



Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών
στην «Εφαρμοσμένη Οικονομική»
Τμήμα Οικονομικών Επιστημών
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

ΑΝΑΠΑΡΑΓΩΓΗ ΤΟΥ ΥΠΟΔΕΙΓΜΑΤΟΣ DICE-2007

Επιμέλεια: ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ ΤΣΑΡΔΟΥΝΗΣ

Επιβλέπων: Αν. Καθηγητής Γεώργιος Χάλκος

Βόλος, 2010

Στον άνθρωπο που με μεγάλωσε . . .

Περιεχόμενα

Κατάλογος Πινάκων	7
Κατάλογος Σχημάτων και Διαγραμμάτων	9
Ακρωνύμια	9
Υπεύθυνη Δήλωση Πρωτοτυπίας Διπλωματικής Εργασίας	10
Ευχαριστίες	11
Περίληψη	12
Abstract	13
1 Βιβλιογραφική ανασκόπηση	14
1.1 Εισαγωγή	14
1.1.1 Παγκόσμια θέρμανση	14
1.1.2 Η οικονομική προσέγγιση	15
1.2 Υποδείγματα Ολοκληρωμένης Αποτίμησης	16
1.2.1 Ανασκόπηση βιβλιογραφίας για τα Υποδείγματα Ολοκληρωμένης Αποτίμησης	19
1.3 DICE-2007	26
1.3.1 Περιγραφή του DICE-2007	28
2 Μεθοδολογία Έρευνας	30
2.1 Περιγραφή εξισώσεων	30
2.1.1 Αντικειμενική Συνάρτηση	30
2.1.2 Οικονομικές Εξισώσεις	31

2.1.3 Γεωφυσικές Εξισώσεις	35
2.2 Αριστοποίηση	37
2.3 Εναλλακτικές Πολιτικές για την υπερθέρμανση του πλανήτη . .	38
2.3.1 Περιγραφή των εναλλακτικών πολιτικών	39
3 Εμπειρικά Αποτελέσματα	44
3.1 Συνολικά Αποτελέσματα	44
3.2 Έλεγχοι εκπομπών, το κοινωνικό κόστος του CO ₂ , και οι τιμές του άνθρακα	49
3.3 Εκπομπές, συγκεντρώσεις CO ₂ και κλιματική αλλαγή	54
3.3.1 Εκπομπές CO ₂	54
3.3.2 Συγκεντρώσεις CO ₂	54
3.3.3 Αύξηση της θερμοκρασίας	54
3.4 Άλλες οικονομικές μεταβλητές	59
4 Συμπεράσματα και Προτάσεις για Περαιτέρω Έρευνα	61
Βιβλιογραφία	67

Κατάλογος Πινάκων

3.1	Σύντομη περιγραφή των πολιτικών.	45
3.2	Αποτελέσματα DICE-2007 για τις 16 διαφορετικές πολιτικές. .	46
3.3	Επιπρόσθετα κόστη λόγω πρόσθετων κλιματικών περιορισμών πάνω από το άριστο οικονομικό επίπεδο.	49
3.4	Αυξητικά κόστη καταπολέμησης και ζημίες σε σχέση με την άνευ ελέγχων πολιτική καθώς και Λόγους Κόστους-Οφέλους για τις διάφορες πολιτικές.	50

Κατάλογος Σχημάτων

1.1 Αλληλεπιδράσεις μεταξύ οικονομικών και κλιματικών συστημάτων (Edwards et al. (2005)).	17
3.1 Η Παρούσα Αξία των εναλλακτικών πολιτικών. Η διαφορά στην παρούσα αξία μιας πολιτικής σε σχέση με την πολιτική χωρίς όρους. Η πρώτη στήλη αφορά την αντικειμενική συνάρτηση το 2005 σε δολάρια και η δεύτερη την παρούσα αξία του αθροίσματος του κόστους καταπολέμησης και ζημιών στις ίδιες μονάδες. Η βασική πολιτική προφανώς παραλείπεται επειδή έχει μηδενικές διαφορές παρούσων αξιών	48
3.2 Παγκόσμιες εκπομπές βιομηχανικού CO ₂ για τον επόμενο αιώνα για διάφορες πολιτικές. Η τιμή του 2005 είναι πραγματική τιμή.	51
3.3 Οι διαφορετικές συγκεντρώσεις CO ₂ για διαφορετικές πολιτικές για τους επόμενες δύο αιώνες. Η τιμή του 2005 είναι πραγματική τιμή.	57
3.4 Αύξηση της θερμοκρασίας	57
3.5 Κατά κεφαλήν κατανάλωση για 4 πολιτικές. Η προβολή της τάσης της κατά κεφαλήν κατανάλωσης είναι έντονα αυξητική στο DICE-2007 και για όλες τις πολιτικές σχεδόν ταυτόσημη. .	59
3.6 Παραγωγή άνθρακα στην παγκόσμια παραγωγή.	60

Ακρωνύμια

ΑτΘ Αέρια του Φαινομένου του Θερμοκηπίου

AGE Applied General Equilibrium Model, Εφαρμοσμένο Υπόδειγμα Γενικής Ισορροπίας

IAM Integrated Assessment Model, Υπόδειγμα Ολοκληρωμένης Αποτίμησης

IAMs Integrated Assessment Models, Υποδείγματα Ολοκληρωμένης Αποτίμησης

ICAM Integrated Climate Assessment Model, Ολοκληρωμένο Υπόδειγμα Αποτίμησης για το Κλίμα

CES Constant Elasticity of Substitution, Σταθερά Ελαστικότητα Ζήτησης

CGE Computable General Equilibrium Model, Υπολογίσιμο Υπόδειγμα Γενικής Ισορροπίας

GAMS General Algebraic Modeling System. Γενικό Αλγεβρικό Σύστημα Υποδειματοποίησης)

GRG Generalized Reduced Gradient algorithm, Γενικευμένος Αλγόριθμος Μειωμένου Βαθμωτού

IPCC Intergovernmental Panel on Climate Change, Διακυβερνητική Επιτροπή για τη Κλιματική Αλλαγή

LbD learning-by-doing (LbD), εκμάθηση από την πράξη

LbR learning-by-researching, εκμάθηση από την έρευνα

MAGICC Model for the Assessment of Greenhouse Gas Induced Climate Change, Υπόδειγμα για την Αποτίμηση των Αερίων του Φαινομένου του Θερμοκηπίου που προκαλούν Κλιματική Αλλαγή

ppm Parts per million, μέρη στο εκατομμύριο (μετρά συγκέντρωση)

RICE Regional Integrated Climate Economy, Περιφερειακό Ολοκληρωμένο Υπόδειγμα για το Κλίμα και την Οικονομία

UN United Nations, Ηνωμένα Έθνη

Υπεύθυνη Δήλωση Πρωτοτυπίας Διπλωματικής Εργασίας

Βεβαιώνω ότι είμαι συγγραφέας αυτής της διπλωματικής εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της, είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στη διπλωματική εργασία. Επίσης έχω αναφέρει τις όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών ή λέξεων, είτε αυτές αναφέρονται ακριβώς είτε παραφρασμένες. Επίσης βεβαιώνω ότι αυτή η πτυχιακή εργασία προετοιμάστηκε από εμένα προσωπικά ειδικά για τις απαιτήσεις του προγράμματος μεταπτυχιακών σπουδών στην Εφαρμοσμένη Οικονομική του Τμήματος Οικονομικών Επιστημών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας.

Βόλος, Δεκέμβριος 2010

Ευχαριστίες

Ευχαριστώ τον καθηγητή μου Γεώργιο Χάλκο για όλα. Επίσης όλους του καθηγητές του Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών, τη Δέσποινα Ευσταθίου και τη Μαρία Αρσενοπούλου που άμεσα ανταποκρίθηκαν κάθε φορά που χρειάστηκα τη βοήθειά τους.

Τη συμφοιτήριά μου Γεωργία Γαλάνη για την αμέριστη βοήθειά της κατά την εκπόνηση της διπλωματικής μου εργασίας. Τους φοιτητές του μεταπτυχιακού Ευάγγελο Αρβανίτη, Σταύρο Κουρτζίδη, Τρύφωνα Τζιβινίκο και Δημήτριο Μπακαλάκο για την ανεκτίμητη βοήθειά τους, ιδιαίτερα κατά τη διάρκεια των σπουδών μου.

Τον φίλο μου Χρυσόστομο Καραντωνίου που με στήριξε κατά τη διάρκεια των σπουδών μου, τον Αναστάσιο Σωτηρόπουλο που επέμεινε να ασχοληθώ με λογισμικό ελεύθερου κώδικα, τον Ευστράτιο Λιβάνη για τη βοήθεια που μου προσέφερε στην απόκτηση βιβλιογραφικών πηγών και τη Χρυσανγή Δελή για το γλωσσικό και συντακτικό έλεγχο του κειμένου. Φυσικά κάθε λάθος βαρύνει αποκλειστικά τον υποφαινόμενο.

Τέλος, τους Αντώνη Τσολομύτη και Απόστολο Συρόπουλο από το Τμήμα Μαθηματικών του Πανεπιστημίου Αιγαίου για τη γραμματοσειρά Kerkis αλλά και τη γενικότερη συνεισφορά τους, που έκανε ευκολότερη στους Έλληνες τη χρήση του L^AT_EX.

Περίληψη

Στη μελέτη αυτή γίνεται απαραγωγή του ολοκληρωμένου υπόδειγματος αποτίμησης για το κλίμα και την οικονομία (DICE-2007), που αναπτύχθηκε από τον William Nordhaus. Το DICE-2007 είναι ένα υπόδειγμα που συγκρίνει 16 διαφορετικές πολιτικές καταπολέμησης της κλιματικής αλλαγής αποτιμώντας το κόστος τους και προβλέποντας τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα, τις συγκεντρώσεις του και την αύξηση της θερμοκρασίας σε παγκόσμιο επίπεδο.

Το κυριότερο αποτέλεσμα του DICE-2007 είναι πως, λόγω της αυξανόμενης παραγωγής διοξειδίου του άνθρακα, η μέση παγκόσμια επιφανειακή θερμοκρασία το 2100 αναμένεται να αυξηθεί κατά 2,3 °C σε σχέση με το 2005, ενώ το 2200 κατά 4,6 °C.

Η αύξηση αυτή μπορεί να ανέρχεται στους 1,9 °C το 2100 και μόλις στους 2,7 °C αν υιοθετηθεί η βέλτιστη πολιτική καταπολέμησης που ισορροπεί το κόστος καταπολέμησης της κλιματικής αλλαγής σε σχέση με τις μελλοντικές ζημιές λόγω αυτής. Στο DICE-2007, η καθαρά παρούσα αξία των οφελών της βέλτιστης πολιτικής είναι 3 τρισεκατομμύρια δολάρια Η.Π.Α., αλλά ακόμη και με αυτήν την πολιτική η κλιματική ζημία θα ανέρχεται σε 17 τρισεκατομμύρια δολάρια Η.Π.Α..

