μοντέλων των Ενεργειακών Συστημάτων π.χ (e.g. Worrell et al., 2004), (Jebaraj and Iniyar, 2006), ενώ στο (Mundaca et al., 2010) παρατίθεται ανασκόπηση των μοντέλων υπό το πρίσμα της ενεργειακής αποδοτικότητας και ορίζεται μια ξεχωριστή κατηγορία μοντέλων με το όνομα «υπολογιστικά μοντέλα» ή «accounting models».

9

Άλλα Μοντέλα

9.1 Εισαγωγή

Τα μοντέλα βέλτιστης ανάπτυξης και τα μοντέλα γενικής ισορροπίας βασίζονται σε ένα συγκεκριμένο θεωρητικό μακροχρόνιο υπόβαθρο, γεγονός που τους επιτρέπει να προσεγγίσουν την ανάλυση κάποιου θέματος με παρόμοιο τρόπο. Σε αντίθεση με αυτά, τα μοντέλα που παρουσιάζονται παρακάτω είναι μοντέλα που δεν μπορούν να καταταχθούν σε κάποια από τις προηγούμενες κατηγορίες, ούτε να σχηματίσουν μία ξεχωριστή κατηγορία λόγω της μοναδικής δομής τους και της έλλειψης κοινών χαρακτηριστικών. Για παράδειγμα το PAGE2002 είναι ένα πολύ γνωστό non-CGE μοντέλο, που είναι ενδεικτικό του είδους αυτού, διότι παρουσιάζει αποκλίσεις από τα μοντέλα νεοκλασικής ανάπτυξης, τα CGE και τα μακροοικονομικά μοντέλα. Τα μοντέλα αυτά δεν παρουσιάζουν κάποια κοινά χαρακτηριστικά στην δομή και στο θεωρητικό υπόβαθρο που χρησιμοποιούν, παρόλο αυτό υπάρχουν μερικές λειτουργίες που εκτελούν η οποίες φαίνεται να τα συνδέουν. Μία από αυτές είναι ο τρόπος που πραγματοποιούν αξιολόγηση πολιτικής χρησιμοποιώντας υποθέσεις σχετικά με την πολιτική πορεία που θα ακολουθηθεί και υπολογίζοντας τις επιπτώσεις της συγκεκριμένης πολιτικής, για όλες τις διαμορφωμένες μεταβλητές που εισάγονται (π.χ. αλλαγές θερμοκρασίας, αλλαγές οικοσυστήματος και γεωργικής απόδοσης) από τον χρήστη. Ένα άλλο στοιχείο που τα συνδέει είναι το γεγονός ότι όλα τα μοντέλα υποθέτουν διαφορετικά σενάρια για την παγκόσμια οικονομία τα οποία εισάγονται από εξωτερικές πηγές (π.χ. σενάρια IPCC), ενώ τα ίδια τα μοντέλα δεν διαθέτουν ενσωματωμένα σενάρια. Αυτά τα πλαίσια μοντελοποίησης συνήθως περιέχουν μια ενότητα καθορισμού των κλιματικών συνθηκών και μια ενότητα υπολογισμού των οικονομικών ζημιών, ενώ μερικά περιλαμβάνουν και μια ενότητα ενέργειας.

9.2 Συνοπτική παρουσίαση των μοντέλων της κατηγορίας

9.2.1 PAGE2002

Το PAGE2002 είναι μια βελτιωμένη έκδοση του PAGE95. Πρόκειται για ένα ολοκληρωμένο top-down μοντέλο αξιολόγησης το οποίο χωρίζει τον κόσμο σε 8 περιοχές. Το μοντέλο περιλαμβάνει εξισώσεις που υπολογίζουν τα κύρια αέρια του θερμοκηπίου και τον αντίκτυπο τους, την επίδραση του αεροζόλ, τις τοπικές επιδράσεις της θερμοκρασίας, το ΑΕΠ, τα κόστη προσαρμογής, τη μη γραμμικότητα και την μετατόπιση των ζημιών που προκαλούνται από την υπερθέρμανση του πλανήτη και την πιθανότητα μελλοντικής μεγάλης κλίμακας ασυνέχειας. Οι προβλέψεις των παραμέτρων της κλιματικής αλλαγής έχουν χρονικό ορίζοντα 200 ετών. Το μοντέλο περιλαμβάνει συνάρτηση υπολογισμού των νομισματικών ζημιών όπου οι ζημιές υπολογίζονται ως ποσοστό του εγχώριου ΑΕΠ. Για τον προσδιορισμό των ζημιών λαμβάνονται υπόψη το επίπεδο της παγκόσμιας θερμοκρασίας από την προβιομηχανική εποχή, την μεταβολή της θερμοκρασίας μετά την προβιομηχανική εποχή (με πιθανότητα ασυνέχειας στις τιμές των μελλοντικών τιμών της θερμοκρασίας), ένας δείκτης που αντιπροσωπεύει τις απώλειες του ΑΕΠ για κάθε 2,5C αύξηση της θερμοκρασίας, ένας δείκτης που αντιπροσωπεύει τις απώλειες του ΑΕΠ σε περίπτωση ασυνέχειας στην μεταβολή της θερμοκρασίας και μία παράμετρος που σχετίζεται θετικά με τη πιθανότητα ασυνέχειας.

$$D_t = \frac{T_{pret}^{pow}}{2,5} \cdot W + (T_{pret} - T_{dis}) P_{dis} \cdot W_{dis}$$

D_t οι ζημιές ως ποσοστό του ΑΕΠ, T_{pre} παγκόσμια θερμοκρασία μετά την προβιομηχανική εποχή

T_{dis} παγκόσμια θερμοκρασία με πιθανότητα ασυνέχειας, P_{dis} παράμετρος ανάδειξης της πιθανής ασυνέχειας.

W το ποσοστό του ΑΕΠ που χάνεται από τη αύξηση 2,5 C της θερμοκρασίας

9.2.2 PAGE2009

Αυτή είναι η αναβαθμισμένη έκδοση του PAGE2002. Το PAGE2009 είναι και αυτό ένα ολοκληρωμένο top-down μοντέλο που αξιολογεί τις επιπτώσεις της αλλαγής του κλίματος και το κόστος των πολιτικών μέτρων μετριασμού και προσαρμογής. Η αναβάθμιση του PAGE09 έγινε με βάση τις τελευταίες επιστημονικές και οικονομικές πληροφορίες, κυρίως από την 4η έκθεση αξιολόγησης της IPCC (IPCC, 2007). Η

PAGE09 χρησιμοποιεί απλές εξισώσεις για την προσομοίωση των αποτελεσμάτων από πιο περίπλοκα εξειδικευμένα επιστημονικά και οικονομικά μοντέλα, λαμβάνοντας υπόψη την βαθιά αβεβαιότητα που υπάρχει γύρω από την αλλαγή του κλίματος. Οι υπολογισμοί γίνονται για οκτώ περιοχές του κόσμου, για δέκα χρονικές περιόδους έως το 2200 και για τέσσερα είδη επιπτώσεων (επίπεδο της θάλασσας, οικονομικές και μη οικονομικές ζημιές και για πιθανές ασυνέχειες στο επίπεδο της παγκόσμιας θερμοκρασίας). Μια από τις αλλαγές που πραγματοποιήθηκαν στο μοντέλο αφορά την μονάδα υπολογισμού των ζημιών. Εδώ ο υπολογισμός των οικονομικών ζημιών γίνεται βάσει ζημιών που έχουν υπολογιστεί για βαθμονομημένες στάθμες θερμοκρασίας, όπου μια αντιπροσωπευτική μεταβλητή a πολλαπλασιάζεται με τον λόγο της πραγματικής θερμοκρασίας (υψωμένη σε μια δύναμη ενδεικτική των ζημιών) με την βαθμονομημένη θερμοκρασία.

$$D = a \cdot \frac{T_{act}^{\beta}}{T_{cal}}$$

,όπου D είναι οι νομισματικές ζημιές, a είναι οι ζημιές για βαθμονομημένες θερμοκρασίες T_{cal} είναι οι βαθμονομημένες θερμοκρασίες, T_{act} είναι η πραγματική αύξηση της θερμοκρασίας, β είναι παράμετρος των ζημιών

9.2.3 FUND

Το FUND είναι ένα ολοκληρωμένο bottom up μοντέλο που χρησιμοποιείται για την εκτίμηση του εύρους των επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής στην περιοχή του Βορείου Ατλαντικού και στη Βόρεια και Δυτική Ευρώπη. Το FUND αποτελείται από ένα σύνολο εξωγενών σεναρίων και ενδογενών διαταραχών. Το μοντέλο διακρίνει 16 μεγάλες περιοχές του κόσμου και προσομοιώνει με ορίζοντα από το 1950 έως το 2300 σε χρονικά βήματα του ενός έτους. Τα κλιματικά σενάρια για την περίοδο 2010-2300 χρησιμοποιούνται από τον Rahmstorf & Ganopolski (1999), ο οποίος ακολουθεί το σενάριο IS92e της IPCC. Κατά την εκτέλεση του μοντέλου η ενεργειακή ένταση της οικονομίας (το ποσό της ενέργειας που χρησιμοποιείται για την παραγωγής μίας μονάδας ΑΕΠ στο σύνολο της οικονομίας) και η ένταση του άνθρακα (η ποσότητα του άνθρακα, που εκλύεται υπό μορφή CO₂ ανά μονάδα παραγόμενης ενέργειας,) του ενεργειακού εφοδιασμού μειώνονται αυτόνομα με την πάροδο του χρόνου. Τα ενδογενή τμήματα του FUND αποτελούνται από τις ατμοσφαιρικές συγκεντρώσεις

(διοξειδίου του άνθρακα, μεθανίου και οξειδίου του αζώτου), τη μέση παγκόσμια θερμοκρασία, τις επιπτώσεις των μειώσεων των εκπομπών του CO₂ (στην οικονομία και στο σύνολο των εκπομπών) και τις επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής (στην οικονομία και στον πληθυσμό).

Οι επιπτώσεις λόγω της αλλαγής του κλίματος εξετάζονται διεξοδικά από το FUND σε πολλούς διαφορετικούς τομείς: τη γεωργία, τη δασοκομία, την ενέργεια, την στάθμη της θάλασσας, την ανθρώπινη υγεία (τις καρδιαγγειακές και τις αναπνευστικές διαταραχές που σχετίζονται με το κρύο και το θερμικό στρες, την έξαρση της ελονοσίας κ.λπ), τους υδάτινοι πόρους, τα φυσικά οικοσυστήματα κ.α. Πιο συγκεκριμένα οι επιπτώσεις στο FUND διακρίνονται σε νομισματικές ζημιές της οικονομίας και σε φυσικές, μη εμπορικές ζημιές (no-market damages), όπου οι πρώτες επηρεάζουν τις επενδύσεις (οικονομική ανάπτυξη) και την κατανάλωση (ευημερία), ενώ οι δεύτερες τις κοινωνικές επιπτώσεις. Η μονάδα υπολογισμού του κόστους των ζημιών παρουσιάζεται λεπτομερώς στο (Ortiz και Markandya, 2009), ενώ στη βιβλιογραφία χρησιμοποιούνται και άλλες συναρτήσεις ζημιών (Anthoff et al., 2009; Narita et al., 2009; Tol, 2002).

9.2.4 CIAS

Το CIAS (Community Integrated Assessment System) είναι μια πολυεθνική, αρθρωτή ολοκληρωμένη προσέγγιση αξιολόγησης για τη μοντελοποίηση της κλιματικής αλλαγής. Ο όρος μοντέλο αναφέρεται σε ένα συγκεκριμένο σύστημα μονάδων που εισάγεται στο supporting software infrastructure SoftIAM ώστε να σχηματίσει ένα ολοκληρωμένο μοντέλο το οποίο είναι σε θέση να απαντά σε διαφορετικά ερωτήματα παρακολουθώντας έτσι τις εξελισσόμενες ανάγκες της πολιτικής. Το μοντέλο βασίζεται στα 6 ενδεικτικά σενάρια SRES (χωρίς μετριασμό), όπου η παγκόσμια μέση αύξηση της θερμοκρασίας για την περίοδο 2090-2099 σε σχέση με τη περίοδο 1980-1999 προβλέπεται μεταξύ 1,1 και 6,4°C (IPCC, 2007). Το μοντέλο δεν συμπεριλαμβάνει κανένα συστηματικό υπολογισμό των ζημιών.