Λέξεις Κλειδιά: Υποδείγματα Ολοκληρωμένης Αποτίμησης, DICE, Κλιματική Αλλαγή, Αριστοποίηση.

Κωδικοί JEL: C71, C68, Q54, Q58, Y40.

Abstract

This study reproduces the Integrated Assessment Model of Climate and the Economy (DICE-2007), that was developed by William Nordhaus. DICE-2007 model examines 16 different policies regarding the abatement of climate change, assessing their cost and forecasting the carbon dioxide emissions and concentrations along with the global temperature increase for each policy.

The main result of DICE-2007 is that, due to increasing production of carbon dioxide, the mean world temperature is expected to arise 2.3 °C from 2005 to 2100 and 4.6 °C until 2200.

According to DICE-2007 this increase can be constrained to 1.9 °C and 2.7 °C until 2100 and 2200, respectively, if the world adopts the optimal policy that balances the abatement cost for climate change and future damages due to it. In DICE-2007, the present value of the benefits of optimal policy is 3 trillion U.S. dollars, but the global climate damage in total will be equal to 17 trillion U.S. dollars.

Keywords: Integrated Assessment Models, DICE, Climate Change, Optimization.

JEL classification: C71, C68, Q54, Q58, Y40.

Βιβλιογραφική ανασκόπηση

1.1 Εισαγωγή

Η υπερθέρμανση του πλανήτη απασχολεί ολοένα και περισσότερο την περιβαλλοντική επιστήμη την τελευταία δεκαετία και δεν είναι ξεκάθαρο για το πόσο γρήγορα θα πρέπει να δράσουν τα έθνη για να επιβραδύνουν την κλιματική αλλαγή. Κάθε καλοσχεδιασμένη πολιτική θα πρέπει να ισορροπήσει το οικονομικό κόστος των δράσεων του σήμερα με τα μελλοντικά οικολογικά και οικονομικά οφέλη. Το πώς θα πρέπει να ισορροπήσουν αυτά τα δύο είναι το κεντρικό θέμα της εργασίας.

Η εργασία έχει ως οδηγό την εργασία του William Nordhaus και ιδιαίτερα το βιβλίο του “A Question of Balance: Weighing the Options on Global Warming Policies” (Nordhaus, 2008), όπου εκτίθεται το υπόδειγμα DICE-2007.

1.1.1 Παγκόσμια θέρμανση

Αέρια όπως διοξείδιο του άνθρακα, μεθάνιο, μονοξείδιο του αζώτου και οργανοαλογόνα¹ ονομάζονται Αέρια του Φαινομένου του Θερμοκηπίου (ΑτΘ) και συσσωρεύονται στην ατμόσφαιρα όπου έχουν μεγάλο χρόνο παραμονής από δεκαετίες ως και αιώνες. Υψηλές συγκεντρώσεις των ΑτΘ οδηγούν σε

¹Μόρια όπου τα αλογόνα (όπως φθόριο, χλώριο, βρώμιο, ιώδιο) είναι ενωμένα με άνθρακα σχηματίζοντας οργανικές ενώσεις (Gentner et al. (2010)).

επιφανειακή θέρμανση της γης και των ωκεανών που εμμέσως ενισχύονται επιπλέον από την ατμόσφαιρα (εσωτερική ανατροφοδότηση θερμότητας). Τελικά έχουμε κλιματικές αλλαγές, όπως ακραίες θερμοκρασίες και υετούς², χωρική και χρονική μετάθεση καταιγίδων, υπερχείλιση ποταμών, μεταβολή στη διαθεσιμότητα νερού κ. ά..

Διάφορες επιστημονικές μελέτες (όπως υψηλότερη θερμοκρασία σε υψηλότερα υψομετρικά) οδηγούνται στο συμπέρασμα πως η μέση επιφανειακή θερμοκρασία θα ανεβεί δραστικά τον επόμενο αιώνα και μετέπειτα (Committee on Abrupt Climate Change et al. (2002), IPCC (2007)³). Σύμφωνα με το IPCC (2007) η παγκόσμια θερμοκρασία θα ανεβεί από 1,8 ως 4,0 βαθμούς Κελσίου (°C), καθόλου μικρή αλλαγή δεδομένου πως τέτοια δεν έχει παρατηρηθεί τα τελευταία 10.000 χρόνια (Bryant (1997)).

Οι παγκόσμιες εκπομπές CO₂ το 2006 εκτιμώνται σε περίπου 7,5 δισεκατομμύρια τόνους άνθρακα⁴, δηλαδή, κατά τον Nordhaus (2008), για κάθε άτομο έχουμε εκπομπές που αντιστοιχούν σε χρήση αυτοκινήτου για 20.000 km ανά έτος με αυτοκίνητο κατανάλωσης περίπου 6,5 lt/100km.

1.1.2 Η οικονομική προσέγγιση

Η οικονομική ανάλυση της κλιματικής αλλαγής ζυγίζει τα κόστη της καθυστέρησης της κλιματικής αλλαγής και τις ζημίες από μια πιο γρήγορη κλιματική αλλαγή. Το να μειωθούν τα ΑτΘ απότομα σημαίνει πως θα πρέπει να παρθούν δραστικά και αρκετά ακριβά μέτρα ώστε να μειωθεί η χρήση των ορυκτών καυσίμων, να αναπτυχθεί η χρήση διαφορετικών τεχνολογιών παραγωγής ή καυσίμων και πηγών ενέργειας. Ο Nordhaus (2008) υποδει-

²Υετός γενικά ονομάζεται κάθε πτώση ή εναπόθεση στο έδαφος προϊόντων του ύδατος (σε υγρή ή στερεά μορφή) η οποία προέρχεται από συμπύκνωση των υδρατμών της ατμόσφαιρας, όπως η βροχή, το χιονόνερο, το χαλάζι και το χιόνι.

³Σημειώνεται πως τη 19η Νοεμβρίου 2009 ξέσπασε σκάνδαλο με το IPCC επειδή διέρρευσαν στο διαδίκτυο μηνύματα ηλεκτρονικού ταχυδρομείου των εργαζομένων στη μονάδα κλιματικής έρευνας του Πανεπιστημίου της Ανατολικής Αγγλίας (University of East Anglia's Climatic Research Unit) όπου αποκαλύφθηκαν παραποιήσεις στοιχείων και μειρήσεων ώστε τα πειραματικά δεδομένα να έρχονται σε συμφωνία με συμπεράσματα της θεωρίας της κλιματικής αλλαγής (wikipedia.org (2009)).

⁴Διαφορετικά, κατά τον Nordhaus (2008), πολλαπλασιάζουμε το βάρος του άνθρακα με 3,67 ώστε να βρούμε το βάρος του αερίου του διοξειδίου του άνθρακα (CO₂). Έτσι καταλήγουμε σε 27,5 δισεκατομμύρια τόνους αερίου CO₂.

κνύει πως είναι πιο αποτελεσματικό να χρησιμοποιηθεί ο μηχανισμός της αγοράς, κυρίως μέσω του υψηλότερου κόστους των ορυκτών καυσίμων, ώστε να παράσχει κίνητρα στους καταναλωτές και στις επιχειρήσεις να αλλάξουν τις ενεργειακές τους συνήθειες καθώς και τις εκπομπές τους σε άνθρακα βραχυπρόθεσμα. Επιπλέον μακροπρόθεσμα θα οδηγήσει τις επιχειρήσεις να αναπτύξουν νέες τεχνολογίες που θα διευκολύνουν τη μετάβασή τους σε ένα μέλλον με λιγότερο άνθρακα. Αυτά όσον αφορά το κόστος της καθυστέρησης της κλιματικής αλλαγής.

Όσον αφορά στην κλιματική ζημία η γνώση μας είναι ελάχιστη καθώς εδώ και χιλιάδες χρόνια οι θερμοκρασιακές αλλαγές είναι της τάξης των δεκάτων σε βαθμούς Κελσίου (Bryant (1997)). Αν και οι ανθρώπινες εγκαταστάσεις όπως εργοστάσια και σπίτια έχουν γενικά θωρακιστεί με τη χρήση των κλιματιστικών, άλλες εγκαταστάσεις, όπως βροχοεξαρτώμενες αγροκαλλιέργειες, αποστράγγιση ποταμών, εποχιακά χιονοδρομικά κέντρα, θα επηρεαστούν σημαντικά. Οι οικονομικές ζημιές από την κλιματική αλλαγή στο τέλος του 21ου αιώνα θα ανέρχεται στο 2,5% της παγκόσμιας παραγωγής, και θα επικεντρώνονται σε περιοχές χαμηλότερου εισοδήματος και τροπικού κλίματος, όπως η τροπική Αφρική και η Ινδία (Nordhaus (2008)).

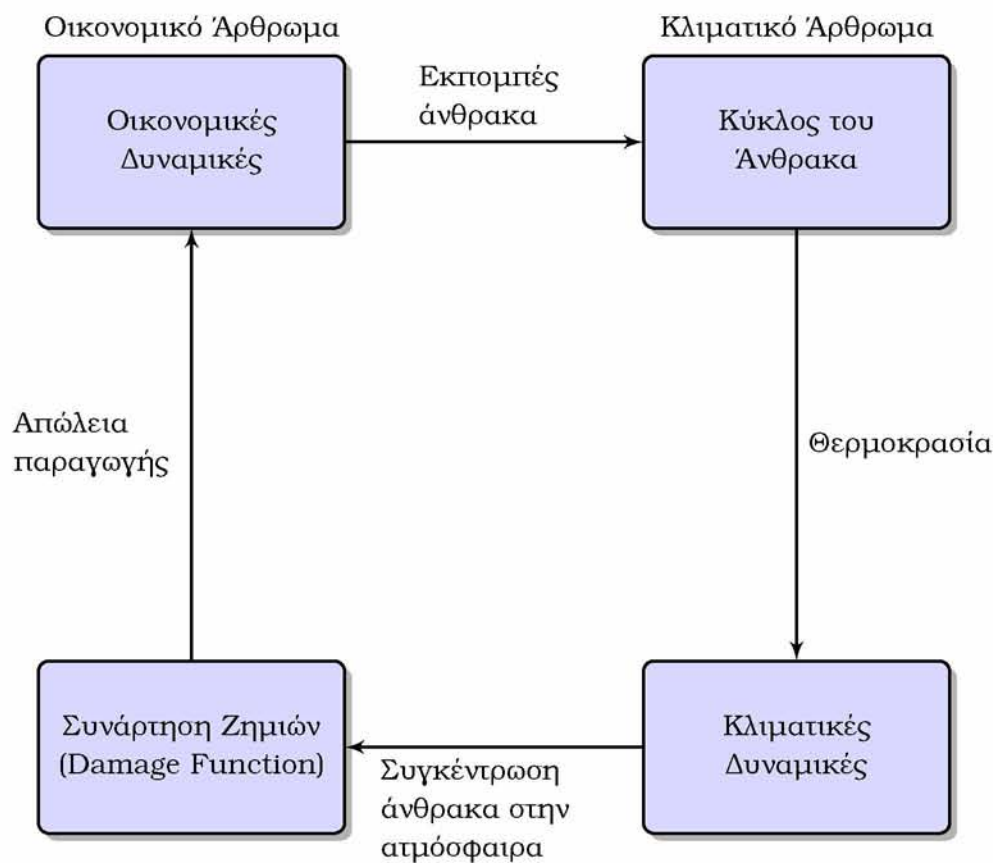
1.2 Υποδείγματα Ολοκληρωμένης Αποτίμησης

Η κλιματική μεταβολή αποτελεί ένα από τα πιο ευρέως γνωστά περιβαλλοντικά θέματα στα οικονομικά και την βιβλιογραφία γενικότερα. Ο έλεγχος της κλιματικής μεταβολής είναι μια μεγάλη πρόκληση λόγω της μεγάλης αβεβαιότητας που περιλαμβάνει.