9.2.5 IGSM2

Το IGSM2 (MIT Integrated Global System Model) είναι ένα top-down μοντέλο που έχει σχεδιαστεί για την ανάλυση των παγκόσμιων περιβαλλοντικών αλλαγών που μπορεί να προκύψουν από ανθρωπογενείς αιτίες. Στο πλαίσιο αυτό αξιολογεί τις αβεβαιότητες που σχετίζονται με τις προβλεπόμενες αλλαγές και τα κόστη και την αποτελεσματικότητα των προτεινόμενων πολιτικών μέτρων μετριασμού του κλιματικού κινδύνου. Η δομή του IGSM2 περιλαμβάνει τις εξής ενότητες: α) μοντέλο της ανθρώπινης δραστηριότητας και των εκπομπών (EPPA), β) μοντέλο ατμοσφαιρικής δυναμικής, φυσικής και χημείας, γ) μοντέλο των ωκεανών με υπομοντέλα του κύκλου του άνθρακα και του θαλάσσιου πάγου, δ) σύμπλεγμα μοντέλων της γης, ε) Μοντέλο Χερσαίων Οικοσυστημάτων (TEM), ζ) ένα πλήρως ενσωματωμένο Πρότυπο Φυσικών Εκπομπών (NEM) και η) το Κοινοτικό Μοντέλο Χερσαίων Εκτάσεων (CLM), το οποίο περιλαμβάνει γενικούς υπολογισμούς για το νερό και την ενέργεια στη στεριά και τις χερσαίες διαδικασίες του οικοσυστήματος. Η περίοδος προσομοίωσης είναι 100 έτη και δεν υπάρχει καμία αξιολόγηση των επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής.

9.2.6 IMAGE2.4

Το IMAGE2.4 (Integrated Model to Assess the Global Environment) είναι ένα top-down μοντέλο το οποίο προσδιορίζει τις κοινωνικοοικονομικές δραστηριότητες και τις κινητήριες δυνάμεις της κλιματικής αλλαγής σε 26 περιοχές του κόσμου. Οι βασικοί παράγοντες που αναλύει το μοντέλο είναι οι κλιματικές αλλαγές, ο πληθυσμός και η μακροοικονομία και βάσει αυτών καθορίζει φυσικούς δείκτες για το σύστημα ενέργειας και βιομηχανίας, για το σύστημα γεωργίας και χρήσης γης και για το κλίμα και τους κύκλους του άνθρακα και του αζώτου. Η περίοδος προσομοίωσης του μοντέλου είναι 100 έτη. Η αβεβαιότητα των παραμέτρων αναλύεται ντετερμινιστικά, χρησιμοποιώντας το σύστημα (NUSAP) και τα σενάρια IPCC-SRES· και στοχαστικά χρησιμοποιώντας τις καμπύλες μάθησης του αγροοικονομικού μοντέλου GTAP. Το μοντέλο υπολογίζει τις οικονομικές ζημιές λόγω της κλιματικής αλλαγής χρησιμοποιώντας την συνάρτηση ζημιών του FAIR2.1. Οι ζημιές υπολογίζονται για συγκεκριμένες χρονικές περιόδους, συναρτήσεως του προβλεπόμενου διαθέσιμου κεφαλαίου, της απασχόλησης και της ελαστικότητας της παραγωγής ανά περίοδο. Ο

υπολογισμός του διαθέσιμου κεφαλαίου της επόμενης περιόδου γίνεται βάσει του κεφάλαιο, την υποτίμηση κεφαλαίου και των επενδύσεων της προηγούμενης περιόδου.

$$Y_t = A \cdot K_t^a \cdot L_t^{(1-a)},$$

$$K_{t+1} = K_t - \eta K_t + I_t$$

όπου Y : ΑΕΠ, K : κεφάλαιο, L : απασχόληση, a : ελαστικότητα της παραγωγής,

I : επενδύσεις, η : απόσβεση, t : χρονική περίοδος

9.2.7 ICAM-3

Το ICAM-3 είναι ένα πλαίσιο προσομοίωσης που εστιάζει στην πληρότητα των παραμέτρων, στην ακριβή αποτύπωση των αβεβαιοτήτων (παραμετρικά και διαρθρωτικά) και στην ποικιλομορφία των στοιχείων που εξετάζει (περιφερειακή δημογραφία, οικονομία, κλίμα και πολλαπλές επιπτώσεις). Το μοντέλο χρησιμοποιεί 2000 αβέβαιες παραμέτρους και πάνω από 212 δομικές αβεβαιότητες που αντανακλούν το επίπεδο της επιστημονικής γνώσης στην παρούσα στιγμή. Χωρίζει τον κόσμο σε 11 περιφέρειες και υπολογίζει τις επερχόμενες επιπτώσεις για ένα μεγάλο σύνολο ευαίσθητων τομέων που διευρύνεται από τις οικονομικές ζημιές στις αγορές των παράκτιων περιοχών έως τις επιπτώσεις στην υγεία του πληθυσμού των αστικών περιοχών. Οι προσομοιώσεις εκτελούνται για την περίοδο από το 1975 έως 2100, σε χρονικά διαστήματα 5 ετών.

Η συνάρτηση υπολογισμού των ζημιών υπολογίζει το συνολικό κόστος που προκύπτει από την λήψη εναλλακτικών πολιτικών σχετικά με την κλιματική αλλαγή και τις απώλειες στο ΑΕΠ που αυτές επιφέρουν. Τα κόστη που συνυπολογίζονται προκύπτουν από το μείγμα αποφάσεων για τα μέτρα μετριασμού της κλιματικής αλλαγής και την εφαρμογή εναλλακτικών εφαρμογών γεωμηχανικής που είναι φιλικότερες προς το περιβάλλον.

$$D = a.A + \gamma.G + \lambda.L(a, \gamma) : \text{συνολικό κόστος της κλιματικής αλλαγής,}$$

A : το διάλυμα του κόστους των εναλλακτικών δραστηριοτήτων μετριασμού, a το μείγμα αυτών των δραστηριοτήτων που επιλέγονται,

G : το διάλυμα του κόστους των διαφόρων γεω-μηχανικών εφαρμογών, γ το μείγμα αυτών των δραστηριοτήτων που επιλέγονται,

L : το διάλυμα των απωλειών (όπως του ΑΕΠ, των ειδών κ.λπ, στις φυσικές μονάδες μέτρησης τους)

το λ είναι η προβολή των απωλειών μέσα σε μία επιλεγμένη μονάδα μέτρησης.

9.3 Ανάλυση

Στον Πίνακα 11 παρουσιάζεται μια ανασκόπηση των μοντέλων της κατηγορίας μαζί με κάποια βασικά χαρακτηριστικά όπως η τεχνολογική πρόοδος, το γεωγραφικό και χρονικό εύρος προσομοίωσης και τις συναρτήσεις υπολογισμού των ζημιών των μοντέλων, όπου αυτές υπάρχουν. Όπως φαίνεται παρακάτω μερικά από τα μοντέλα, όπως το CIAS, το PAGE2002 και η μεταγενέστερη έκδοση του το PAGE2009 θεωρούν την τεχνολογική πρόοδο ενδογενής, ενώ τα υπόλοιπα την αναλύουν εξωγενώς. Μία εξαίρεση αποτελεί το ICAM-3 επειδή συμπεριλαμβάνει στην ανάλυση του ενδογενή και εξωγενή τεχνολογική πρόοδος. Όσον αφορά την δομή τους, τα περισσότερα μοντέλα της κατηγορίας είναι οικονομικά top-down μοντέλα, με εξαίρεση το ICAM3 που στηρίζεται σε ενεργειακή bottom-up δομή και το FUND που ενώ η βασική του δομή είναι bottom-up, έχει την δυνατότητα να τρέξει και top-down μοντέλα. Η περίοδος προσομοίωσης των μοντέλων κυμαίνεται από 100 έως 350 χρόνια. Τα PAGE2009 και PAGE2009 προσομοιώνουν από το 2000 έως το 2200 και τα IGSM και IMAGE2.4 από το 2000 έως το 2100, ενώ κάποια άλλα μοντέλα όπως το FUND, το CIAS και το ICAM3 είναι δομημένα έτσι ώστε να συμπεριλαμβάνουν δεδομένα από προηγούμενα έτη και να ξεκινούν ακόμα και από το 1950. Τα μοντέλα συνήθως εξετάζουν κάποια τμήματα του πλανήτη τα οποία διαχωρίζονται σε έναν συγκεκριμένο αριθμό περιφερειών, ενώ άλλα όπως το IGSM και το IMAGE2.4 εξετάζουν ολόκληρο τον πλανήτη χωρίζοντας τον και πάλι σε έναν συγκεκριμένο αριθμό περιοχών.

Πίνακας 11 Ανασκόπηση των μοντέλων που δεν εντάσσονται σε καμία από τις προαναφερόμενες κατηγορίες

Μοντέλο	Οικονομική δομή	Επίπεδο Γεωγραφικής Κάλυψης	Περίοδος Προσομοίωσης	Ζημιές Συνάρτηση ζημιών (damage function)	Πηγές
PAGE2002	top-down	Περιφερειακό (8)	2000-2200	$Dt = \frac{Tpret^{pow}}{2,5} \cdot W + (Tpret - Tdis) \cdot Pdis \cdot Wdis$ <p><i>Dt</i>: οι ζημιές ως ποσοστό του ΑΕΠ <i>Tpre</i>: παγκόσμια θερμοκρασία μετά την προβιομηχανική εποχή <i>W</i>: η πτώση του ΑΕΠ για 2,5C αύξηση της θερμοκρασίας <i>Pdis</i>: παράμετρος που προβάλλει την πιθανότητα ασυνέχειας, <i>Tdis</i>: θερμοκρασία με πιθανότητα ασυνέχειας</p>	(Hof et al., 2008)

Μοντέλο	Οικονομική δομή	Επίπεδο Γεωγραφικής Κάλυψης	Περίοδος Προσομοίωσης	Ζημιές Συνάρτηση ζημιών (damage function)	Πηγές
PAGE2009	top-down	Περιφερειακό (8)	2000-2200	$D = a \cdot \frac{Tact^\beta}{Tcal}$ <i>D : ζημιές, a: ζημιές που αντιστοιχούν σε βαθμονόμηση Tcal: βαθμονομημένη αύξηση της θερμοκρασίας TACT: η πραγματική αύξηση της θερμοκρασίας b: εκθέτης των ζημιών</i>	(Pycroft et al., 2011)
FUND	bottom-up & top-down	Περιφερειακό (16)	1950-2300	<p>Η ζημία στο FUND υπολογίζεται από τις επιδράσεις της κλιματικής αλλαγής στην αγοράς και από τις επιδράσεις στους μη εμπορικούς τομείς (π.χ. υγεία). Οι πρώτες επηρεάζουν τις επενδύσεις (οικονομική ανάπτυξη) και την κατανάλωση (ευημερία). Η μονάδα υπολογισμού του κόστους των ζημιών παρουσιάζεται λεπτομερώς στο (Ortiz και Markandya, 2009), ενώ στη βιβλιογραφία χρησιμοποιούνται και άλλες συναρτήσεις ζημιών (Anthoff et al., 2009; Narita et al., 2009; Tol, 2002).</p>	(Ortiz and Markandya, 2009) (Anthoff et al., 2009) (Narita et al., 2009) (Tol, 2002)
CIAS	top-down	Περιφερειακό (20)	1951-2100	Κανένας συστηματικός υπολογισμός των ζημιών.	(Schellhuber et al., 2003)
IGSM2	top-down	Παγκόσμιο	2000-2100	Κανένας συστηματικός υπολογισμός των ζημιών. Το IGSM2, περιλαμβάνει το μοντέλο γενικής ισορροπίας MIT-EPPA.	
IMAGE 2.4	top-down	Παγκόσμιο (26 περιοχές)	2000-2100	$Y_t = A \cdot K_t^a \cdot L_t^{1-a}$ <i>Y: GDP, K: κεφάλαια, L: εργασία, a: ελαστικότητα της παραγωγής, K_{t+1} = K_t - η * K_t + I_t, η: απόσβεση, I: επενδύσεις</i>	(Bouwman et al., 2006)
ICAM-3	bottom-up	Περιφερειακό (11)	1975-2100	$D = a \cdot A + \gamma \cdot G + \lambda \cdot L(a, \gamma)$ <p>το συνολικό κόστος της κλιματικής αλλαγής A: το διάνυσμα του κόστους των εναλλακτικών δραστηριοτήτων μετριασμού, α : είναι ο συνδυασμός αυτών των δραστηριοτήτων που επιλέγουμε. G: το διάνυσμα του κόστους των διαφόρων εφαρμογών γεω-μηχανικής, γ: είναι το μείγμα αυτών των εφαρμογών που επιλέγουμε. L: είναι η μεταβλητή των απωλειών λ: είναι η προβολή των απωλειών μίας επιλεγμένης μέτρησης.</p>	(Dowlatabadi et al., 1993)

Εδώ επισημαίνεται μία διαφορετική προσέγγιση της εκτίμησης των επιπτώσεων από αυτή που αναφέρθηκε στα μοντέλα βέλτιστης ανάπτυξης DICE και RICE. Πρόκειται για τις εκτιμήσεις των ζημιών που συντάχθηκαν από τον Tol και τους συναδέλφους του, οι οποίες εφαρμόστηκαν στο FUND και τροποποιήθηκαν για το WIAGEM. Η

μέθοδος αυτή εντάσσει ξεχωριστές συναρτήσεις ζημιών για τους βασικούς τομείς που επηρεάζονται από την κλιματική αλλαγή. Η τομείς αυτοί σχετίζονται με τη γεωργία, τη δασοκομία, τη κατανάλωση ενέργειας, τον κύκλο του νερού, το πόσιμο νερό, τη στάθμη των ωκεανών, τις ακτές (απώλειες σε υδροβιότοπους, απώλειες σε ξηρού εδάφους και κόστος προστασίας), την ανθρώπινη υγεία (διάρροιες, καρδιαγγειακή και αναπνευστική θνησιμότητα κ.α.) και την ανάπτυξη των οικισμών και των υποδομών. Οι συναρτήσεις των ζημιών είναι βασισμένες στον συνδυασμό ενός μεγάλου συνόλου μελετών, που χρησιμοποιούν γεωγραφικά σενάρια συνυφασμένα με την κλιματική αλλαγή. Εδώ οι κλιματικές επιπτώσεις εξαρτώνται από το επίπεδο και τον ρυθμό της αλλαγής της Μέσης Παγκόσμιας Θερμοκρασίας, της αλλαγής της στάθμης της θάλασσας, των καταιγίδων και των ανεμοθύελλων, των πλημμυρών των ποταμών και της συγκέντρωσης του CO₂. Επίσης, ενώ τα περισσότερα IAM βελτιστοποίησης της ευημερίας αντιπροσωπεύουν τις ζημιές λόγω του κλίματος ως απώλειες του εισοδήματος, εδώ λαμβάνεται υπόψιν ότι υπάρχουν και άλλες επιπτώσεις που συνεπάγονται απώλειες στα αποθέματα κεφαλαίου και μείωση της παραγωγικότητας. Για τον λόγο αυτό, οι ζημιές στο FUND υπολογίζονται από τις μειώσεις στην κατανάλωση και στις επενδύσεις. Ένα άλλο ασυνήθιστο χαρακτηριστικό που εντάσσεται σε αυτό το μοντέλο είναι η χρήση βιοφυσικών και νομισματικών μετρήσεων για την εκτίμηση των επιπτώσεων στην ανθρώπινη υγεία. Οι εκτιμήσεις αυτές βασίζονται στην βιβλιογραφία για την εμφάνιση ασθενειών και την αύξηση της θνησιμότητας που προκαλούνται από την αλλαγή του κλίματος. Έτσι οι απώλειες στην υγεία και στον πληθυσμό μετατρέπονται σε χρηματικές ζημιές που βασίζονται στο κατά κεφαλήν εισόδημα στην πληγείσα περιοχή. Οι συναρτησιακές σχέσεις μεταξύ των κλιματικών μεταβλητών και των ζημιών σε κάθε τομέα που καλύπτεται από το FUND βασίζονται σε μεγάλο βαθμό στην εμπειρογνωσιακή κρίση του Tol.

Άλλη μια σημαντική ομοιότητα που παρατηρείται μεταξύ των παραπάνω μοντέλων συνιστάται στην ιδιαίτερη βαρύτητα που έχει δοθεί στην ανάλυση της αβεβαιότητας των παραμέτρων που λαμβάνονται στις μελέτες. Η εκτίμηση της αβεβαιότητας σχετικά με τις μελλοντικές κλιματικές συνθήκες, την σταθεροποίηση των εκπομπών και τον τρόπο που θα επηρεάσουν την οικονομία, το περιβάλλον και τον πληθυσμό παίζει καθοριστικό ρόλο για την υποστήριξη της λήψης πολιτικών αποφάσεων. Όπως φαίνεται στον Πίνακα 12, όλα τα μοντέλα συμπεριλαμβάνουν ντετερμινιστική και στοχαστική ανάλυση ταυτόχρονα, με εξαίρεση το CIAS που εκτελεί μόνο στοχαστική

Monte Carlo ανάλυση. Έτσι για παράδειγμα το ICAM-3 ενσωματώνει στην ανάλυση αβεβαιότητας περισσότερες από 2000 παραμέτρους υπολογίζοντας κατανομές πιθανοτήτων και εκτελώντας ανάλυση σεναρίων και υπολογισμό ευαισθησίας. Το PAGE2002 από την άλλη, εμπεριέχει ανάλυση σεναρίων, κατανομές πιθανοτήτων και Latin Hypercube δειγματοληψία, ενώ στο PAGE2009 εκτός από τα παραπάνω προστίθεται και ανάλυση ευαισθησίας των παραμέτρων. Άλλα μοντέλα όπως το FUND, το IMAGE2.4 και το IGSM2 αναπτύσσουν στοχαστική Monte Carlo ανάλυση και ντετερμινιστική ανάλυση σεναρίων όπου το IMAGE2.4 εκτελεί και ανάλυση ευαισθησίας.

Πίνακας 12 Τεχνολογική Πρόοδος και Ανάλυση της Αβεβαιότητας στα Μοντέλα που δεν εντάσσονται σε καμία από τις προαναφερόμενες κατηγορίες

Μοντέλο	Τεχνολογική Πρόοδος	Ανάλυση της Αβεβαιότητας		Παράγοντας αβεβαιότητας
		Ντετερμινιστική	Στοχαστική	
PAGE2002	Ενδογενής	ανάλυση σεναρίων	κατανομές πιθανοτήτων; Latin Hypercube δειγματοληψία	τα επίπεδα σταθεροποίησης των εκπομπών, περισσότερες από 80 παραμέτρους εισόδου (ανάλογα με τον αριθμό των τομέων και των επιλεγμένων περιοχών), Hope, C. W. (2008)
PAGE2009	Ενδογενής	ανάλυση σεναρίων, ανάλυση ευαισθησίας	Latin Hypercube δειγματοληψία	τα επίπεδα σταθεροποίησης των εκπομπών (Hope, 2011), η ευαισθησία του κλίματος, το προεξοφλητικό επιτόκιο (Pycroft et al., 2011)
FUND	Εξωγενής	ανάλυση σεναρίων	Monte Carlo ανάλυση	το επίπεδο μείωσης των εκπομπών του μείγματος αερίων ρύπων (ToI, 2006), οι κλιματικές ζημιές (Ackerman and Munitz, 2012)
CIAS	Ενδογενής	ανάλυση σεναρίων		τα επίπεδα σταθεροποίησης των εκπομπών (Warren et al., 2012)
IGSM2	Εξωγενής	ανάλυση σεναρίων	Monte Carlo ανάλυση	η μείωση των εκπομπών του μείγματος αερίων ρύπων, ο συνδυασμός των κλιματικών πολιτικών (Reilly et al., 2006), οι κλιματικές παράμετροι, οι ανθρωπογενείς εκπομπές (Webster et al., 2003), το επίπεδο των κλιματικών αλλαγών (Webster et al., 2012)

Μοντέλο	Τεχνολογική Πρόοδος	Ανάλυση της Αβεβαιότητας		Παράγοντας αβεβαιότητας
		Ντετερμινιστική	Στοχαστική	
IMAGE 2.4	Εξωγενής	ανάλυση σεναρίων, ανάλυση ευαισθησίας	Monte Carlo ανάλυση	οι παραλλαγές στις διατροφικές συνήθειες των πληθυσμών, οι μεταβολές της παραγωγής του CO ₂ , η περίοδος ανάκαμψης της φυσικής βλάστησης, οι πιθανές ανατροφοδοτήσεις για εντατικοποίηση στο γεωργικό σύστημα (Stehfest et al., 2009), μεγάλος αριθμός αβέβαιων παραμέτρων εισόδου (van Vuuren, 2007)
ICAM-3	Ενδογενής και Εξωγενής	ανάλυση σεναρίων, ανάλυση ευαισθησίας	κατανομές πιθανοτήτων	η μείωση της καθυστέρησης της δράσης για το κλίμα, η εμπειρία με τεχνολογίες ελέγχου, περισσότερες από 2000 στοχαστικές παραμέτρους σχετικές με τις αναλύσεις που ακολουθούνται από το μοντέλο, τα δημογραφικά στοιχεία, η οικονομική δραστηριότητα, η διαθεσιμότητα των φυσικών πόρων και οι τιμές των ορυκτών και μη ορυκτών καυσίμων, η ενεργειακή ένταση της οικονομικής δραστηριότητας, οι βραχυπρόθεσμες προσαρμογές του προϋπολογισμού όταν αλλάζουν οι τιμές της ενέργειας (Dowlatabadi, 1998)

9.4 Το μοντέλο PAGE2002

Ένα από τα πιο αξιοσημείωτα μοντέλα αυτής της κατηγορίας είναι το **PAGE2002**. Πρόκειται για ένα ολοκληρωμένο μοντέλο αξιολόγησης, το οποίο αναπτύχθηκε ως μοντέλο προσομοίωσης υπολογιστών το 1992 για χρήση στη λήψη αποφάσεων στο πλαίσιο της Ευρωπαϊκής Επιτροπής. Το PAGE2002 έχει σχεδιαστεί να εκτελεί γρήγορες επαναλήψεις χρησιμοποιώντας τυχαίο δείγμα αβέβαιων εισροών (Plambeck et al., 1997) και παράγοντας πλήρη και αξιόπιστα αποτελέσματα με χρήση απλούστερων συναρτησιακών μορφών που καθιστούν τις διαδικασίες διαφανείς και προσπελάσιμες για τους χρήστες, διαμορφωτές πολιτικών (Hope et al., 1993). Ενώ τα περισσότερα IAM έχουν υψηλή πολυπλοκότητα και δυσχεραίνουν την παρατήρηση της ροής των διαδικασιών και των αλληλεπιδράσεων, το PAGE καταφέρνει να προσεγγίσει όλες τις πτυχές των σύνθετων φαινομένων κλίματος-οικονομίας και της βαθιάς αβεβαιότητας με χρήση απλών εξισώσεων (Hope2006). Η κεντρική εστίαση

του μοντέλου στην ανάλυση της αβεβαιότητας το έφερε πρόσφατα στην επικαιρότητα, αφού αποτέλεσε αιτία για να επιλεγεί από την ομάδα Stern για τους περισσότερους από τους υπολογισμούς των συνολικών επιπτώσεων λόγω της κλιματικής αλλαγής που δημοσιεύτηκαν. Η ανάλυση της αβεβαιότητας γίνεται στοχαστικά με υπολογισμό κατανομών πιθανοτήτων για τις οριακές περιπτώσεις των εισροών και προσεγγιστικών κατανομών πιθανοτήτων για τις εκροές του μοντέλου (αύξησης της θερμοκρασίας, των ζημιών στην κλιματική αλλαγή και του κόστους προσαρμογής και πρόληψης). Οι υπολογισμοί των αβεβαιοτήτων χρησιμοποιούνται στην ανάλυση κινδύνου ώστε να προκύψουν ακριβέστερες εκτιμήσεις του κόστους παρέμβασης και του οφέλους μετριασμού και με σκοπό να υποστηρίξουν τη λήψη αποφάσεων από τους αρμόδιους (Plambeck et al., 1997).