Τα οικονομικά της κλιματικής δεν έχουν κατανοηθεί επαρκώς λόγω αβεβαιότητας σχετικά με τις επιδράσεις της κλιματικής μεταβολής στις βιομηχανίες. Επίσης τα κόστη ελέγχου της κλιματικής μεταβολής εξαρτώνται από τον βαθμό της τεχνολογικής καινοτομίας, η οποία προφανώς είναι δύσκολο να προβλεφθεί. Τέλος, η εφαρμογή του ελέγχου της κλιματικής αλλαγής στις χώρες είναι μια πρόκληση καθώς απαιτεί συνεργασία μεταξύ των χωρών (Kelly & Kolstad (1999)).

Οι ερευνητές προσπαθούν να συνδυάσουν οικονομικές και επιστημονικές

πλευρές της κλιματικής μεταβολής ώστε να εκτιμήσουν τις επιλογές πολιτικής της κλιματικής μεταβολής. Τα υποδείγματα που χρησιμοποιούνται είναι γνωστά ως υποδείγματα ολοκληρωμένης αποτίμησης (Integrated Assessment Models ή IAMs). Τα υποδείγματα αυτά στοχεύουν στην εξισορρόπηση των δυναμικών της συσσώρευσης του διοξειδίου του άνθρακα στην ατμόσφαιρα και αντίστοιχα των δυναμικών μείωσης του CO₂ στην οικονομία (Nordhaus (1994)). Ένα παράδειγμα της αλληλεπίδρασης μεταξύ των συστημάτων της οικονομίας και του κλίματος φαίνεται στο Σχήμα 1.1.



Σχήμα 1.1: Αλληλεπιδράσεις μεταξύ οικονομικών και κλιματικών συστημάτων (Edwards et al. (2005)).

Οι Ortiz & Markandya (2009) ομαδοποιούν τα υπάρχοντα μοντέλα ως εξής: διαχωρίζουν το οικονομικό άρθρωμα (economic module) σε τρία διακριτά υπομοντέλα βάσει της έμφασης που δίνουν σε διαφορετικούς τομείς

της οικονομίας. Αυτά τα υπομοντέλα είναι :

1. οι οικονομικές δυναμικές ή το άρθρωμα οικονομικής μεγέθυνσης που γενικά αναπαριστάται από ένα εφαρμοσμένο ή υπολογίσιμο μοντέλο γενικής ισορροπίας (Applied ή Computable General Equilibrium Model, AGE ή CGE) της παγκόσμιας (ή τοπικής) οικονομίας.
2. το ενεργειακό άρθρωμα που κατασκευάζεται βάσει «μηχανικής» ή “bottom-up”⁵ προσέγγισης και
3. το άρθρωμα ζημίας (damage module) στο οποίο μοντελοποιείται η αλληλεπίδραση μεταξύ των κλιματικών παραλλαγών και του αντικτύπου των στην οικονομία.

Η ύπαρξη ή μη συνδυασμού των οικονομικών υπομοντέλων μαζί με το κλιματικό άρθρωμα ορίζουν και την κατηγοροποίηση που χρησιμοποιούν οι Ortiz & Markandya (2009). Για παράδειγμα θεωρούν ως πλήρως ολοκληρωμένα IAM εκείνα τα μοντέλα που περιλαμβάνουν όλα τα προρρηθέντα άρθρωματά: το μοντέλο οικονομικής μεγέθυνσης, συμπεριλαμβανομένου του ενεργειακού τομέα, το άρθρωμα ζημιών και το κλιματικό άρθρωμα. Ακόμη ορίζουν ως μη-CGE μοντέλα εκείνα που δεν περιλαμβάνουν μια διαδικασία αριστοποίησης της οικονομίας. Γενικά, τα μη-CGE μοντέλα περιλαμβάνουν ένα άρθρωμα ζημιών και ένα κλιματικό άρθρωμα ή ακόμη και ένα ενεργειακό άρθρωμα, αλλά όλα υποθέτουν διαφορετικά σενάρια για την παγκόσμια οικονομία (όπως τα σενάρια του IPCC). Τέλος, ως τύπου CGE μοντέλα ορίζουν εκείνα που εστιάζουν στην αριστοποίηση και το λεπτομερή χαρακτηρισμό της οικονομίας, συμπεριλαμβανομένου του ενεργειακού τομέα. Αυτά τα μοντέλα

⁵Βάσει των Burniaux & Truong (2002) η μηχανική (engineering) προσέγγιση “bottom-up” συχνά ξεκινά με λεπτομερή θεώρηση των διαδικασιών ή τεχνολογιών παραγωγής ενέργειας και μετά διερωτάται: δεδομένου ενός συγκεκριμένου επιπέδου ζήτησης ενεργειακών υπηρεσιών (όπως μπορεί να προσδιοριστεί σε όρους του επιπέδου των προϊόντων συγκεκριμένων δραστηριοτήτων, όπως ταξίδια, θέρμανση, κλιματισμός, φωτισμός, κατασκευή χάλυβα κ.τ.λ.), ποιος είναι ο αποδοτικότερος τρόπος ανταπόκρισης σε αυτήν τη ζήτηση σε όρους ενεργειακών τεχνολογιών που απασχολούνται και το επίπεδο των εισροών; Η “top-down” (οικονομική) προσέγγιση από την άλλη αρχίζει με μια λεπτομερή περιγραφή της μάκρο (και διεθνούς) οικονομίας και μετά πορίζεται από εκεί τη ζήτηση σε ενεργειακές εισροές σε όρους ζήτησης για εκροές διαφόρων τομέων μέσω μιας υψηλά συναθροιστικής παραγωγής και συναρτήσεων κόστους.

έχουν χρησιμοποιηθεί εκτενώς για αναλύσεις του αντικτύπου του φόρου άνθρακα και άλλων εργαλείων πολιτικής στην οικονομία και τα αποτελέσματα που έχουν στις μειώσεις εκπομπών. Γενικά τα CGE μοντέλα χαρακτηρίζονται από την απουσία ενός κατάλληλου κλιματικού αρθρώματος.

Σύμφωνα με τον Sluijs (1996), άλλοι ορισμοί των υποδειγμάτων ολοκληρωμένης αποτίμησης εμφανίζονται στον Πίνακα 1.1

Τα υποδείγματα IAM σύμφωνα με τον Toth (2005) μπορούν να διαχωριστούν σε δύο κατηγορίες:

- (α) στα υποδείγματα αξιολόγησης της πολιτικής καινοτομίας και
- (β) στα υποδείγματα αριστοποίησης των πολιτικών.

Ακόμη, βάσει Stanton et al. (2008) τα IAMs διαχωρίζονται σε:

1. υποδείγματα αριστοποίησης ευημερίας που μεγιστοποιούν την καθαρά τρέχουσα αξία της χρησιμότητας της κατανάλωσης δεδομένων των ζημιών της κλιματικής αλλαγής και των στρατηγικών καταπολέμησης,
2. υποδείγματα γενικής ισορροπίας που αντιπροσωπεύουν την οικονομία ως ένα σύνολο συναρτήσεων ζήτησης και προσφοράς για κάθε τομέα της οικονομίας,
3. υποδείγματα εξομοίωσης (simulations models), και τέλος
4. υποδείγματα κόστους ελαχιστοποίησης (cost minimization) που ταυτοποιούν το πιο αποτελεσματικό ως προς το κόστος υποδείγματα.

1.2.1 Ανασκόπηση βιβλιογραφίας για τα Υποδείγματα Ολοκληρωμένης Αποτίμησης

Σε αυτήν την υποενότητα θα περιγράψουμε τα μοντέλα ολοκληρωμένης αποτίμησης DICE, ENTICE-BR, RICE, FEEM-RICE, WITCH, MERGE, ICAM και MIND.

Συγγραφέας	Ορισμός IAM
Swart (1994)	«Τα υποδείγματα ολοκληρωμένης εκτίμησης ορίζονται εδώ διεπιστημονικά μοντέλα που συλλαμβάνουν πλήρως την αλυσίδα αιτίας-αποτελέσματος στο πρόβλημα της κλιματικής αλλαγής σε όλους τους εμπλεκόμενους τομείς. Επομένως δεν υπονοείται καμμία ολοκλήρωση στην περιβαλλοντική θεματολογία.»
Parson (1994)	«Τα δύο καθοριστικά χαρακτηριστικά είναι ότι: (α) αναζητούν να παράσχουν χρήσιμη πληροφόρηση προκειμένου κάποιος υπεύθυνος πολιτικής να τη χρησιμοποιήσει παρά απλώς να εμβαθύνουν την κατανόησή της ως αυτοσκοπό και (β) συνδυάζουν ένα ευρύ σύνολο περιοχών, μεθόδων, τύπων έρευνας και βαθμών εμπιστοσύνης που τυπικά θα χαρακτήριζε την έρευνα του ίδιου θέματος στα όρια μιας απλής ερευνητικής αρχής.»
Rotmans & Dowlatabadi (1995)	«Η ολοκληρωμένη αποτίμηση μπορεί να οριστεί ως η διεπιστημονική διαδικασία συνδασμού, ερμηνείας και επικοινωνίας γνώσης από ποικίλους επιστημονικούς κλάδους με τέτοιο τρόπο ώστε ολοκληρή η αλυσίδα αιτίας-αποτελέσματος ενός προβλήματος να μπορεί να εκτιμηθεί από τη συνοπτική προοπτική με δύο χαρακτηριστικά: (α) θα πρέπει να έχει προστιθέμενη αξία σε σχέση με την αποτίμηση βάσει ενός μόνο επιστημονικού κλάδου (β) θα πρέπει να παράσχει χρήσιμες πληροφορίες στους διαμορφωτές πολιτικής.»
Toth (1995)	«Σε αυτό το άρθρο, και σε ολόκληρη τη συλλογή που ακολουθεί, οι όροι «ολοκληρωμένο μοντέλο» και «ολοκληρωμένη αποτίμηση» αναφέρονται σε ένα σύνολο τυπικών μοντέλων ή ερευνών χωρίς υποστήριξη υποδειγματοποίησης που συνδυάζονται σε ένα συνεκτικό πλαίσιο προκειμένου να αντιμετωπιστούν ένα ή περισσότερα ζητήματα του προβλήματος της παγκόσμιας κλιματικής αλλαγής»
Kasemir et al. (1996), Bailey et al. (1996)	«Ως ολοκληρωμένες περιβαλλοντικές αποτιμήσεις αντιλαμβανόμεστε τις διαδικασίες που καταλήγουν στην καλά πληροφορημένη κρίση για διάφορα πλάνα δράσης σε σχέση με τα περιβαλλοντικά προβλήματα. Η πληροφόρηση που χρειάζεται αναφέρεται σε φυσικά, χημικά, βιολογικά, ψυχολογικά, κοινωνικοοικονομικά και θεσμικά φαινόμενα, συμπεριλαμβανομένων των σχετικών διαδικασιών λύσης αποφάσεων.»