Η πλήρη περιγραφή του PAGE2002 μαζί με όλες τις εξισώσεις του μοντέλου διατίθεται στο Hope(2006). Το μοντέλο διαθέτει εξισώσεις υπολογισμού της αύξησης της θερμοκρασίας λόγω των ανθρωπογενών συγκεντρώσεων των αερίων του θερμοκηπίου και εξισώσεις υπολογισμού των ζημιών που υπολογίζουν τις οικονομικές και εκτός οικονομίας ζημιές που προκαλούνται από αυτή την αύξηση. Δεν υπάρχει μονάδα οικονομίας, ενώ τα οικονομικά στοιχεία που υπολογίζονται σχετίζονται με τις οικονομικές ζημιές και τον υπολογισμό του κόστους αποφυγής ή μετριασμού αυτών των ζημιών μέσω προσαρμογής ή μείωσης των εκπομπών. Κατά την εκτίμηση των ζημιών το μοντέλο δεν λαμβάνει κανέναν τύπο γενικής ισορροπίας για τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ των ζημιών των διαφόρων οικονομικών τομέων. Η εκτίμηση γίνεται με μια enumerative προσέγγιση, απλή συνάθροιση των επιμέρους ζημιών, με αποτέλεσμα τα αναμενόμενα αποτελέσματα των συνολικών ζημιών να είναι μικρότερα από αυτά των μοντέλων που βασίζονται σε γενική ισορροπία. Κατά τον υπολογισμό των ζημιών το μοντέλο λαμβάνει οριακές τιμές και ποσοστά για την αύξηση της θερμοκρασίας πάνω από τα οποία θεωρητικά εμφανίζονται οι επιπτώσεις. Οι οριακές τιμές υπολογίζονται σύμφωνα με έναν περιφερειακό πολλαπλασιαστή που διαφέρει για κάθε γεωγραφική περιοχή, ενώ το επίπεδο των περιφερειακών ανεκτών ποσοστών αύξησης ρυθμίζεται σύμφωνα με τις πολιτικές προσαρμογής που εφαρμόζονται τοπικά. Τα μέτρα προσαρμογής στην μεταβολή του κλίματος που λαμβάνονται τοπικά μπορούν να αυξήσουν τα ανεκτά ποσοστά και επίπεδο αύξησης της θερμοκρασίας. Έτσι ο υπολογισμός του αντίκτυπου της μεταβολής του κλίματος μίας περιφέρειας συνιστάται από μια συνάρτηση της περιφερειακής αύξησης της θερμοκρασίας και μια σύγκριση

του κατά πόσο αυτή υπερβαίνει τον ανεκτό περιφερειακό ποσοστό ή επίπεδο της θερμοκρασίας.

Ο υπολογισμός της νομισματικής απώλειας της αξίας που προκύπτει από την άνοδο της θερμοκρασίας γίνεται μέσω ενός σταθμισμένου δείκτη που συνιστά ένα τοπικό σταθμισμένο ποσοστό απώλειας του ΑΕΠ (βάσει εκτιμήσεων), κατά το εκτιμώμενο ΑΕΠ των περιφερειών, ο οποίος πολλαπλασιάζεται με την υπέρβαση της περιφερειακής αύξησης της θερμοκρασίας. Οι οικονομικές ζημιές υπολογίζονται για κάθε μια από τις 8 περιφέρειες του μοντέλου, για τους τομείς της αγοράς και για τους μη εμπορικούς τομείς και για κάθε χρονική περίοδο. Με την πρόσθεση των ζημιών σε επίπεδο αγοράς και σε επίπεδο μη εμπορικού τομέα, το μοντέλο βρίσκει τις συνολικές ζημιές ανά περιφέρεια και ανά περίοδο και αυτό μπορεί στη συνέχεια να προεξοφληθεί με περιφερειακά και χρονικά μεταβλητά προεξοφλητικά επιτόκια. Προκειμένου να υπολογιστεί η καθαρή παρούσα αξία των επιπτώσεων της παγκόσμιας αλλαγής του κλίματος το μοντέλο συγκεντρώνει τις καθαρές παρούσες αξίες όλων των περιφερειακών ζημιών.

Ένα σημαντικό σημείο για την διαδικασία της λήψης αποφάσεων σχετικά με την κλιματική αλλαγή είναι ο υπολογισμός του **κόστους πρόληψης** και του **κόστους προσαρμογής**. Τα κόστη πρόληψης της αλλαγής του κλίματος βασίζονται σε εκτιμήσεις για τον μετριασμό των εκπομπών που δημιουργούνται από τους επιχειρηματικούς κλάδους μιας περιοχής και σταθμίζονται για κάθε περιφέρεια ακολουθώντας φθίνουσα πορεία με την πάροδο του χρόνου. Αν και το μοντέλο συμπεριλαμβάνει μόνο το άμεσο κόστος πρόληψης των εκπομπών των αερίων του θερμοκηπίου, μπορούν να ενσωματωθούν και δευτερεύοντα οφέλη (όπως η ταυτόχρονη μείωση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης) με τη μείωση των παραμέτρων του προληπτικού κόστους. Τα κόστη προσαρμογής από την άλλη, εξαρτώνται από το εύρος των μέτρων προσαρμογής που λαμβάνονται και την μεταβολή του ανεκτού ποσοστού και επιπέδου αύξησης της θερμοκρασίας που μπορεί να επιτευχθούν με αυτά. Η καθαρή παρούσα αξία του κόστους προσαρμογής μπορεί να υπολογιστεί από το μοντέλο με κατάλληλη στάθμιση και χρήση παραμέτρων αβεβαιότητας για κάθε περιφέρεια. Η αβεβαιότητα εμφανίζεται σε πολλές από τις εξισώσεις του μοντέλου και αφορά τις παραμέτρους που αποτυπώνουν την υπερθέρμανση από τον διπλασιασμό του διοξειδίου του άνθρακα, την μελλοντική ανάπτυξη ή τις μελλοντικές πολιτικές που θα

εφαρμοστών, κλπ. Το μοντέλο διαθέτει περίπου 80 παραμέτρους αβεβαιότητας ανάλογα με τις περιοχές και τους τομείς που χρησιμοποιούνται για μια δεδομένη εφαρμογή.

10

Συμπεράσματα και Παρατηρήσεις

Η ανάλυση της παρούσας εργασίας επικεντρώθηκε στην ανάδειξη των βασικών χαρακτηριστικών γνωρισμάτων των εναλλακτικών πλαισίων μοντελοποίησης κλίματος-οικονομίας. Ο βασικός στόχος ήταν η παροχή μιας απλής επισκόπησης και ταξινόμησης του τεράστιου συνόλου προσεγγίσεων των ολοκληρωμένων μοντέλων αξιολόγησής. Αντί να προσπαθήσει να δώσει σύντομες περιγραφές ενός μεγάλου αριθμού μοντέλων κλίματος-οικονομίας η παρούσα εργασία επικεντρώθηκε στην απεικόνιση των βασικών χαρακτηριστικών ενός μικρού αριθμού διαφορετικών κατηγοριών μοντέλων, ενώ παράλληλα ασχολήθηκε και με ορισμένες βασικές πτυχές της προοπτικής, της δομής, της γεωγραφικής και χρονικής κάλυψης και των τρόπων αντιμετώπισης της αβεβαιότητας και της τεχνολογικής προόδου των μοντέλων. Επιπλέον, δεν έγινε προσπάθεια να εξεταστούν ή να συγκριθούν τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων ενός συνόλου εναλλακτικών μοντέλων, διότι υπάρχουν ήδη πολλές έρευνες που πραγματοποιούν τέτοια σύγκριση εξετάζοντας τα χαρακτηριστικά των μοντέλων και τις διαφορετικές παραδοχές που ενσωματώνονται σε αυτά. Ορισμένοι υποστηρίζουν ότι το πρότυπο πλαίσιο μπορεί να έχει σημαντικές επιπτώσεις στα αποτελέσματα. Για παράδειγμα οι Lanz και Rausch (2011) δείχνουν συστηματικές διαφορές στα αποτελέσματα των μοντέλων γενικής ισορροπίας και των μοντέλων του ενεργειακού συστήματος. Αντιθέτως μία έρευνα από τους Edenhofer et al. (2006) υποδηλώνει ότι οι υποκείμενες διαφορές στα αποτελέσματα δεν οφείλονται αναγκαστικά στον τύπο μοντέλου, αλλά στις υποθέσεις που συνήθως κάνουν οι ερευνητές που χρησιμοποιούν τους διαφορετικούς τύπους μοντέλων. Η διάκριση μεταξύ «του τύπου του μοντέλου» και «των παραδοχών» μπορεί να είναι κάπως ασαφής, όμως η βαθύτερη κατανόηση της μοντελοποίησης κλίματος-οικονομίας απαιτεί λεπτομερή διάκριση του ρόλου των διαφόρων παραδοχών που ενσωματώνονται άμεσα ή έμμεσα στις προσομοιώσεις. Πολλές έρευνες για το ζήτημα κλίματος-οικονομίας επικεντρώνονται μεταξύ άλλων, σε μια σύγκριση του ρόλου των παραδοχών που λαμβάνονται (π.χ., Stanton et al., 2009, Söderholm, 2007).

Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι η κατηγοριοποίηση των μοντέλων που παρουσιάζεται σε αυτή την εργασία περιέχει κάποιες αποκλίσεις που αφορούν την διαφοροποίηση των χαρακτηριστικών μερικών μοντέλων που μπορεί να ανήκουν σε περισσότερες από μια κατηγορίες. Επιπλέον, λόγω της τάσης των μοντέλων να αναπτύσσονται και να εισάγουν νέες βελτιωμένες μεθόδους στην δομή τους, παρατηρείται μια ανταλλαγή ενοτήτων ανάμεσα σε διαφορετικές προσεγγίσεις η οποία δυσχεραίνει περαιτέρω την διάκριση. Η αιτία της ύπαρξης πολλών διαφορετικών προσεγγίσεων μοντελοποίησης πηγάζει από τα διαφορετικά ερευνητικά ερωτήματα τα οποία προσπαθούν να απαντήσουν τα μοντέλα. Η επιλογή και ο σχεδιασμός των μοντέλων εστιάζουν στην πραγματοποίηση αναλύσεων όπως τον υπολογισμό του κόστους μείωσης των εκπομπών και του κόστους μείωσης των μακροπρόθεσμων ζημιών της κλιματικής αλλαγής, ή στην πραγματοποίηση σύγκρισης συγκεκριμένων πολιτικών και τον προσδιορισμό ενός συνολικού βέλτιστου παγκόσμιου στόχου για το κλίμα. Αν ο σκοπός της ανάλυσης είναι η κατανόηση των επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής στην εθνική οικονομία, ένα πιο λεπτομερές πολύ-τομεακό μοντέλο μπορεί να είναι καταλληλότερο από ένα μοντέλο βέλτιστης ανάπτυξης, το οποίο αντιμετωπίζει την οικονομία ως ενιαίο τομέα καταγράφοντας τη μακροπρόθεσμη τροχιά της παγκόσμιας οικονομίας. Οι διαφορές των προσεγγίσεων μπορεί να αντικατοπτρίζουν και βαθύτερες φιλοσοφικές διαμάχες, όπως το αν είναι σωστή η θεώρηση του τέλει ανταγωνισμού της αγοράς στην μοντελοποίησης κλίματος-οικονομίας. Επίσης μπορεί να προκύπτουν από την ανάγκη της ανάδειξης κάποιου ιδιαίτερου χαρακτηριστικού της κλιματικής αλλαγής, όπως η αβεβαιότητα. Η επιρροή της αβεβαιότητας στα αποτελέσματα των μοντέλων πηγάζει από όλες τις πτυχές της ανάλυσης κλίματος-οικονομίας και συνήθως αντιμετωπίζεται με ντετερμινιστικές ή στοχαστικές προσεγγίσεις που ενσωματώνονται στα διάφορα πλαίσια μοντελοποίησης.

Είναι βέβαιο ότι αυτές και πολλές άλλες αιτίες της πολυμορφίας των μοντέλων θα συνεχίσουν να οδηγούν στην ανάπτυξη νέων, βελτιωμένων προσεγγίσεων μοντελοποίησης. Προς το παρόν, οι νέες κατευθύνσεις στην επιστημονική υποστήριξη της κλιματικής πολιτικής υποδεικνύουν την αναγκαιότητα αξιοποίησης συνόλων πολλαπλών διαφορετικών μοντέλων κλίματος-οικονομίας, από όλες τις κατηγορίες που μελετήθηκαν (Doukas et al., 2018), καθώς και συμμετοχής εμπειρογνομόνων (Nikas et al., 2017). Έτσι, παρά το γεγονός ότι η παρούσα εργασία απλώς αγγίζει την επιφάνεια της ανάλυσης κλίματος-οικονομίας και της μοντελοποίησης των IAM, το ακόλουθο

απόσπασμα μοιάζει κατάλληλο για το κλείσιμο αυτής της συζήτησης η οποία αντιμετωπίζει την τεράστια πρόκληση της ανάλυσης και της κατανόησης των απαιτούμενων πολιτικών μέτρων για το κλίμα: «Είναι δύσκολο να δημιουργηθεί ένα ολοκληρωμένο μοντέλο αξιολόγησης το οποίο να είναι σε θέση να παρέχει τις καλύτερες απαντήσεις σε όλες τις ερωτήσεις. Αντίθετα, [...] τα σχετικά πλεονεκτήματα και οι αδυναμίες των διαφορετικών πλαισίων εξασφαλίζουν ότι οι συνδυασμένες συνεισφορές και όχι τα μεμονωμένα μοντέλα, μπορούν να παρέχουν πολύτιμες γνώσεις για την κλιματική πολιτική, στις οποίες μπορούν να συμβάλουν νέες προσεγγίσεις και νέα πλαίσια για τη σύζευξη οικονομικών και κλιματικών μοντέλων», (Toth, 2005).

11

Βιβλιογραφία

Ackerman, F., & Munitz, C. (2012). Climate damages in the FUND model: A disaggregated analysis. *Ecological Economics*, 77, 219-224.

Ackerman, F., & Stanton, E. (2012). Climate risks and carbon prices: Revising the social cost of carbon.

Ackerman, F., DeCanio, S. J., Howarth, R. B., & Sheeran, K. (2009). Limitations of integrated assessment models of climate change. *Climatic change*, 95(3), 297-315.

Ackerman, F., Stanton, E. A., & Bueno, R. (2010). Fat tails, exponents, extreme uncertainty: Simulating catastrophe in DICE. *Ecological Economics*, 69(8), 1657-1665.

Akashi, O., Hijioaka, Y., Masui, T., Hanaoka, T., & Kainuma, M. (2012). GHG emission scenarios in Asia and the world: The key technologies for significant reduction. *Energy Economics*, 34, S346-S358.

Akimoto, K., Sano, F., Homma, T., Oda, J., Nagashima, M., & Kii, M. (2010). Estimates of GHG emission reduction potential by country, sector, and cost. *Energy Policy*, 38(7), 3384-3393.

Akimoto, K., Tomoda, T., Fujii, Y., & Yamaji, K. (2004). Assessment of global warming mitigation options with integrated assessment model DNE21. *Energy Economics*, 26(4), 635-653.

Azar C, Dowlatabadi H (1999) A review of technical change in assessment of climate policy. *Annu Rev Energy Environ* 24:513–544

Barker, T. (1998). The effects on competitiveness of coordinated versus unilateral fiscal policies reducing GHG emissions in the EU: an assessment of a 10% reduction by 2010 using the E3ME model. *Energy Policy*, 26(14), 1083-1098.

Barker, T. (1999). Achieving a 10% cut in Europe's carbon dioxide emissions using additional excise duties: coordinated, uncoordinated and unilateral action using the econometric model E3ME. *Economic Systems Research*, 11(4), 401-422.

Barker, T., & Ekins, P. (2001). How High are the Costs of Kyoto for the US Economy (No. 4). Tyndall Centre working paper.

Barker, T., & Rosendahl, K. E. (2000). Ancillary Benefits of GHG Mitigation in Europe: SO₂, NO_x and PM₁₀ reductions from policies to meet Kyoto targets using the E3ME model and Externe valuations. *Ancillary Benefits and Costs of Greenhouse Gas Mitigation*, 413-450.

Barker, T., & Scricciu, S. Ş. (2010). Modeling Low Climate Stabilization with E3MG: Towards a 'New Economics' Approach to Simulating Energy-Environment-Economy System Dynamics. *The Energy Journal*, 137-164.

Barker, T., & Zagame, P. (1995). E3ME: An Energy-Environment-Economy Model for Europe. Brüssel, European Commission.

Barker, T., Anger, A., Chewpreecha, U., & Pollitt, H. (2012). A new economics approach to modelling policies to achieve global 2020 targets for climate stabilisation. *International Review of Applied Economics*, 26(2), 205-221.

Barker, T., Ekins, P., & Foxon, T. (2007). The macro-economic rebound effect and the UK economy. *Energy Policy*, 35(10), 4935-4946.

Barker, T., Pan, H., Köhler, J., Warren, R., & Winne, S. (2006). Decarbonizing the global economy with induced technological change: scenarios to 2100 using E3MG. *The Energy Journal*, 241-258.

Barker, T., Scricciu, S. S., & Foxon, T. (2008). Achieving the G8 50% target: modelling induced and accelerated technological change using the macro-econometric model E3MG. *Climate Policy*, 8(sup1), S30-S45.

Barreto, L., & Kypreos, S. (2004). Endogenizing R&D and market experience in the "bottom-up" energy-systems ERIS model. *Technovation*, 24(8), 615-629.

Bchir, H., Decreux, Y., Guérin, J. L., & Jean, S. (2002). MIRAGE, a computable general equilibrium model for trade policy analysis (Vol. 17). CEPII Working paper.

Bchir, M. H., Fontagné, L., & Zanghieri, P. (2003). The impact of EU enlargement on Member States: a CGE approach (Vol. 10). CEPII.

Bernstein, P. M., Montgomery, W. D., & Rutherford, T. F. (1999a). Global impacts of the Kyoto agreement: results from the MS-MRT model. *Resource and Energy Economics*, 21(3), 375-413.

Bernstein, P. M., Montgomery, W. D., Rutherford, T. F., & Yang, G. F. (1999b). Effects of restrictions on international permit trading: the MS-MRT model. *The Energy Journal*, 221-256.

Boehringer, C., 1998. The synthesis of bottom-up and top-down in energy policy modeling. *Energy Economics* 20, 233–248

Bollen, J. (2015). The value of air pollution co-benefits of climate policies: analysis with a global sector-trade CGE model called WorldScan. *Technological Forecasting and Social Change*, 90, 178-191.

Bollen, J. C., & Gielen, A. M. (1999). Economic impacts of multilateral emission reduction policies: simulations with WorldScan. In *International Environmental Agreements on Climate Change* (pp. 155-167). Springer Netherlands.

Bosello, F. (2010). *Adaptation, Mitigation and Green R&D to Combat Global Climate Change. Insights from an Empirical Integrated Assessment Exercise.*

Bosello, F., De Cian, E., Eboli, F., & Parrado, R. (2009). Macro economic assessment of climate change impacts: a regional and sectoral perspective. *Impacts of Climate Change and Biodiversity Effects. Final report of the CLIBIO project*, European Investment Bank, University Research Sponsorship Programme.

Bosello, F., Eboli, F., Parrado, R., & Rosa, R. (2010). REDD in the carbon market: A general equilibrium analysis.

Bosetti, V., Carraro, C., & Galeotti, M. (2005). The dynamics of carbon and energy intensity in a model of endogenous technical change.

Bosetti, V., Carraro, C., Duval, R., Sgobbi, A., & Tavoni, M. (2009). The role of R&D and technology diffusion in climate change mitigation: new perspectives using the WITCH model.

Bosetti, V., Golub, A., Markandya, A., Massetti, E., & Tavoni, M. (2008). Abatement Cost Uncertainty and Policy Instrument Selection. A Dynamic Analysis. 2008), *Modelling Environment-Improving Technological Innovations under Uncertainty*, Oxon, UK and New York, USA: Routledge, 127-157.

Bosetti, V., Massetti, E., & Tavoni, M. (2007). *The WITCH model: structure, baseline, solutions.*

Bouwman, A. F., Kram, T., & Klein Goldewijk, K. (2006). Integrated modelling of global environmental change. An overview of IMAGE 2.4.

Buchner, B., & Carraro, C. (2005). Modelling climate policy: Perspectives on future negotiations. *Journal of Policy Modeling*, 27(6), 711-732.

Bukowski, M., & Kowal, P. (2010). Large scale, multi-sector DSGE model as a climate policy assessment tool. Instytut Badań Strukturalnych, Warszawa, 3.

Buonanno, P., Carraro, C., & Galeotti, M. (2003). Endogenous induced technical change and the costs of Kyoto. *Resource and Energy economics*, 25(1), 11-34.

Burniaux, J. M. (1998). How important is market power in achieving Kyoto? An assessment based on the GREEN model. In *Proceedings of the Workshop on Economic Modelling and Climate Change* (pp. 17-18).

Burniaux, J. M., & Truong, T. P. (2002). GTAP-E: an energy-environmental version of the GTAP model. *GTAP Technical Papers*, 18.

Burniaux, J. M., Martin, J. P., Nicoletti, G., & Martins, J. O. (1992). GREEN a Multi-Sector, Multi-Region General Equilibrium Model for Quantifying the Costs of Curbing CO₂ Emissions.

Cambridge Econometrics (2014). E3ME technical manual, version 6.0 April 2014. University of Cambridge, Cambridge, UK.

Capros, P., De Vita, A., Tasios, N., Siskos, P., Kannavou, M., Petropoulos, A., Evangelopoulou, S., Zampara, M., Papadopoulos, D., Nakos, C., & Paroussos, L. (2016). EU Reference Scenario 2016-Energy, transport and GHG emissions Trends to 2050

Capros, P., & Manzos, L. (2000). The economic effects of EU-wide industry-level emission trading to reduce greenhouse gases: results from PRIMES Energy Systems Model.

Capros, P., Mantzos, L., Kolokotsas, D., Ioannou, N., Georgakopoulos, T., Filippopoulitis, A., & Antoniou, Y. (1998). The PRIMES energy system model-reference manual. National Technical University of Athens.

Capros, P., Mantzos, L., Papandreou, V., Tasios, N., & Mantzaras, A. (2007). Energy systems analysis of CCS Technology; PRIMES model scenarios. E3ME-lab/ICCS/National Technical University of Athens, Athens. Final report to DG ENV.

Capros, P., Mantzos, L., Vouyoukas, L., & Petrellis, D. (1999). European Energy and CO₂ Emissions Trends to 2020: PRIMES model v. 2. *Bulletin of Science, Technology & Society*, 19(6), 474-492.

Capros, P., Tasios, N., De Vita, A., Mantzos, L., & Paroussos, L. (2012). Model-based analysis of decarbonising the EU economy in the time horizon to 2050. *Energy strategy*

reviews, 1(2), 76-84.

Ciscar, J. C., Soria, A., Goodess, C. M., Christensen, O. B., Iglesias, A., Garrote, L., Moneo, M., Quiroga, S., Feyen, L., Dankers, R., & Nicholls, R. (2009). Climate change impacts in Europe. Final report of the PESETA research project (No. JRC55391). Directorate Growth & Innovation and JRC-Seville, Joint Research Centre.

Cooper, A., Livermore, S., Rossi, V., Wilson, A., & Walker, J. (1999). The economic implications of reducing carbon emissions: A cross-country quantitative investigation using the Oxford Global Macroeconomic and Energy Model. *The Energy Journal*, 335-365.

Crassous, R., Hourcade, J. C., & Sassi, O. (2006). Endogenous structural change and climate targets modeling experiments with Imacsim-R. *The Energy Journal*, 259-276.

Criqui, P., Cattier, F., Kouvaritakis, N., & Thonet, C. (1998). Technological scenarios, climate change and emission trading: EC-IEA study on energy technology and climate change simulations using the POLES world model. IPTS, Sevilla.

Criqui, P., Mima, S., & Viguiet, L. (1999). Marginal abatement costs of CO₂ emission reductions, geographical flexibility and concrete ceilings: an assessment using the POLES model. *Energy policy*, 27(10), 585-601.

Dagoumas, A. S., & Barker, T. S. (2010). Pathways to a low-carbon economy for the UK with the macro-econometric E3MG model. *Energy policy*, 38(6), 3067-3077.

Dai, H., Masui, T., Matsuoka, Y., & Fujimori, S. (2011). Assessment of China's climate commitment and non-fossil energy plan towards 2020 using hybrid AIM/CGE model. *Energy Policy*, 39(5), 2875-2887.

DeCanio, S. (2003). *Economic models of climate change: a critique*. Springer.

Den Elzen, M. G. J. (2005). Analysis of future commitments and costs of countries for the "South-North Dialogue" Proposal using the FAIR 2.1 world model. No. MNP-report, 728001032.