Πίνακας 1.1: Ορισμοί Ολοκληρωμένης Αποτίμησης και Υποδειγμάτων Ολοκληρωμένης Αποτίμησης.

DICE Στο υπόδειγμα DICE-2007, οι τιμές των μεταβλητών δίνονται γενικά ανά έτος αν και κάποιες μεταβλητές όπως και οι παράμετροι μετάβασης δίνονται ανά δεκαετία. Η αύξηση του πληθυσμού και το εργατικό δυναμικό είναι εξωγενείς στο υπόδειγμα και αντιπροσωπεύονται από λογιστικές εξισώσεις.

Επιμέλεια: Κωνσταντίνος Τσαρδούνης

Δύο βασικές μεταβλητές του υποδείγματος είναι ο ρυθμός αποταμίευσης της συσσώρευσης του φυσικού κεφαλαίου και ο έλεγχος των εκπομπών των ΑτΘ. Η συσσώρευση του κεφαλαίου αποφασίζεται ενδογενώς βελτιστοποιώντας τη ροή της κατανάλωσης ανά το χρόνο. Κάθε περιοχή έχει ένα αρχικό απόθεμα κεφαλαίου και εργασίας. Οι τεχνολογικές μεταβολές διαχωρίζονται σε δύο είδη: στην τεχνολογία εύρους οικονομίας (economy-wide) και την τεχνολογία αποταμίευσης του άνθρακα (carbon saving) η οποία υποδειγματοποιεί τη μείωση της αναλογίας των εκπομπών CO₂ ως προς την παραγωγή. Η παραγωγή δίνεται από μια συνάρτηση παραγωγής σταθερών αποδόσεων κλίμακας Cobb-Douglas του κεφαλαίου, της εργασίας και της ενέργειας.

.....

Το ENTICE-BR αναπτύχθηκε από τον Popp (2006) και είναι μια τροποποιημένη έκδοση του DICE που εισάγει ενδογενείς συνδέσμους ανάμεσα στην κλιματική πολιτική και στην ενεργειακή καινοτομία, ενώ παραμένει στο παγκόσμιο πλαίσιο του DICE. Μια σημαντική διαφορά είναι πως όπως στο περιφερειακό RICE τα ορυκτά καύσιμα περιλαμβάνονται ως εισροές στην παραγωγή. Το προϊόν παράγεται από ένα συνδυασμό εργασίας, φυσικού αποθέματος κεφαλαίου και αποτελεσματικών ενεργειακών μονάδων, που αποτελούν ένα μέτρο των παραγωγικών δυνατοτήτων των τριών πιθανών ενεργειακών εισροών:

ENTICE-BR

- των ορυκτών καυσίμων,
- της τεχνολογίας backstop⁶ και
- της ενεργειακής αποδοτικότητας.

Η τεχνολογική πρόοδος αναπαριστάται από αλλαγές στον συνολικό παράγοντα αποδοτικότητα και το κόστος των ορυκτών καυσίμων και της τεχνο-

⁶Η τεχνολογία backstop, σύμφωνα με τον Prell (1996), παρέχει πόρους με σταθερό οριακό κόστος επί απροσδιόριστο μακρύ χρονικό διάστημα. Ως έννοια εισήχθη από τον William Nordhaus και αφορά τεχνολογίες σε αγορές των οποίων οι συντελεστές είναι πεπερασμένοι σε προσφορά, χαρακτηριστικό των περισσότερων ενεργειακών εμπορευμάτων. Όπως είχε πει (Nordhaus (1973)), «Η έννοια που είναι σχετική με αυτό το πρόβλημα είναι η *τεχνολογία backstop*, ένα σύνολο διεργασιών που

1. είναι ικανό να ανταποκρίνονται στις απαιτήσεις της ζήτησης και
2. έχει κατ' ουσίαν άπειρους πόρους.»

λογίας backstop αφαιρείται από το συνολικό προϊόν. Οι ενεργειακές μονάδες εκτιμώνται από ένα πλαίσιο σταθεράς ελαστικότητας της υποκατάστασης [constant elasticity of substitution (CES)] ώστε να ενοποιούνται η χρήση ορυκτών καυσίμων, η τεχνολογία backstop και η γνώση που σχετίζεται με την ενεργειακή αποδοτικότητα.

.....

RICE Οι Nordhaus & Yang (1996) περιέγραψαν το RICE (Regional Integrated model of Climate and the Economy) που ενοματώνει περιφέρειες (regions), ένα περιφερειακό και δυναμικό μοντέλο της οικονομίας γενικής-ισορροπίας που ενοποιεί την οικονομική δραστηριότητα με τις εκπομπές και τις συνέπειες των ΑτΘ και την κλιματική αλλαγή. Στο RICE ο κόσμος διαιρείται σε δέκα περιοχές⁷ η καθεμία με ένα αρχικό απόθεμα κεφαλαίου, πληθυσμού και τεχνολογίας. Οι κύριες διαφορές μεταξύ του RICE και του DICE όσον αφορά στην υποδειγματοποίηση αφορούν:

1. στη συνάρτηση προτίμησης για κάθε περιοχή που είναι μια συνάρτηση χρησιμότητας και δίνεται από το άθροισμα των προεξοφλημένων χρησιμοτήτων της κατά κεφαλήν κατανάλωσης επί τον πληθυσμό. Η παγκόσμια κοινωνική ευημερία καθορίζεται έπειτα από τα επίπεδα κατανάλωσης των χωρών,
2. την ταυτότητα περιφερειακού προϊόντος που στο RICE λαμβάνει υπόψη το εμπόριο μεταξύ των χωρών,
3. στο ότι το RICE υποθέτει πως μακροχρόνια το κεφάλαιο μπορεί να μετακινηθεί πλήρως ανάμεσα στις περιοχές και
4. ότι κάθε περιοχή έχει τη δική της συνάρτηση για τις εκπομπές, μια συνάρτηση παγκόσμιων εκπομπών, μια συνάρτηση παγκόσμιας κλιματικής αλλαγής και τις σχέσεις για τις περιφερειακές σχέσεις της κλιματικής αλλαγής.

⁷Τις Η.Π.Α., Ιαπωνία, Κίνα, Ευρωπαϊκή Ένωση, πρώην Σοβιετική Ένωση, Ινδία, Βραζιλία και Ινδονησία, δηλαδή συνολικά 8 μεγάλες, 38 μεσαίες και 137 μικρές χώρες. Σε μερικές αναλύσεις οι συγγραφείς ενοποιούν τις περιοχές 6 με 10 (την Ινδία έως τις μικρές χώρες) σε μία περιφέρεια (τον υπόλοιπο κόσμο, rest of the world, ROW), προκειμένου να μειώσουν την υπολογιστική πολυπλοκότητα της λύσης.

Όσον αφορά στην εκτίμηση των στρατηγικών για την καταπολέμηση της κλιματικής αλλαγής, το βασικό σενάριο (baseline scenario) ταυτίζεται με τη λύση της αγοράς για την παγκόσμια οικονομία. Οι διαφορετικές στρατηγικές είναι

1. η λύση της αγοράς (χωρίς καμμία ενέργεια από τις κυβερνήσεις),
2. η συνεργατική λύση (μια αποδοτική λύση δεδομένου της υπάρχουσας διανομής του εισοδήματος) και
3. η μη-συνεργατική λύση (η λύση όπου τα έθνη επιλέγουν πολιτικές για να μεγιστοποιήσουν μόνο τις εθνικές τους προτιμήσεις).

.....

Σύμφωνα με τους Bosetti et al. (2006) και Buchner et al. (2005), το υπόδειγμα FEEM-RICE είναι επέκταση του μοντέλου RICE που ενσωματώνει ενδογενή τεχνολογική αλλαγή [μαζί με την επιφερόμενη (induced) τεχνολογική αλλαγή] ώστε να ανταποκρίνεται στην πολιτική κλιματικής αλλαγής όπως και σε άλλα κίνητρα πολιτικής και οικονομικής. Το μοντέλο λαμβάνει υπόψη ως εισροές της ενδογενούς και της επιφερόμενης τεχνολογικής αλλαγής την εκμάθηση από την πράξη (learning-by-doing (LbD)) και την εκμάθηση από την έρευνα (learning-by-researching (LbR)) καθώς και το αποτέλεσμα της τεχνολογικής αλλαγής στην ένταση ενέργειας τη παραγωγής και στην ένταση άνθρακα της χρησιμοποιούμενης ενέργειας. Η θεμελιώδης δύναμη της τεχνολογικής προόδου στο FEEM-RICE είναι η επένδυση σε Έρευνα και Ανάπτυξη, που επιφέρει συσσώρευση γνώσης και εμπειρία στην καταπολέμηση των εκπομπών και αυτές οι μεταβλητές, σύμφωνα με τους Bosetti et al. (2006), προωθούν την τεχνολογία προς ένα πιο φιλικό προς το περιβάλλον δυναμικό μονοπάτι.

FEEM-RICE

Το βέλτιστο μονοπάτι των μεταβλητών ελέγχου καθορίζεται στο πλαίσιο της θεωρίας παιγνίων όπου κάθε χώρα (περιοχή) παίζει ένα συναργατικό παίγνιο Nash σε δυναμικό περιβάλλον που αποφέρει ισορροπία Nash ανοιχτού βρόγχου (Open-Loop Nash equilibrium).

.....

Το υβριδικό μοντέλο παγκοσμίως επιφερόμενης τεχνικής αλλαγής (World Induced Technical Change Hybrid (WITCH)) είναι ένα top-down, νεοκλασσι-

WITCH

κό μοντέλο βέλτιστης ανάπτυξης με εξειδίκευση στις ενεργειακές εισροές που λειτουργεί ως bottom-up υπόδειγμα. Βασίζεται στο μοντέλο FEEM-RICE και έχει σχεδιαστεί ώστε να αναλύει τις βέλτιστες πολιτικές καταπολέμησης επίσης στο πλαίσιο της θεωρίας παιγνίων, όπως το FEEM-RICE, λαμβάνοντας υπόψη τις ενδογενείς τεχνολογικές αλλαγές στην ενεργειακή παραγωγή και χρήση (Bosetti et al. (2007)).