Doukas, H., Nikas, A., Gonzalez-Eguino, M., Arto, I., & Anger-Kraavi, A. (2018). From integrated to integrative: Delivering on the Paris Agreement. *Sustainability* 10(7), 2299, doi:10.3390/su10072299.

Dowlatabadi, H. (1995). Integrated assessment models of climate change: An incomplete overview. *Energy Policy*, 23(4), 289-296.

Dowlatabadi, H. (1998). Sensitivity of climate change mitigation estimates to assumptions about technical change. *Energy Economics*, 20(5), 473-493.

- Dowlatabadi, H. (2000). Bumping against a gas ceiling. *Climatic Change*, 46(3), 391-407.
- Edenhofer, O., Bauer, N., & Kriegler, E. (2005). The impact of technological change on climate protection and welfare: Insights from the model MIND. *Ecological Economics*, 54(2), 277-292.
- Edenhofer, O., Lessmann, K., & Bauer, N. (2005). Mitigation strategies and costs of climate protection: The effects of ETC in the hybrid model MIND.
- Edenhofer, O., Lessmann, K., Kemfert, C., Grubb, M., & Köhler, J. (2006). Induced technological change: Exploring its implications for the economics of atmospheric stabilization: Synthesis report from the innovation modeling comparison project. *The Energy Journal*, 57-107.
- Edmonds, J., & Reiley, J. M. (1985). *Global Energy-Assessing the Future*.
- Edmonds, J., Pitcher, H., & Sands, R. (2004). Second generation model 2004: an overview. *Special Issue on Endogenous*, 30, 425-448.
- Elliott, J., Foster, I., Kortum, S., Munson, T., Cervantes, F. P., & Weisbach, D. (2010). Trade and carbon taxes. *The American Economic Review*, 100(2), 465-469.
- Fawcett, A. A. (2011). International offsets usage in proposed US climate change legislation. In *Modeling the Economics of Greenhouse Gas Mitigation: Summary of a Workshop*.
- Finon, D. (1976). *Un modele energetique pour la France (Vol. 3)*. Centre national de la recherche scientifique.
- Fishbone, L. G., & Abilock, H. (1981). Markal, a linear-programming model for energy systems analysis: Technical description of the bnl version. *International journal of Energy research*, 5(4), 353-375.
- Fujino, J., Nair, R., Kainuma, M., Masui, T., & Matsuoka, Y. (2006). Multi-gas mitigation analysis on stabilization scenarios using AIM global model. *The Energy Journal*, 343-353.
- Füssel, H. M. (2009). An updated assessment of the risks from climate change based on research published since the IPCC Fourth Assessment Report. *Climatic Change*, 97(3), 469-482.

Füssel, H. M. (2010). Modeling impacts and adaptation in global IAMs. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, 1(2), 288-303.

Gabriel, S. A., Kydes, A. S., & Whitman, P. (2001). The National Energy Modeling System: a large-scale energy-economic equilibrium model. *Operations Research*, 49(1), 14-25.

Garnaut, R. (2008). *The Garnaut climate change review: Final report*. Cambridge, Cambridge.

Gerlagh, R. (2006). ITC in a global growth-climate model with CCS: The value of induced technical change for climate stabilization. *The Energy Journal*, 223-240.

Gerlagh, R. (2007). Measuring the value of induced technological change. *Energy Policy*, 35(11), 5287-5297.

Gerlagh, R., & Van der Zwaan, B. (2006). Options and Instruments for a Deep Cut in CO₂ Emissions: Carbon Dioxide Capture or Renewables, Taxes or Subsidies?. *The Energy Journal*, 25-48.

Gillingham K, Newell RG, Pizer WA (2007) Modeling endogenous technological change for climate policy analysis. *Resources for the Future*, Washington DC

Goettle, R. J., & Fawcett, A. A. (2009). The structural effects of cap and trade climate policy. *Energy Economics*, 31, S244-S253.

Goettle, R. J., Ho, M. S., Jorgenson, D. W., Slesnick, D. T., Wilcoxon, P. J., & EP-W, E. C. (2007). IGEM, an inter-temporal general equilibrium model of the US economy with emphasis on growth, energy and the environment. Prepared for the US Environmental Protection Agency (EPA), Office of Atmospheric Programs, Climate Change Division, EPA Contract EP-W-05-035.

Golub, A., Hertel, T. W., & Sohngen, B. (2009). 10 Land use modelling in a recursively dynamic GTAP framework. *Economic analysis of land use in global climate change policy*, 14, 235.

Grassini, M. (2009). Rowing along the computable general equilibrium modelling mainstream. *Studies on Russian Economic Development*, 20(2), 134-146.

Greening, L. A., & Bataille, C. (2009). *Bottom-up models of energy: across the spectrum*. Chapters.

Grubb MJ, Hope C, Fouquet R (2002) Climatic implications of the Kyoto protocol: the contribution of international spillover. *Clim Change* 54(1–2):11–28

- Hainoun, A., Aldin, M. S., & Almoustafa, S. (2010). Formulating an optimal long-term energy supply strategy for Syria using MESSAGE model. *Energy policy*, 38(4), 1701-1714.
- Hallegatte, S., Henriet, F., & Corfee-Morlot, J. (2011). The economics of climate change impacts and policy benefits at city scale: a conceptual framework. *Climatic change*, 104(1), 51-87.
- Hammit JK. Outcome and value uncertainties in global-change policy. *Climate Change* 1995; 30 :125–45.
- Hedenus, F., Azar, C., & Lindgren, K. (2006). Induced technological change in a limited foresight optimization model. *The Energy Journal*, 109-122.
- Hitz, S., & Smith, J. (2004). Estimating global impacts from climate change. *Global Environmental Change*, 14(3), 201-218.
- Hof, A. F. (2010). International mitigation and adaptation strategies for climate change policy: An integrated assessment approach.
- Hof, A. F., de Bruin, K. C., Dellink, R. B., den Elzen, M. G., & van Vuuren, D. P. (2009). The effect of different mitigation strategies on international financing of adaptation. *Environmental Science & Policy*, 12(7), 832-843.
- Hof, A. F., De Bruin, K., Dellink, R., den Elzen, M. G. J., & van Vuuren, D. P. (2012). Costs, benefits and inter-linkages between adaptation and mitigation. *Global Climate Governance Beyond*.
- Hof, A. F., den Elzen, M. G., & van Vuuren, D. P. (2008). Analysing the costs and benefits of climate policy: value judgements and scientific uncertainties. *Global Environmental Change*, 18(3), 412-424.
- Hope, C. (2006). The marginal impact of CO₂ from PAGE2002: An integrated assessment model incorporating the IPCC's five reasons for concern. *Integrated assessment*, 6(1), 19-56.
- Hope, C. (2009). How deep should the deep cuts be? Optimal CO₂ emissions over time under uncertainty. *Climate Policy*, 9(1), 3-8.
- Hope, C. (2011). The social cost of CO₂ from the PAGE09 model.
- Hope, C. (2013). Critical issues for the calculation of the social cost of CO₂: why the estimates from PAGE09 are higher than those from PAGE2002. *Climatic Change*, 117(3), 531-543.

- Hope, C. W. (2008). Optimal carbon emissions and the social cost of carbon over time under uncertainty. *Integrated Assessment Journal*, 8(1), 107-122.
- Hope, C., Anderson, J., & Wenman, P. (1993). Policy analysis of the greenhouse effect: an application of the PAGE model. *Energy Policy*, 21(3), 327-338.
- Hourcade, J. C., Richels, R., Robinson, J., Chandler, W., Davidson, O., Finon, D., Grubb, M.J., Halsneas, K., Hogan, K., Jaccard, M., & Krause, F. (1996). Estimating the costs of mitigating greenhouse gases. *Climate Change 1995, Economic and Social Dimensions of Climate Change, Contribution of Working Group II*, 263-296.
- Ianchovichina, E., Darwin, R., & Shoemaker, R. (2001). Resource use and technological progress in agriculture: a dynamic general equilibrium analysis. *Ecological Economics*, 38(2), 275-291.
- International Energy Agency. (2010). *World Energy Outlook 2010*. OECD/International Energy Agency, Paris, France
- Jaffe, A. B, Newell, R. G., & Stavins, R. N. (2004). A tale of two market failures: Technology and environmental policy. (Discussion Paper No. DP 04-38). Washington, DC: Resources for the Future
- Jakeman, G., & Fisher, B. S. (2006). Benefits of multi-gas mitigation: An application of the Global Trade and Environment Model (GTEM). *The Energy Journal*, 323-342.
- Jebaraj, S., & Iniyar, S. (2006). A review of energy models. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 10(4), 281-311.
- Jorgenson, D. W., Goettle, R. J., Hurd, B. H., Smith, J. B., Chestnut, L. G., & Mills, D. M. (2004). US market consequences of global climate change. Pew Center on Global Climate Change, Washington, DC.
- Junankar, S., Lofsnaes, O., & Summerton, P. (2007). MDM-E3. A short technical description. Cambridge Econometrics, Cambridge, UK.
- Kainuma, M., Matsuoka, Y., & Morita, T. (1999). Analysis of post-Kyoto scenarios: The Asian-Pacific integrated model. *The Energy Journal*, 207-220.
- Kainuma, M., Matsuoka, Y., & Morita, T. (2000). The AIM/end-use model and its application to forecast Japanese carbon dioxide emissions. *European Journal of Operational Research*, 122(2), 416-425.
- Kainuma, M., Matsuoka, Y., & Morita, T. (Eds.). (2011). *Climate policy assessment: Asia-Pacific integrated modeling*. Springer Science & Business Media.

Kainuma, M., Matsuoka, Y., Hibino, G., Shimada, K., Ishii, H., Matsui, S., & Morita, T. (2003). Application of AIM/Enduse model to Japan. In *Climate Policy Assessment* (pp. 155-176). Springer Japan.

Kemfert, C. (2001). Economy-energy-climate interaction: the model wiagem.

Kemfert, C. (2005). Induced technological change in a multi-regional, multi-sectoral, integrated assessment model (WIAGEM): Impact assessment of climate policy strategies. *Ecological economics*, 54(2), 293-305.

Kemfert, C., & Truong, T. (2007). Impact assessment of emissions stabilization scenarios with and without induced technological change. *Energy Policy*, 35(11), 5337-5345.

Kemfert, C., Truong, T. P., & Bruckner, T. (2006). Economic Impact Assessment of Climate Change—A Multi-gas Investigation with WIAGEM-GTAPEL-ICM. *The Energy Journal*, 441-460.

Keppo, I., & van der Zwaan, B. (2012). The impact of uncertainty in climate targets and CO₂ storage availability on long-term emissions abatement. *Environmental Modeling & Assessment*, 17(1-2), 177-191.

Kesicki, F., & Yanagisawa, A. (2015). Modelling the potential for industrial energy efficiency in IEA's World Energy Outlook. *Energy Efficiency*, 8(1), 155-169.

Kitous, A., Criqui, P., Bellevrat, E., & Chateau, B. (2010). Transformation patterns of the worldwide energy system-scenarios for the century with the POLES model. *The Energy Journal*, 49-82.

Koji, T., Takanobu, K., Atsushi, K., Norihiro, I., & Masaji, S. (2009). Measuring Weak Sustainability for the future: Calculating Genuine Saving with population change by an integrated assessment model.

Kolstad, C. D., & Toman, M. (2005). The economics of climate policy. *Handbook of environmental economics*, 3, 1561-1618.

Kopp, R. E., & Mignone, B. K. (2012). The US Government's social cost of carbon estimates after their first two years: pathways for improvement.

Kouvaritakis, N., Soria, A., & Isoard, S. (2000). Modelling energy technology dynamics: methodology for adaptive expectations models with learning by doing and learning by searching. *International Journal of Global Energy Issues*, 14(1-4), 104-115.

Kouvaritakis, N., Soria, A., Isoard, S., & Thonet, C. (2000). Endogenous learning in world post-Kyoto scenarios: application of the POLES model under adaptive expectations. *International Journal of Global Energy Issues*, 14(1-4), 222-248.

Kratena, K., & Streicher, G. (2009). Macroeconomic input-output modelling: structures, functional forms and closure rules. *International Input-Output Association Working Paper WPIOX*, 09-009.

Kremers, H., Nijkamp, P., & Wang, S. (2000). Mailing Issues on Climate Change Policies-A Discussion of the GTAP-E Model (No. 00-099/3). *Tinbergen Institute Discussion Paper*.