Στο WITCH ορίζονται δώδεκα μεγάλες περιοχές για τον κόσμο, όπου σε κάθε μία αριστοποιείται μια συνάρτηση ευημερίας. Οι μεταβλητές ελέγχου του μοντέλου —επένδυση σε διαφορετικά αποθέματα κεφαλαίου, έρευνα και ανάπτυξη και ενεργειακές τεχνολογίες, και η κατανάλωση των ορυκτών καυσίμων— αριστοποιούνται για κάθε χρονική περίοδο πενταετίας. Μια CES συνάρτηση παραγωγής ενοποιεί το κεφάλαιο, την ενεργασία και τις ενεργειακές υπηρεσίες ώστε να παραχθεί ένα μόνο τελικό αγαθό. Ο εισοδηματικός περιορισμός ορίζει την κατανάλωση ως το καθαρό προϊόν μείον τις επενδύσεις.

Στο WITCH οι περιοχές αλληλεπιδρούν μέσω πέντε καναλιών. Πρώτον, οι τιμές του πετρελαίου, του άνθρακα, του φυσικού αερίου και του ουρανίου εξαρτώνται από την κατανάλωση σε όλες τις περιοχές. Επομένως οι επενδύσεις στην Έρευνα και Ανάπτυξη και οι καταναλωτικές επιλογές σε κάθε περιοχή για κάθε δεδομένη χρονική περίοδο εμμέσως επηρεάζουν τις επιλογές όλων των χωρών. Δεύτερον, οι εκπομπές CO₂ κάθε περιοχής επηρεάζουν την παγκόσμια μέση θερμοκρασία κι επομένως τη σκιώδη τιμή των εκπομπών άνθρακα σε όλες τις περιοχές. Τρίτον, οι επενδυτικές αποφάσεις για την τεχνολογία παραγωγής ηλεκτρισμού κάθε περιοχής αλλάζει τη συσσωρευμένη παγκόσμια ικανότητα ενέργειας, που επηρεάζει τα επενδυτικά κόστη μέσω LbD. Έπειτα, οι παγκόσμιες επιπτώσεις της έρευνας και ανάπτυξης επηρεάζει το κόστος των προηγμένων βιοκαυσίμων. Πέμπτον, εάν το μοντέλο χρησιμοποιηθεί για να αναλυθούν οι επιδράσεις του εμπορίου εκπομπών, τα οριακά κόστη καταπολέμησης εξισώνονται για κάθε περιοχή, με συνέπειες στην έρευνα και ανάπτυξη και στις άλλες επενδυτικές επιλογές.

Η λύση ισορροπίας δίνεται ως εξής: για κάθε χρονική περίοδο ο διαμορφωτής κοινωνικής πολιτικής κάθε περιοχής λαμβάνει ως δεδομένες τις συμπεριφορές των άλλων παικτών και ορίζει τη βέλτιστη τιμή για τις μεταβλη-

τές ελέγχου. Αυτή η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι η συμπεριφορά για κάθε περιοχή συγκλίνει. Δηλαδή η επιλογή κάθε περιοχής είναι η καλύτερη αντίδραση σε όλες τις καλύτερες αντιδράσεις των υπολοίπων περιοχών. Σύμφωνα με Bosetti et al. (2007) η λύση σε αυτόν τον αλγόριθμο είναι μοναδική και αμετάβλητη σε διαφορετικές κατατάξεις των περιοχών.

Το υπόδειγμα MERGE περιγράφεται από τους Manne et al. (1995) ως ένα ευέλικτο μοντέλο που εξερευνά της εναλλακτικές οπτικές σε ένα σύνολο πολλών εριστικών θεμάτων επί της κλιματικής αλλαγής και πολιτικής (για παράδειγμα τα κόστη και οφέλη των πολιτικών καταπολέμησης όπως και θέματα προεξόφλησης και αποτίμησης). Αποτελείται από μια σειρά αρθρώματων που αναπαριστούν τις κύριες διαδικασίες σχετικά με τον διάλογο για την κλιματική αλλαγή:

MERGE

1. τα κόστη μείωσης των εκπομπών των ΑτΘ,
2. ένα φυσικό σύστημα ρύθμισης και αντίδρασης για τις εκπομπές των αερίων, και
3. την αντίδραση των ανθρώπινων και φυσικών συστημάτων στις αλλαγές του ατμοσφαιρικού συστήματος

Τα τρία άρθρωμα ή υπομοντέλα στο MERGE είναι

1. το Global 2200 που είναι ένα πλήρως ολοκληρωμένο υπόδειγμα εφαρμοσμένης γενικής ισορροπίας (fully integrated applied general equilibrium model), που χρησιμοποιείται για να αξιολογήσει τα κόστη των εναλλακτικών περιορισμών εκπομπών σε παγκόσμιο αλλά και τοπικό επίπεδο. Το Global 2200 χωρίζει τον κόσμο σε πέντε περιοχές,⁸
2. το κλιματικό άρθρωμα, που επικεντρώνεται σε τρία ΑτΘ: το διοξείδιο του άνθρακα, το μεθάνιο και το οξείδιο του αζώτου, και οι εκπομπές των οποίων χωρίζονται σε ενεργειακές και μη-ενεργειακές εκπομπές.
3. το οικονομικό άρθρωμα εκτίμησης της ζημίας.

⁸Στις Η.Π.Α. τις χώρες του Ο.Ο.Σ.Α., την πρώην Σοβιετική Ένωση, την Κίνα και τον υπόλοιπο κόσμο.

.....

ICAM Το Integrated Climate Assessment Model (ICAM, Dowlatabadi (1998)) περιέχει πέντε ολοκληρωμένα αρθρώματα, σχετικά με

1. δημογραφικά και οικονομικά στοιχεία (οικονομικό άρθρωμα),
2. την ενέργεια και τις εκπομπές (ενεργειακό άρθρωμα)
3. την ατμοσφαιρική σύνθεση και το κλίμα (κλιματικό άρθρωμα)
4. τις επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής (άρθρωμα ζημίας), και
5. ένα άρθρωμα της ανθρώπινης επέμβασης (intervention module)

Το ICAM χρησιμοποιεί 17 περιοχές και μια καινοτομία του είναι πως λαμβάνει υπόψη τις επιδράσεις της γήρανσης του πληθυσμού στην οικονομία. Επίσης, αναπαριστά την αβεβαιότητα σχετικά με το κόστος της νέας ενέργειας και τον τεχνολογιών καταπολέμησης, όπως και το ρυθμό διάχυσης της τεχνολογικής καινοτομίας από τη μία περιοχή στην άλλη, αναγνωρίζοντας την κοινωνική αντίσταση ή την καταλυτική επίδραση των ανθρώπων στη διάχυση των νέων τεχνολογιών.

.....

MIND Το Model of Investment and Technological Development (MIND, Edenhofer et al. (2006) και Edenhofer et al. (2005)) είναι ένα παγκόσμιο μοντέλο χωρίς περιφερειακή διαφοροποίηση που μεγιστοποιεί τη συνολική συνάρτηση κοινωνικής ευημερίας που καθορίζεται από την κατά κεφαλήν κατανάλωση. Το MIND διαφοροποιείται σε σχέση με τα άλλα IAMs επειδή επιτρέπει τη σύγκριση των εναλλακτικών επιλογών καταπολέμησης: την ενεργειακή αποδοτικότητα, τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και την απόκτηση/εξόρυξη άνθρακα.

1.3 DICE-2007

Το υπόδειγμα DICE (Dynamic Integrated model of Climate and the Economy, Δυναμικό Ολοκληρωμένο μοντέλο για το Κλίμα και την Οικονομία)

Επιμέλεια: Κωνσταντίνος Τσαρδούνης

ανήκει στην τελευταία γενιά υποδειγμάτων στην περιοχή εξέτασης των οικονομικών της κλιματικής αλλαγής και αναπτύχθηκε από τον William Nordhaus (Nordhaus (2008)). Το DICE συνδέει παράγοντες που επηρεάζουν την οικονομική μεγέθυνση, τις εκπομπές CO₂, τον κύκλο του άνθρακα, τις κλιματικές αλλαγές και ζημίες καθώς και τις πολιτικές αλλαγής του κλίματος. Οι εξισώσεις του μοντέλου αντλούνται από τις επιστήμες των οικονομικών, της οικολογίας και της γης και αριστοποιούνται με χρήση μαθηματικού λογισμικού.

Καινοτομία του DICE είναι ότι προσθέτει το *φυσικό κεφάλαιο* του κλιματικού συστήματος ως ένα είδος κεφαλαίου. Αφιερώνοντας μέρος της παραγωγής σε επενδύσεις στο φυσικό κεφάλαιο μέσω μειώσεων εκπομπών και μειώνοντας την κατανάλωση σήμερα οι οικονομίες προλαμβάνουν οικονομικά επιζήμια κλιματική αλλαγή κι επομένως αυξάνουν την πιθανότητα κατανάλωσης στο μέλλον.

Ενδογενείς μεταβλητές αποτελούν η παγκόσμια παραγωγή και το κεφαλαιακό απόθεμα, εκπομπές και συγκέντρωση CO₂, παγκόσμια αλλαγή θερμοκρασίας και κλιματικές ζημίες. Ωστόσο μειονέκτημα αποτελεί πως η τεχνολογική αλλαγή είναι εξωγενής, δηλαδή δεν παράγεται από αντιδράσεις στις δυνάμεις της αγοράς.

Σύμφωνα με τον Nordhaus (2008), το DICE-2007 στηρίζεται σε εκατοντάδες μελετών από τις φυσικές και κοινωνικές επιστήμες. Κάθε συνιστώσα του DICE είναι ένα υπομοντέλο που αντλεί την ύπαρξή του από έρευνα στη συγκεκριμένη περιοχή. Για παράδειγμα το κλιματικό κομμάτι χρησιμοποιεί την τελευταία λέξη της κλιματικής έρευνας για να προβάλει την κλιματική αλλαγή ως μια συνάρτηση των εκπομπών των ΑτΘ. Αν και τα υπομοντέλα του DICE δεν μπορούν με ακρίβεια να παράγουν περιφερειακές, βιομηχανικές και χρονικές λεπτομέρειες των μεγάλων ειδικευμένων μοντέλων, έχουν το πλεονέκτημα πως όσο προσπαθούν να αντικατοπτρίσουν την παρούσα φάση της γνώσης, μπορούν εύκολα να τροποποιηθούν. Η τελευταία εκδοχή του υποδείγματος αφορά το 2007 που ο Nordhaus (2008) έχει ονομάσει DICE-2007, ενώ ήδη ετοιμάζεται το DICE-2009.