Kriegler, E., O'Neill, B. C., Hallegatte, S., Kram, T., Lempert, R. J., Moss, R. H., & Wilbanks, T. (2012). The need for and use of socio-economic scenarios for climate change analysis: a new approach based on shared socio-economic pathways. *Global Environmental Change*, 22(4), 807-822.

Kurosawa, A. (2004). Carbon concentration target and technological choice. *Energy Economics*, 26(4), 675-684.

Kurosawa, A. (2006). Multigas mitigation: an economic analysis using GRAPE model. *The Energy Journal*, 275-288.

Kurosawa, A., Yagita, H., Zhou, W., Tokimatsu, K., & Yanagisawa, Y. (1999). Analysis of carbon emission stabilization targets and adaptation by integrated assessment model. *The Energy Journal*, 157-175.

Kypreos, S. (2007). A MERGE model with endogenous technological change and the cost of carbon stabilization. *Energy Policy*, 35(11), 5327-5336.

Kypreos, S. (2008). Stabilizing global temperature change below thresholds: Monte Carlo analyses with MERGE. *Computational Management Science*, 5(1), 141-170.

Kypreos, S., Barreto, L., Capros, P., & Messner, S. (2000). ERIS: A model prototype with endogenous technological change. *International Journal of Global Energy Issues*, 14(1-4), 347-397.

Laborde, D., Martin, W., & Van der Mensbrugge, D. (2016). Measuring the impacts of global trade reform with optimal aggregators of distortions. *Review of International Economics*.

Lanz, B., & Rausch, S. (2011). General equilibrium, electricity generation technologies and the cost of carbon abatement: A structural sensitivity analysis. *Energy Economics*, 33(5), 1035-1047.

- Lapillonne, B. (1978). MEDEE 2: A model for long-term energy demand evaluation.
- Lapillonne, B. (1980). Long term perspectives of the US energy demand: application of the MEDEE 2 model to the US. *Energy*, 5(3), 231-257.
- Lecocq, F., & Shalizi, Z. (2007). How might climate change affect economic growth in developing countries? A review of the growth literature with a climate lens.
- Lejour, A., Veenendaal, P., Verweij, G., & van Leeuwen, N. (2006). WorldScan; a model for international economic policy analysis (No. 111). CPB Netherlands Bureau for Economic Policy Analysis.
- Link, P. M., & Tol, R. S. (2004). Possible economic impacts of a shutdown of the thermohaline circulation: an application of FUND. *Portuguese economic journal*, 3(2), 99-114.
- A. Löschel, Technological change in economic models of environmental policy: a survey, *Ecol. Econ.* 43 (2002) 105–1
- Manne, A. S., & Richels, R. G. (2005). MERGE: an integrated assessment model for global climate change. In *Energy and environment* (pp. 175-189). Springer US.
- Manne, A., Mendelsohn, R., & Richels, R. (1995). MERGE: A model for evaluating regional and global effects of GHG reduction policies. *Energy policy*, 23(1), 17-34.
- Masui, T. (2005). "Policy Evaluations under Environmental Constraints Using a Computable General Equilibrium Model." *European Journal of Operational Research* 166 (3): 843-855.
- Masui, T., Hanaoka, T., Hikita, S., & Kainuma, M. (2006). Assessment of CO₂ Reductions and Economic Impacts Considering Energy-Saving Investments. *The Energy Journal*, 175-190.
- Masui, T., Matsuoka, Y., & Kainuma, M. (2006). Long-term CO₂ emission reduction scenarios in Japan. *Environmental Economics and Policy Studies*, 7(3), 347-366.
- Masui, T., Rana, A., & Matsuoka, Y. (2003). AIM/material model. In *Climate Policy Assessment* (pp. 177-196). Springer Japan.
- Matsuoka, Y., Kainuma, M., & Morita, T. (1995). Scenario analysis of global warming using the Asian Pacific Integrated Model (AIM). *Energy Policy*, 23(4-5), 357-371.
- Mattsson, N. (2002). Introducing uncertain learning in an energy system model: a pilot study using GENIE. *International Journal of Global Energy Issues*, 18(2-4), 253-265.

- Mattsson, N., & Wene, C. O. (1997). Assessing new energy technologies using an energy system model with endogenized experience curves. *International journal of energy research*, 21(4), 385-393.
- McKibbin, W. J., & Wilcoxon, P. J. (1999). The theoretical and empirical structure of the G-Cubed model. *Economic modelling*, 16(1), 123-148.
- McKibbin, W. J., & Wilcoxon, P. J. (2009). Uncertainty and climate change policy design. *Journal of Policy Modeling*, 31(3), 463-477.
- McKibbin, W. J., Lee, J. W., & Cheong, I. (2004). A dynamic analysis of the Korea–Japan free trade area: simulations with the G-cubed Asia–Pacific model. *International Economic Journal*, 18(1), 3-32.
- Mendelsohn, R., & Williams, L. (2004). Comparing forecasts of the global impacts of climate change. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 9(4), 315-333.
- Mendelsohn, R., Morrison, W., Schlesinger, M. E., & Andronova, N. G. (2000). Country-specific market impacts of climate change. *Climatic change*, 45(3-4), 553-569.
- Mendelsohn, R., Nordhaus, W., & Shaw, D. (1999). *The impact of climate variation on US agriculture* (pp. 55-74). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY.
- Mercure, J. F., Pollitt, H., Edwards, N. R., Holden, P. B., Chewpreecha, U., Salas, P., Lam, A., Knobloch, F., & Vinuales, J. (2017). Environmental impact assessment for climate change policy with the simulation-based integrated assessment model E3ME-FTT-GENIE. arXiv preprint arXiv:1707.04870.
- Messner, S. (1997). Endogenized technological learning in an energy systems model. *Journal of Evolutionary Economics*, 7(3), 291-313.
- Mima, S., & Criqui, P. (2009). Assessment of the impacts under future climate change on the energy systems with the POLES model. In *International energy workshop*.
- Moss, R. H., Edmonds, J. A., Hibbard, K. A., Manning, M. R., Rose, S. K., Van Vuuren, D. P., ... & Meehl, G. A. (2010). The next generation of scenarios for climate change research and assessment. *Nature*, 463(7282), 747.
- Moss, R.H., Schneider, S.H., 2000. Uncertainties. In: Pachauri, R.K., Taniguchi, T., Tanaka, K. (Eds), *Guidance Papers on the Cross Cutting Issues of the Third Assessment Report of the IPCC*. IPCC, Geneva, pp. 33–51.

Nakicenovic, N., Alcamo, J., Grubler, A., Riahi, K., Roehrl, R. A., Rogner, H. H., & Victor, N. (2000). *Special report on emissions scenarios (SRES), a special report of Working Group III of the intergovernmental panel on climate change*. Cambridge University Press.

Mundaca, L., Neij, L., Worrell, E., & McNeil, M. (2010). Evaluating energy efficiency policies with energy-economy models. *Annual review of environment and resources*, 35, 305-344.

New, M., and M. Hulme, 2000: Representing uncertainty in climate change scenarios: A Monte-Carlo approach. *Integr. Assess.*, 1, 203–214.

Nicoletti, G., & Oliveira-Martins, J. (1993). Global effects of the European carbon tax. In *The European Carbon Tax: An Economic Assessment* (pp. 15-48). Springer Netherlands.

Nijkamp, P., Wang, S., & Kremers, H. (2005). Modeling the impacts of international climate change policies in a CGE context: The use of the GTAP-E model. *Economic Modelling*, 22(6), 955-974.

Nikas, A., Doukas, H., Lieu, J., Alvarez Tinoco, R., Charisopoulos, V., & van der Gaast, W. (2017). Managing stakeholder knowledge for the evaluation of innovation systems in the face of climate change. *Journal of Knowledge Management*, 21(5), 1013-1034.

Nikas, A., Doukas, H., & Papandreou, A. (2018, in press). A Detailed Overview and Consistent Classification of Climate-Economy Models. In *Understanding Risks and Uncertainties in Energy and Climate Policy: Multidisciplinary Methods and Tools towards a Low Carbon Society*. Springer: Berlin, Germany.

Nilsson, C. (1999). A Unilateral Versus a Multilateral Carbon Dioxide Tax-A Numerical Analysis with the European Model GEM-E3 (No. 66).

Nordhaus, W. (2007). Accompanying Notes and Documentation on Development of DICE-2007 Model: Notes on DICE-2007. delta. v8 as of September 21, 2007. Miscellaneous publication, Yale University, New Haven, NE, USA.

Nordhaus, W. D. (1994). *Managing the global commons: the economics of climate change* (Vol. 31). Cambridge, MA: MIT press.

Nordhaus, W. D. (2002). Modeling induced innovation in climate-change policy. *Technological change and the environment*, 9, 259-290.

Nordhaus, W. D. (2008). *A question of balance: Weighing the options on global warming policies*. Yale University Press.

Nordhaus, W. D. (2010). Economic aspects of global warming in a post-Copenhagen environment. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 107(26), 11721-11726.

Nordhaus, W. D. (2014). *A question of balance: Weighing the options on global warming policies*. Yale University Press.

Nordhaus, W. D., & Boyer, J. (2000). *Warming the world: economic models of global warming*. MIT press.

Nordhaus, W. D., & Yang, Z. (1996). A regional dynamic general-equilibrium model of alternative climate-change strategies. *The American Economic Review*, 741-765.

Oda, J., Akimoto, K., Sano, F., & Homma, T. (2009). Diffusion of CCS and energy efficient technologies in power and iron & steel sectors. *Energy Procedia*, 1(1), 155-161.

Oravetz, M., Dowlatabadi, H., 1995. Is there autonomous energy efficiency improvement? Working Paper 1995.12. Carnegie Mellon University, Pittsburgh, PA

Ortiz, R. A., & Markandya, A. (2009). *Integrated impact assessment models of climate change with an emphasis on damage functions: a Literature Review*. Bilbao: Spain.

Paltsev, S., Reilly, J. M., Jacoby, H. D., Eckaus, R. S., McFarland, J. R., Sarofim, M. C., Asadoorian, M. O., & Babiker, M. H. (2005). *The MIT emissions prediction and policy analysis (EPPA) model: version 4*. MIT Joint Program on the Science and Policy of Global Change.

Pant, H. M. (2007). *GTEM draft: global trade and environmental model*. Australian Bureau of Agricultural and Resource Economics.

Pant, H., Tulpulé, V., & Fisher, B. S. (2007). *Global Trade and Environment Model*. Department of Agriculture: Australian Bureau of Agricultural and Resource Economics and Sciences. Canberra, Australia.

Parrado, R., & De Cian, E. (2014). Technology spillovers embodied in international trade: Intertemporal, regional and sectoral effects in a global CGE framework. *Energy Economics*, 41, 76-89.

Parson, E. A., & Fisher-Vanden, A. K. (1997). Integrated assessment models of global climate change. *Annual Review of Energy and the Environment*, 22(1), 589-628.

Peck, S. C., & Teisberg, T. J. (1993). Global warming uncertainties and the value of information: An analysis using CETA. *Resource and Energy Economics*, 15(1), 71-97.

Peck, S. C., & Teisberg, T. J. (1995). International CO₂ emissions control: an analysis using CETA. *Energy Policy*, 23(4-5), 297-308.

Peck, S. C., & Teisberg, T. J. (1999). CO₂ Emissions Control Agreements: Incentives for Regional Participation. *The Energy Journal*, 367-390.

Pfenninger, S. (2015). Calliope: a multi-scale energy systems (MUSES) modeling framework. Release v0, 3.

Plambeck, E. L., Hope, C., & Anderson, J. (1997). The Page95 model: Integrating the science and economics of global warming. *Energy Economics*, 19(1), 77-101.

Plinke, E., Haasis, H. D., Rentz, O., & Sivrioglu, M. (1990). Analysis of energy and environmental problems in Turkey by using a decision support model. *Ambio*, 75-81.

Popp, D. (2004). ENTICE: endogenous technological change in the DICE model of global warming. *Journal of Environmental Economics and management*, 48(1), 742-768.

Popp, D. (2006). Comparison of climate policies in the ENTICE-BR model. *The Energy Journal*, 163-174.

Popp, D. (2006). ENTICE-BR: The effects of backstop technology R&D on climate policy models. *Energy Economics*, 28(2), 188-222.

Pycroft, J., Vergano, L., Hope, C., Paci, D., & Ciscar, J. C. (2011). A tale of tails: Uncertainty and the social cost of carbon dioxide.