1.3.1 Περιγραφή του DICE-2007

Το DICE-2007 θεωρεί την οικονομική της κλιματικής αλλαγής από τη σκοπιά της νεοκλασικής θεωρίας οικονομικής μεγέθυνσης. Έτσι οι οικονομίες επενδύοντας σε κεφάλαιο, εκπαίδευση και τεχνολογίες, απέχουν από την κατανάλωση του σήμερα με προσδοκία να αυξήσουν την κατανάλωση του αύριο. Το DICE-2007 επεκτείνει αυτήν την προσέγγιση συμπεριλαμβάνοντας το *φυσικό κεφάλαιο* του κλιματικού συστήματος ως ένα πρόσθετο είδος κεφαλαιακού αποθέματος. Έτσι μπορούμε να δούμε τα ΑτΘ ως ένα αρνητικό φυσικό κεφάλαιο και τις μειώσεις εκπομπών ως επενδύσεις που αυξάνουν την ποσότητα του φυσικού κεφαλαίου. Με το να αφιερώνεται παραγωγή στη μείωση των εκπομπών, οι οικονομίες μειώνουν την κατανάλωση σήμερα αλλά προλαμβάνουν οικονομικά ζημιογόνο κλιματική αλλαγή κι επομένως αυξάνουν τις πιθανότητες κατανάλωσης στο μέλλον.

Το DICE-2007 είναι ένα παγκόσμιο μοντέλο που συγκεντρώνει διαφορετικές χώρες σε ένα μοναδικό επίπεδο παραγωγής, κεφαλαιακού αποθέματος, τεχνολογίας και εκπομπών. Το πλεονέκτημα του DICE-2007 είναι πως οι βασικές τάσεις μπορούν να συλληφθούν με ακρίβεια και το υποκείμενο μοντέλο είναι πολύ πιο διαφανές και παραμετροποιήσιμο από τους ερευνητές.

Στο DICE-2007, πάντα κατά τον Nordhaus (2008), ο κόσμος έχει ένα καλά ορισμένο σύνολο προτιμήσεων που αντιπροσωπεύεται από την *κοινωνική συνάρτηση ευημερίας* και κατατάσσει τα διάφορα μονοπάτια κατανάλωσης (consumption paths). Η σημασία για την κατά κεφαλήν κατανάλωση μιας γενιάς εξαρτάται από το μέγεθος του πληθυσμού. Η σχετική σημαντικότητα διαφορετικών γενεών επηρεάζεται από δύο κεντρικές κανονιστικές παραμέτρους:

1. τον καθαρό ρυθμό της χρονικής προτίμησης (time preference) και
2. την ελαστικότητα της οριακής χρησιμότητας της κατανάλωσης (ελαστικότητα κατανάλωσης, consumption elasticity)

Αυτές οι δύο παράμετροι αλληλεπιδρούν για να καθορίσουν το προεξοφλητικό επιτόκιο στα αγαθά, που είναι καθοριστικό για τις διαχρονικές οικονομικές αλλαγές (intertemporal).

Επιμέλεια: Κωνσταντίνος Τσαρδούνης

**Προεξοφλητικό
επιτόκιο**

.....

Στο DICE-2007 χρησιμοποιείται η εκτιμημένη αγοραία απόδοση του κεφαλαίου (market return on capital) ως το προεξοφλητικό επιτόκιο, που κατά μέσο όρο είναι 4% ανά έτος για τον επόμενο αιώνα. Αυτό σημαίνει πως 1.000 ευρώ κλιματικής ζημίας σε έναν αιώνα, τιμολογούνται σήμερα (σε παρούσα αξία) περίπου 20 ευρώ. Με υψηλότερο προεξοφλητικό επιτόκιο οι μελλοντικές ζημίες φαίνονται μικρότερες και επομένως οδηγούν σε μικρότερη μείωση εκπομπών σήμερα. Έτσι το DICE θέτει τις επενδύσεις για καλύτερες σοδιές, βελτιωμένο εξοπλισμό και άλλες επενδύσεις υψηλής απόδοσης σε αντιδιαστολή με μελλοντικές κλιματικές ζημίες στα δέντρα και στο σιτάρι. Βλέπουμε πως επειδή οι αλλαγές αφορούν το μακρινό μέλλον είναι σημαντικός ο τρόπος υπολογισμού του προεξοφλητικού επιτοκίου.

2.1 Περιγραφή εξισώσεων

2.1.1 Αντικειμενική Συνάρτηση

Το DICE-2007 υποθέτει πως οι οικονομικές και κλιματικές πολιτικές θα έπρεπε να σχεδιαστούν για να αριστοποιήσουν τη ροή της κατανάλωσης διαχρονικά. Η κατανάλωση ερμηνεύεται ως «γενικευμένη κατανάλωση» (generalized consumption), που περιλαμβάνει αγαθά και υπηρεσίες (φαγητό και στέγη) αλλά και αγαθά εκτός αγοράς, όπως ανάπαυση, κατάσταση υγείας και περιβαλλοντικές υπηρεσίες.

Η μαθηματική αντιπροσώπευση αυτής της υπόθεσης δίνεται από την εξίσωση (2.1), σύμφωνα με την οποία οι πολιτικές επιλέγονται για να μεγιστοποιήσουν την κατανάλωση της κοινωνικής συνάρτησης ευημερίας που είναι το προεξοφλημένο άθροισμα της σταθμισμένης πληθυσμιακά χρησιμότητας της κατά κεφαλήν κατανάλωσης.

$$W = \sum_{t=1}^{T_{\max}} U[c(t), L(t)] R(t) \quad (2.1)$$

όπου W η αντικειμενική συνάρτηση σε παρούσα αξία χρησιμότητας (σε μονάδες χρησιμότητας), T_{\max} η μέγιστη περίοδος εκτίμησης για το υπόδειγμα (10

περίοδοι ισοούνται με 100 έτη), $U[c(t), L(t)]$ η στιγμιαία συνάρτηση χρησιμότητας (χρησιμότητα ανά περίοδο), $c(t)$ η κατά κεφαλήν κατανάλωση αγαθών και υπηρεσιών (σε δολάρια Η.Π.Α. 2005), $L(t)$ ο πληθυσμός και οι εισροές εργασίας (σε εκατομμύρια), $R(t)$ το προεξοφλητικό επιτόκιο κοινωνικής χρονικής προτίμησης (social time preference discount factor, ανά χρονική περίοδο), t ο χρόνος σε δεκαετίες (2005–2015, 2015–2025, ...)

Η (2.2) δίνει το προεξοφλητικό επιτόκιο, ενώ η (2.3) δείχνει πως η χρησιμότητα κάθε περίοδο είναι ισοελαστική συνάρτηση της κατά κεφαλήν κατανάλωσης. Οι υποθέσεις της τελευταίας είναι πως:

1. η ελαστικότητα της οριακής χρησιμότητας της κατανάλωσης είναι σταθερή και δη a . Η ρύθμιση του a γίνεται σε σύνδεση με τον καθαρό ρυθμό της χρονικής προτίμησης (time preference).
2. Η τιμή της κατανάλωσης τη μια περίοδο είναι ανάλογη του πληθυσμού.
3. Υπάρχει έκπτωση στην οικονομική ευημερία των μελλοντικών γενεών, όπως δίνεται από την (2.2). Το ρ σταθμίζει ως προς την ευημερία τις χρησιμότητες των διαφόρων γενεών.

$$R(t) = (1 + \rho)^{-t} \quad (2.2)$$

$$U[c(t), L(t)] = L(t) \left[\frac{c(t)^{1-a}}{1-a} \right] \quad (2.3)$$

όπου ρ ο καθαρός ρυθμός κοινωνικής χρονικής προτίμησης (pure rate of social time preference, ανά έτος), a η ελαστικότητα της οριακής χρησιμότητας της κατανάλωσης (καθαρός αριθμός).

2.1.2 Οικονομικές Εξισώσεις

Οι οικονομικές εξισώσεις περιγράφουν την εξέλιξη της παγκόσμιας παραγωγής διαχρονικά. Η τοπική και παγκόσμια συνάρτηση παραγωγής θεωρούνται ως συναρτήσεις Cobb-Douglas με σταθερές αποδόσεις κλίμακας σε

κεφάλαιο, εργασία και ουδέτερη κατά Hicks τεχνολογική αλλαγή¹ Η παγκόσμια παραγωγή δίνεται από την (2.4), όπου $\Omega(t)$ και $\Lambda(t)$ τα κόστη κλιματικής ζημίας και καταπολέμησης των ΑτΘ (σε κλάσμα της παγκόσμιας παραγωγής) αντίστοιχα (εξισώσεις (2.5) και (2.7)).

$$Q(t) = \Omega(t) [1 - \Lambda(t)] A(t) K(t)^\gamma L(t)^{1-\gamma} \quad (2.4)$$

όπου $A(t)$ ο συνολικός παράγοντας παραγωγικότητας [total factor productivity (productivity units)], $T_{AT}(t)$ η παγκόσμια μέση επιφανειακή θερμοκρασία (η διαφορά της από το 1900 σε °C), $\mu(t)$ ο ρυθμός ελέγχου των εκπομπών (σε κλάσμα των μη ελεγχόμενων εκπομπών), γ η ελαστικότητα κατά κεφαλήν παραγωγής (καθαρός αριθμός), $\pi(t)$ το κόστος συμμετοχής (κόστος καταπολέμησης με ελλιπή συμμετοχή ως κλάσμα του κόστους καταπολέμησης με πλήρη συμμετοχή), $\theta_1(t), \theta_2$ οι παράμετροι της συνάρτησης καταπολέμησης κόστους.

$$\Omega(t) = \frac{1}{[1 + \pi_1 T_{AT}(t) + \pi_2 T_{AT}(t)^2]} \quad (2.5)$$

$$(2.6)$$

Η συνάρτηση της ζημίας (2.5) υποθέτει πως οι ζημίες είναι ανάλογες του παγκόσμιου προϊόντος και πολυωνυμικές συναρτήσεις της παγκόσμιας μέσης θερμοκρασιακής αλλαγής. Η συσσωρευμένη καμπύλη ζημίας χτίζεται από τις εκτιμήσεις των ζημιών 12 περιοχών, υποθέτοντας υποτιθέμενες τομεακές αλλαγές και υποκείμενες εισοδηματικές ελαστικότητες διαφορετικών προϊόντων. Περιλαμβάνει εκτιμημένες ζημίες σε πολλούς τομείς, όπως η αγροοικονομία, το κόστος της ανόδου της στάθμης των θαλασσών, δυσμενείς επιπτώσεις σε υγεία και ζημίες εκτός αγορών όπως εκτιμήσεις πιθανών κοστών καταστροφικών ζημιών. Επειδή (κατά Nordhaus (2008)) η εμπειρική έρευνα σε αυτούς τους τομείς είναι σαθρή, η εξίσωση αυτή είναι αρκετά υποθετική.

¹Σύμφωνα με τον Hicks (1968) στην εξίσωση του υποδείγματος του Solow $Y = A \cdot F(K, L)$ μια αλλαγή ουδέτερη κατά Hicks είναι εκείνη στην οποία αλλάζει μόνο το A .

$$\Lambda(t) = \pi(t)\theta_1(t)\mu(t)^{\theta_2} \quad (2.7)$$

Η συνάρτηση της καταπολέμησης (2.7) αφορά ένα υπόδειγμα μειωμένης μορφής στο οποίο τα κόστη της καταπολέμησης των εκπομπών είναι συνάρτηση με το ρυθμό καταπολέμησης των εκπομπών, $\mu(t)$. Η (2.7) υποθέτει πως τα κόστη καταπολέμησης είναι ανάλογα της παγκόσμιας παραγωγής και δίνονται ως μια πολυωνυμική συνάρτηση του ρυθμού μείωσης. Η συνάρτηση κόστους εκτιμάται πως είναι υψηλής κυρτότητας (*highly convex*), κι επομένως το οριακό κόστος των μειώσεων αυξάνεται μετά το 0 με μεγαλύτερο ρυθμό σε σχέση με το ρυθμό μειώσεων.

Το DICE-2007 περιλαμβάνει ρητά τεχνολογία *backstop*² που αφορά μια τεχνολογία που αντικαθιστά όλα τα ορυκτά καύσιμα. Τέτοια τεχνολογία *backstop* θα μπορούσε να αφαιρεί τον άνθρακα από την ατμόσφαιρα ή να είναι μια γενικής χρήσης περιβαλλοντικά ευγενής τεχνολογία μηδενικού άνθρακα, όπως η ηλιακή, πυρηνική ή γεωθερμική ενέργεια ή μια προς το παρόν μη εφευρημένη πηγή ενέργειας. Η τιμή της *backstop* τεχνολογίας στο DICE-2007 αρχικά είναι υψηλή και μειώνεται διαχρονικά καθώς προχωρούν οι τεχνολογικές αλλαγές εξοικονόμησης άνθρακα. Στην συνάρτηση της καταπολέμησης (2.7) το χρονικό μονοπάτι (*time path*) των παραμέτρων είναι τέτοιο ώστε το οριακό κόστος της καταπολέμησης με ρυθμό ελέγχου 100 τοις εκατό να ισούται με τη τιμή της *backstop* τεχνολογίας για κάθε έτος.

Οι επόμενες τρεις εξισώσεις (2.8)-(2.10) είναι τυπικές λογιστικές εξισώσεις που ορίζουν την κατανάλωση, την κατανάλωση κατά κεφαλήν και την ισορροπία του κεφαλαίου.

²Η τεχνολογία *backstop*, σύμφωνα με τον Prell (1996), παρέχει πόρους με σταθερό οριακό κόστος επί απροσδιόριστα μακρύ χρονικό διάστημα. Ως έννοια εισήχθη από τον William Nordhaus και αφορά τεχνολογίες σε αγορές των οποίων οι συντελεστές είναι πεπερασμένοι σε προσφορά, χαρακτηριστικό των περισσότερων ενεργειακών εμπορευμάτων. Όπως είχε πει (Nordhaus (1973)), «Η έννοια που είναι σχετική με αυτό το πρόβλημα είναι η *τεχνολογία backstop*, ένα σύνολο διεργασιών που

1. είναι ικανό να ανταποκρίνονται στις απαιτήσεις της ζήτησης και
2. έχει κατ' ουσίαν άπειρους πόρους.»

$$Q(t) = C(t) + I(t) \quad (2.8)$$

$$c(t) = \frac{C(t)}{L(t)} \quad (2.9)$$

$$K(t) = I(t) + (1 - \delta_k) \cdot K(t - 1) \quad (2.10)$$

όπου $Q(t)$ το καθαρό προϊόν των αγαθών και υπηρεσιών, η καθαρά καταπολέμηση και ζημίες, $C(t)$ η κατανάλωση αγαθών και υπηρεσιών, $I(t)$ και $K(t)$ οι επενδύσεις και το απόθεμα κεφαλαίου (σε τρισεκατομμύρια δολάρια Η.Π.Α. 2005), δ_k ο ρυθμός απόσβεσης του κεφαλαίου (ανά περίοδο).

Οι τελευταίες δύο εξισώσεις στο οικονομικό τμήμα είναι οι εξισώσεις εκπομπών και περιορισμού πόρων σε καύσιμα άνθρακα. Οι ανεξέλεγκτες εκπομπές CO_2 από τη βιομηχανία στην (2.11) δίνονται από ένα επίπεδο έντασης άνθρακα, $\sigma(t)$, πολλαπλασιασμένο με την παγκόσμια παραγωγή. Οι πραγματικές εκπομπές μειώνονται έπειτα από το ρυθμό καταπολέμησης των εκπομπών $\mu(t)$, που παρουσιάστηκε προηγουμένως. Η ένταση άνθρακα θεωρείται εξωγενής και προκύπτει από τις εκτιμήσεις εκπομπών των 12 περιοχών στα διάφορα πειράματα που διενέργησε ο Nordhaus (2008). Η εξίσωση (2.12) είναι ένα όριο στους συνολικούς πόρους των ορυκτών καυσίμων. Το υπόδειγμα DICE-2007 υποθέτει πως τα αυξητικά κόστη εξαγωγής είναι μηδενικά και ότι τα ορυκτά καύσιμα είναι άριστα κατανεμημένα διαχρονικά από την αγορά, παράγοντας άριστα Hotelling rents³.

³Το Hotelling rent, ή και αλλιώς μίσθωμα σπανιότητας, είναι η διαφορά ανάμεσα στο οριακό κόστος παραγωγής (εξόρυξης) μιας μη ανανεώσιμης πηγής και στην αγοραία τιμή της. Ο Harold Hotelling υπέθεσε πως αυτό το μίσθωμα σπανιότητας αυξάνεται στην αγοραία τιμή του επιτοκίου μέχρι το σημείο όπου αυτή η πηγή εξαντλείται. Αυτή η κατάσταση μπορεί ναδειχθεί πως είναι κοινωνικά άριστη (Hotelling (1931)). Αυτή η θεωρία είναι γνωστή ως ο *Κανόνας του Hotelling για τη διαφοροποίηση προϊόντος (Hotelling's law of product differentiation)*.

$$E_{Ind}(t) = \sigma(t) [1 - \mu(t)] A(t) K(t)^\gamma L(t)^{1-\gamma} \quad (2.11)$$

$$CCum \leq \sum_{t=0}^{Tmax} E_{Ind}(t) \quad (2.12)$$

όπου $E_{Ind}(t)$ οι εκπομπές άνθρακα από τη βιομηχανία (δισεκατομμύρια τόνοι άνθρακα ανά περίοδο), $\sigma(t)$ ο λόγος των μη ελεγχόμενων βιομηχανικών εκπομπών ως προς το προϊόν (σε τόνους άνθρακα ανά προϊόν σε τιμές 2005), $CCum$ η μέγιστη κατανάλωση των ορυκτών καυσίμων (σε δισεκατομμύρια τόνους άνθρακα).

2.1.3 Γεωφυσικές Εξισώσεις

Οι εξισώσεις (2.13) ως (2.20) συνδέουν την οικονομική δραστηριότητα και τα ΑτΘ με τον κύκλο του άνθρακα, τις ακτινογραφικές δυνάμεις (radiative forcings⁴) και την κλιματική αλλαγή.

Στην (2.13) δίνεται η σχέση ανάμεσα στην οικονομική δραστηριότητα και στις εκπομπές των ΑτΘ. Στο DICE-2007 μόνο το βιομηχανικό CO₂ [$E_{Ind}(t)$] είναι ενδογενές ενώ όλες οι άλλες εκπομπές είναι εξωγενείς.

$$E(t) = E_{Ind}(t) + E_{Land}(t) \quad (2.13)$$

όπου $E(t)$ οι συνολικές εκπομπές άνθρακα (σε δισεκατομμύρια τόνους άνθρακα ανά περίοδο) και $E_{Land}(t)$ οι εκπομπές άνθρακα από χρήση γης (σε δισεκατομμύρια τόνους άνθρακα ανά περίοδο).

Ο κύκλος του άνθρακα περιγράφεται από τους τρεις ταμιευτήρες του στην ατμόσφαιρα, στα ανώτερα στρώματα των ωκεανών και τη βιόσφαιρα και στα

⁴Στην κλιματική επιστήμη, ως ακτινογραφική δύναμη ορίζεται η αλλαγή στην καθαρά ακτινοβολία που συμβαίνει στο ατμοσφαιρικό όριο μεταξύ της τροπόσφαιρας και της στρατόσφαιρας (την τροπόπαυση). Η καθαρά ακτινοβολία είναι η διαφορά ανάμεσα στην εισερχόμενη και την εξερχόμενη ενέργεια ακτινοβολήσεως σε ένα δεδομένο κλιματικό σύστημα και μετράται σε Watt ανά τετραγωνικό μέτρο (Strassmann et al. (2009)).

βάθη τους με τις (2.14), (2.15) και (2.16) αντίστοιχα.

$$M_{AT}(t) = E(t) + \phi_{11}M_{AT}(t-1) + \phi_{21}M_{UP}(t-1) \quad (2.14)$$

$$M_{UP}(t) = \phi_{12}M_{AT}(t-1) + \phi_{22}M_{UP}(t-1) + \phi_{32}M_{LO}(t-1) \quad (2.15)$$

$$M_{LO}(t) = \phi_{23}M_{UP}(t-1) + \phi_{33}M_{LO}(t-1) \quad (2.16)$$

όπου $M_{AT}(t)$, $M_{UP}(t)$, $M_{LO}(t)$ η μάζα του άνθρακα στους ταμιευτήρες της ατμόσφαιρας, των ανώτερων και βαθύτερων στρωμάτων των ωκεανών αντίστοιχα (σε δισεκατομμύρια μετρικών τόνων άνθρακα), ϕ_{11} , ϕ_{12} , ϕ_{21} , ϕ_{22} , ϕ_{23} , ϕ_{32} , ϕ_{33} οι παράμετροι του κύκλου του άνθρακα (σε ροές ανά περίοδο).

Οι παράμετροί τους, έχουν επιλεχθεί από τον Nordhaus (2008) ώστε να ταιριάζουν με τον κύκλο του άνθρακα στο Υπόδειγμα για την Αποτίμηση των Αερίων του Φαινομένου του Θερμοκηπίου που προκαλούν την Κλιματική Αλλαγή (MAGGIC: Model for the Assessment of Greenhouse-Gas Induced Climate Change (2007)).

Η συσσώρευση των ΑτΘ οδηγεί στη θέρμανση της επιφάνειας της γης λόγω της αύξησης των ακτινογραφικών δυνάμεων με τη σχέση που δίνεται στην (2.17) και βασίζεται σε εμπειρικές μελέτες. Το μεγαλύτερο μέρος της θέρμανσης οφείλεται στο CO₂, ενώ η ισορροπία είναι εξωγενής δύναμη από άλλα διαχρονικά ΑτΘ όπως τα αεροζόλ, το όζον και άλλοι παράγοντες. Στο DICE-2007 θεωρούμε τα άλλα ΑτΘ εξωγενή επειδή ο έλεγχος τους είναι πράγματι εξωγενής (όπως στην περίπτωση των χλωροφθορανθράκων) ή δεν έχουν κατανοηθεί πλήρως (φαινόμενο albedo για τα νέφη⁵).

$$F(t) = \eta \left[\log_2 \frac{M_{AT}(t)}{M_{AT}(1750)} \right] + F_{EX}(t) \quad (2.17)$$

⁵Το φαινόμενο της λευκαύγειας (albedo effect) είναι το μέτρο της ανακλαστικότητας της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας μιας επιφάνειας ή ενός σώματος (Huwald et al. (2009)).