Rafaj, P., & Kypreos, S. (2007). Internalisation of external cost in the power generation sector: Analysis with Global Multi-regional MARKAL model. *Energy Policy*, 35(2), 828-843.

Rana, A., & Morita, T. (2000). Scenarios for greenhouse gas emission mitigation: a review of modeling of strategies and policies in integrated assessment models. *Environmental Economics and Policy Studies*, 3(2), 267-289.

Redondo, P. D., & van Vliet, O. (2015). Modelling the energy future of switzerland after the phase out of nuclear power plants. *Energy Procedia*, 76, 49-58.

Reilly, J., Sarofim, M., Paltsev, S., & Prinn, R. (2006). The Role of Non-CO₃ GHGs in Climate Policy: Analysis Using the MIT IGSM. *The Energy Journal*, 503-520.

- Robinson, S. (2006). Macro models and multipliers: Leontief, Stone, Keynes, and CGE models. *Poverty, Inequality and Development*, 205-232.
- Rosendahl, K. E. (2004). Cost-effective environmental policy: implications of induced technological change. *Journal of Environmental Economics and Management*, 48(3), 1099-1121.
- Rout, U. K., Akimoto, K., Sano, F., Oda, J., Homma, T., & Tomoda, T. (2008). Impact assessment of the increase in fossil fuel prices on the global energy system, with and without CO₂ concentration stabilization. *Energy Policy*, 36(9), 3477-3484.
- Sano, F., Akimoto, K., Homma, T., & Tomoda, T. (2005). Analysis of technological portfolios for CO₂ stabilizations and effects of technological changes.
- Ščasný, M., Píša, V., Pollitt, H., & Chewpreecha, U. (2009). Analyzing Macroeconomic Effects of Environmental Taxation in the Czech Republic with the Econometric E3ME Model. *Finance a Uver: Czech Journal of Economics & Finance*, 59(5).
- Schultz, P. A., & Kasting, J. F. (1997). Optimal reductions in CO₂ emissions. *Energy Policy*, 25(5), 491-500."
- Schumacher, K., & Sands, R. D. (2006). Innovative energy technologies and climate policy in Germany. *Energy Policy*, 34(18), 3929-3941.
- Schwanitz, V. J. (2013). Evaluating integrated assessment models of global climate change. *Environmental modelling & software*, 50, 120-131.
- 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*, 27(14), 855-879.
- Seebregts, A. J., Goldstein, G. A., & Smekens, K. (2002). Energy/environmental modeling with the MARKAL family of models. In *Operations research proceedings 2001* (pp. 75-82). Springer, Berlin, Heidelberg.
- Seebregts, A., Kram, T., Schaeffer, G. J., & Bos, A. (2000). Endogenous learning and technology clustering: analysis with MARKAL model of the Western European energy system. *International Journal of Global Energy Issues*, 14(1-4), 289-319.
- Söderholm, P. (2007). Modelling the economic costs of climate policy. Luleå University of Technology.

Sokolov, A. P., Schlosser, C. A., Dutkiewicz, S., Paltsev, S., Kicklighter, D. W., Jacoby, H. D., Prinn, R. G., Forest, C. E., Reilly, J. M., Wang, C., & Felzer, B. S. (2005). MIT integrated global system model (IGSM) version 2: model description and baseline evaluation. MIT Joint Program on the Science and Policy of Global Change.

Sorrell, S. (2009). Jevons' Paradox revisited: The evidence for backfire from improved energy efficiency. *Energy policy*, 37(4), 1456-1469.

Stanton, E. A., Ackerman, F., & Kartha, S. (2009). Inside the integrated assessment models: Four issues in climate economics. *Climate and Development*, 1(2), 166-184.

Stehfest, E., Bouwman, L., Van Vuuren, D. P., Den Elzen, M. G., Eickhout, B., & Kabat, P. (2009). Climate benefits of changing diet. *Climatic change*, 95(1-2), 83-102.

Sullivan, P., Krey, V., & Riahi, K. (2013). Impacts of considering electric sector variability and reliability in the MESSAGE model. *Energy Strategy Reviews*, 1(3), 157-163.

Tol, R. S. (1997). On the optimal control of carbon dioxide emissions: an application of FUND. *Environmental Modeling and Assessment*, 2(3), 151-163.

Tol, R. S. (2006). Multi-gas emission reduction for climate change policy: an application of FUND. *The Energy Journal*, 235-250.

Tol, R. S. (2010). Carbon Dioxide Mitigation. In Lomborg, B. (Ed.), *Smart Solutions to Climate Change: Comparing Costs and Benefits* (pp. 74-105). Cambridge University Press.

Tol, R. S., & Fankhauser, S. (1998). On the representation of impact in integrated assessment models of climate change. *Environmental Modeling and Assessment*, 3(1), 63-74.

Toth, F. L. (2005). Coupling climate and economic dynamics: recent achievements and unresolved problems. In *The Coupling of Climate and Economic Dynamics* (pp. 35-68). Springer Netherlands.

Tulpulé, V., Brown, S., Lim, J., Polidano, C., Pant, H., & Fisher, B. S. (1998). An economic assessment of the Kyoto Protocol using the Global Trade and Environment Model. In *Proceedings of the Workshop on Economic Modelling and Climate Change* (pp. 17-18).

Turton, H., & Barreto, L. (2004). Cars, Hydrogen and Climate Change: A long-term analysis with the ERIS model. In 6th IAEE European Conference.

- Turton, H., & Barreto, L. (2004). The extended energy-systems ERIS model: An overview.
- Tyers, R., & Shi, Q. (2012). Global demographic change, labour force growth and economic performance. Chapter, 13, 342-375.
- Urban, F. R. M. J., Benders, R. M. J., & Moll, H. C. (2007). Modelling energy systems for developing countries. *Energy Policy*, 35(6), 3473-3482.
- Van der Mensbrugghe, D. (2005). Linkage technical reference document. Development Prospects Group, The World Bank.
- Van der Voort, E. (1982). The EFOM 12C energy supply model within the EC modelling system. *Omega*, 10(5), 507-523.
- Van der Zwaan, B., Keppo, I., & Johnsson, F. (2013). How to decarbonize the transport sector?. *Energy policy*, 61, 562-573.
- Van Regemorter, D. (2005). GEM-E3. Computable General equilibrium model for studying economy-energy-environment interactions for Europe and the world.
- Van Vuuren, D. P. (2007). Energy systems and climate policy-long-term scenarios for an uncertain future (Doctoral dissertation, Utrecht University).
- Van Vuuren, D. P., Edmonds, J., Kainuma, M., Riahi, K., Thomson, A., Hibbard, K., ... & Masui, T. (2011). The representative concentration pathways: an overview. *Climatic change*, 109(1-2), 5.
- Van Vuuren, D. P., Kriegler, E., O'Neill, B. C., Ebi, K. L., Riahi, K., Carter, T. R., ... & Winkler, H. (2014). A new scenario framework for climate change research: scenario matrix architecture. *Climatic Change*, 122(3), 373-386.
- Viguier, L. L., Babiker, M. H., & Reilly, J. M. (2003). The costs of the Kyoto Protocol in the European Union. *Energy Policy*, 31(5), 459-481.
- Von Below, D., & Persson, T. (2008). Uncertainty, climate change and the global economy (No. w14426). National Bureau of Economic Research.
- Wada, K., Sano, F., Akimoto, K., & Homma, T. (2012). Assessment of Copenhagen pledges with long-term implications. *Energy Economics*, 34, S481-S486.
- Waisman, H., Guivarch, C., Grazi, F., & Hourcade, J. C. (2012). The IMACLIM-R model: infrastructures, technical inertia and the costs of low carbon futures under imperfect foresight. *Climatic Change*, 114(1), 101-120.

Walmsley, T. L., Dimaranan, B. V., & McDougall, R. A. (2006). A baseline scenario for the dynamic GTAP model. *Dynamic Modeling and Applications for Global Economic Analysis*, 136.

Walmsley, T. L., Hertel, T. W., & Ianchovichina, E. (2006). Assessing the impact of China's WTO accession on investment. *Pacific Economic Review*, 11(3), 315-339.

Warren, R., De La Nava Santos, S., Arnell, N. W., Bane, M., Barker, T., Barton, C., Ford, R., Füssel, H. M., Hankin, R. K., Klein, R., & Linstead, C. (2008). Development and illustrative outputs of the Community Integrated Assessment System (CIAS), a multi-institutional modular integrated assessment approach for modelling climate change. *Environmental Modelling & Software*, 23(5), 592-610.

Warren, R., Yu, R. M. S., Osborn, T. J., & de la Nava Santos, S. (2012). European drought regimes under mitigated and unmitigated climate change: application of the Community Integrated Assessment System (CIAS). *Climate Research*, 51(2), 105-123.

Webster, M. D., Babiker, M., Mayer, M., Reilly, J. M., Harnisch, J., Hyman, R., Sarofim, M. C., & Wang, C. (2002). Uncertainty in emissions projections for climate models. *Atmospheric environment*, 36(22), 3659-3670.

Webster, M., Forest, C., Reilly, J., Babiker, M., Kicklighter, D., Mayer, M., Prinn, R., Sarofim, M., Sokolov, A., Stone, P., & Wang, C. (2003). Uncertainty analysis of climate change and policy response. *Climatic change*, 61(3), 295-320.

Webster, M., Sokolov, A. P., Reilly, J. M., Forest, C. E., Paltsev, S., Schlosser, A., Wang, C., Kicklighter, D., Sarofim, M., Melillo, J., & Prinn, R. G. (2012). Analysis of climate policy targets under uncertainty. *Climatic Change*, 112(3-4), 569-583.

Wei, Y. M., Mi, Z. F., & Huang, Z. (2015). Climate policy modeling: An online SCI-E and SSCI based literature review. *Omega*, 57, 70-84.

Wei, Y.M., Mi, Z. F., Zhang, H. (2013). Review on Climate Policy Modeling: An Analysis Based on Bibliometrics Method [J]. *Advances in Earth Science*, 8, 011.

Wen, Z., Meng, F., & Chen, M. (2014). Estimates of the potential for energy conservation and CO₂ emissions mitigation based on Asian-Pacific Integrated Model (AIM): the case of the iron and steel industry in China. *Journal of cleaner production*, 65, 120-130.

West, G. R. (2002). Modeling structural linkages in dynamic and spatial interindustry systems. In *Trade, networks and hierarchies* (pp. 225-250). Springer Berlin Heidelberg.

Weyant, J. P. (1999). The cost of the Kyoto Protocol: a multi-model evaluation. *The Energy Journal*.

Weyant, J. P. (2009). A perspective on integrated assessment. *Climatic change*, 95(3), 317-323.

Wing, I. S. (2011). Computable general equilibrium models for the analysis of economy-environment interactions. *Research tools in natural resource and environmental economics*, 255.

Wing, Ian Sue, 2006. "The synthesis of bottom-up and top-down approaches to climate policy modeling: Electric power technologies and the cost of limiting US CO2 emissions

Worrell, E., Ramesohl, S., & Boyd, G. (2004). Advances in energy forecasting models based on engineering economics. *Annu. Rev. Environ. Resour.*, 29, 345-381.

Xu, Y., & Masui, T. (2009). Local air pollutant emission reduction and ancillary carbon benefits of SO₂ control policies: application of AIM/CGE model to China. *European Journal of Operational Research*, 198(1), 315-325.

Yamaji, K., Fujino, J., & Osada, K. (2000). Global energy system to maintain atmospheric CO₂ concentration at 550 ppm. *Environmental Economics and Policy Studies*, 3(2), 159-171.

Yohe, G. W. (1999). The tolerable windows approach: lessons and limitations. *Climatic Change*, 41(3), 283-295.

Yohe, G., & Tol, R. S. (2002). Indicators for social and economic coping capacity—moving toward a working definition of adaptive capacity. *Global Environmental Change*, 12(1), 25-40.

Yu, X. (2008). Impacts assessment of PHEV charge profiles on generation expansion using national energy modeling system. In *Power and Energy Society General Meeting-Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century, 2008 IEEE* (pp. 1-5). IEEE.

Zaki, C. (2011). Assessing the global effect of trade facilitation: evidence from the MIRAGE model. In *Economic Research Forum Working Paper Series* (No. 659).

Zhai, F., & Zhuang, J. (2012). Agricultural impact of climate change: A general equilibrium analysis with special reference to Southeast Asia. *Climate Change in Asia and the Pacific: How Can Countries Adapt*, 17-35