όπου $F(t)$ και $F_{EX}(t)$ οι συνολικές και εξωγενείς ακτινογραφικές δυνάμεις (σε Watt ανά τετραγωνικό μέτρο), η η παράμετρος επιρροής θερμοκρασίας (temperature-forcing parameter, σε °C ανά Watt ανά τετραγωνικό μέτρο).

Στις (2.19) και (2.20) έχουμε το κλιματικό μοντέλο. Υψηλές ακτινογραφικές δυνάμεις θερμαίνουν το στρώμα της ατμόσφαιρας που με τη σειρά του θερμαίνει τα ανώτερα στρώματα των ωκεανών και εντέλει η θερμότητα μεταδίδεται και στα βάθη τους. Οι παράμετροι των εξισώσεων έχουν ρυθμιστεί έτσι ώστε οι προβλέψεις της θερμοκρασίας για τον 21ο αιώνα να μη διαφέρουν από τις προσομοιώσεις του MAGGIC.

$$T_{AT}(t) = T_{AT}(t-1) + \xi_1 \{F(t) - \xi_2 T_{AT}(t-1) - \xi_3 [T_{AT}(t-1) - T_{LO}(t-1)]\} \quad (2.18)$$

$$T_{LO}(t) = T_{LO}(t-1) + \xi_4 \{T_{AT}(t-1) - [T_{AT}(t-1) - T_{LO}(t-1)]\} \quad (2.19)$$

$$\pi(t) = \phi(t)^{1-\partial_2} \quad (2.20)$$

όπου $T_{LO}(t)$ η παγκόσμια μέση θερμοκρασία στα κατώτερα στρώματα των ωκεανών (η διαφορά της από το 1900 σε °C), $\xi_1, \xi_2, \xi_3, \xi_4$ παράμετροι των κλιματικών εξισώσεων (ροές ανά περίοδο), $\phi(t)$ ο ρυθμός συμμετοχής (σε κλάσμα των εκπομπών όπως προκύπτουν από την πολιτική)

2.2 Αριστοποίηση

Οι υπολογισμοί για το DICE-2007 γίνονται με το πακέτο CONOPT στο σύστημα GAMS (General Algebraic Modeling System - Γενικό Αλγεβρικό Σύστημα Υποδειγματοποίησης), χρησιμοποιώντας τον γενικευμένο αλγόριθμο μειωμένου βαθμωτού (GRG, Generalized Reduced Gradient algorithm). Η ιδέα αυτού του τύπου αλγορίθμου επινοήθηκε αρχικά από τους Wilde & Beightler (1967) χρησιμοποιώντας το όνομα *περιορισμένες παράγωγοι*, από

τον Wolfe (1963) που την ονόμασε *μέθοδο μειωμένου βαθμωτού* (reduced-gradient method) και επεκτάθηκε από τους Abadie & Carpentier (1969) που έδωσαν και την τελική ονομασία.

Σύμφωνα με τον Avriel (1976) αν το οικονομικό μοντέλο και οι περιορισμοί είναι γραμμικοί τότε η διαδικασία είναι η μέθοδος Simplex για γραμμικό προγραμματισμό και αν δεν έχουμε παρόντες περιορισμούς, τότε έχουμε αναζήτηση βαθμωτού (gradient search). Η ιδέα του αλγορίθμου GRG είναι να μετατραπεί το πρόβλημα περιορισμού σε ένα πρόβλημα χωρίς περιορισμό χρησιμοποιώντας άμεση αντικατάσταση (direct substitution). Αν η άμεση αντικατάσταση ήταν δυνατή θα μείωνε τον αριθμό των ανεξάρτητων μεταβλητών σε $(n - m)$ και θα απάλειφε τις εξισώσεις περιορισμού. Ωστόσο με μη γραμμικές εξισώσεις περιορισμού δεν είναι δυνατόν να λύσουμε τις m εξισώσεις για m ανεξάρτητες μεταβλητές σε όρους των υπολοίπων $(n - m)$ μεταβλητών και μετά να αντικαταστήσουμε αυτές τις εξισώσεις στο οικονομικό μοντέλο. Επομένως απαιτούνται οι διαδικασίες περιορισμένης μεταβολής (constrained variation) και η χρήση πολλαπλασιαστών Lagrange της κλασσικής θεωρίας αριστοποίησης. Έτσι, το οικονομικό μοντέλο και οι εξισώσεις περιορισμού επεκτείνονται σε μια σειρά Taylor όπου διακρατώνται μόνο οι όροι πρώτης τάξης. Έπειτα, με αυτές τις γραμμικές εξισώσεις οι εξισώσεις περιορισμού μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να περιορίσουν τον αριθμό των ανεξάρτητων μεταβλητών. Αυτό οδηγεί σε Ιακωβιανές ορίζουσες της μεθόδου της περιορισμένης μεταβολής (constrained variation) και τον ορισμό πολλαπλασιαστών Lagrange ως το λόγο μερικών παραγώγων (Pike (2001)).

2.3 Εναλλακτικές Πολιτικές για την υπερθέρμανση του πλανήτη

Το μεγαλύτερο πλεονέκτημα των υποδειγμάτων ολοκληρωμένης αποτίμησης (Integrated Assessment Models) και συγκεκριμένα του υποδείγματος DICE-2007 είναι ότι υπάρχει η δυνατότητα να ερευνώνται εναλλακτικές πολιτικές με τρόπο εκτενή και περιεκτικό.

Όσον αφορά στην πολιτική για την αντιμετώπιση της κλιματικής αλλαγής

υπάρχει πλήθος προσεγγίσεων. Αναλυτικά θα περιγραφεί η πολιτική «άνευ ελέγχων» (baseline policy), η άριστη (optimal policy) πολιτική, πολιτική των περιορισμών της ποσότητας του CO₂, η πολιτική των περιορισμού της θερμοκρασίας, το πρωτόκολλο του Kyoto, οι φιλόδοξες προτάσεις και η πολιτική της τεχνολογίας backstop.

2.3.1 Περιγραφή των εναλλακτικών πολιτικών

Η πολιτική αυτή είχε υιοθετηθεί από την πλειοψηφία των εθνών μέχρι το έτος 2007 και στηρίζεται στην υπόθεση ότι οι κυβερνητικοί παράγοντες δεν λαμβάνουν μέτρα για τα πρώτα 250 και 50 έτη ώστε να χαλιναγωγήσουν το φαινόμενο του θερμοκηπίου ή δεν εσωτερικεύουν τις αρνητικές εξωτερικότητες του φαινομένου αυτού.

Η πολιτική άνευ ελέγχων

Σύμφωνα με την πολιτική αυτή υπάρχει η δυνατότητα εύρεσης μιας τροχιάς μειώσεων των εκπομπών των αερίων του θερμοκηπίου, η οποία ισορροπεί τα τρέχοντα κόστη καταπολέμησης του φαινομένου του θερμοκηπίου (abatement cost) έναντι των μελλοντικών ζημιών προερχόμενων από το φαινόμενο αυτό. Υποθέτοντας πλήρη συμμετοχή και συμμόρφωση των εθνών με τις επιταγές της πολιτικής αυτής οι εκπομπές αερίων μειώνονται αποτελεσματικά.

Η άριστη πολιτική

Η άριστη πολιτική είναι ένα μέτρο σύγκρισης ή σημείο αναφοράς (benchmark) για να συμπεράνουμε πόσο αποτελεσματικές ή μη είναι οι εκάστοτε εναλλακτικές πολιτικές αντιμετώπισης της κλιματικής αλλαγής. Συγχρόνως, δεν υπολογίζει την εσωτερική αξία (ή άλλες μη οικονομικές ή ανθρωποκεντρικές αξίες) της κλιματικής σταθερότητας, αλλά ενσωματώνει εκτιμήσεις των ζημιών που δεν προέρχονται από την αγορά (non-market damage).

Η πολιτική αυτή αναφέρεται στους περιορισμούς που τίθενται στις συγκεντρώσεις του CO₂ και περιλαμβάνει τρεις υποπεριπτώσεις, όπου οι συγκεντρώσεις του διοξειδίου του άνθρακα περιορίζονται σε :

Πολιτική των περιορισμών της συγκέντρωσης CO₂

- I. 1,5 φορά της συγκέντρωσης των προβιομηχανικών επιπέδων (preindustrial levels) (420ppm),

II. 2 φορές της συγκέντρωσης των προβιομηχανικών επιπέδων (560ppm), και

III. 2,5 φορές της συγκέντρωσης των προβιομηχανικών επιπέδων (700ppm).

Οι συγκεντρώσεις του διοξειδίου του άνθρακα, κατά Nordhaus (2008), έχουν οριστεί σύμφωνα με το Πλαίσιο Συνόδου των Ηνωμένων Εθνών (U.N. Framework Convention). Ωστόσο, δεν καθιερώθηκε συγκεκριμένο επίπεδο επικίνδυνων συγκεντρώσεων διοξειδίου.

Η εκδοχή αυτή των εναλλακτικών πολιτικών για την αντιμετώπιση της κλιματικής αλλαγής μειονεκτεί λόγω της επιβολής ορίων ή περιορισμών χωρίς την επιβολή περιορισμών στις ζημιές με αποτέλεσμα να αγνοούνται οι ζημιές που προκαλούνται στο κλίμα πριν προσεγγισθεί το εκάστοτε κατώφλι περιορισμών.

.....

**Πολιτική
περιορισμών της
θερμοκρασίας**

Με τη συγκεκριμένη πολιτική επιχειρείται ο περιορισμός της μεταβολής της θερμοκρασίας. Στο DICE-2007 υπάρχουν τρεις υποπεριπτώσεις, όπου η αύξηση της θερμοκρασίας περιορίζεται σε :

I. 1,5 βαθμό Κελσίου (°C),

II. 2 °C,

III. 2.5 °C, και

IV. 3 °C (από τα επίπεδα του έτους 1900).

Από οικονομικής άποψης είναι εξαιρετικά δαπανηρό να τεθεί κάποιος περιορισμός. Για παράδειγμα σύμφωνα με τους Oppenheimer & Alley (2004) είναι δύσκολο να κρίνουμε το κατώφλι τήξεως, του παγόβουνου της Δυτικής Ανταρκτικής (West Antarctic Ice Sheet) ή του παγόβουνου της Γροιλανδίας⁶ (Greenland Ice Sheet).

Το βασικό σημείο είναι η εξέταση των σχέσεων ανταλλαγών (trade-offs) και ειδικότερα των επιπρόσθετων κοστών (incremental costs) θέτοντας αυτούς τους περιορισμούς στο πλαίσιο του υποδείγματος DICE-2007.

⁶Βάσει Changjoo et al. (2000), Wake et al. (2009) και του περιοδικού NASA Science (2000) το παγόβουνο της Γροιλανδίας αποθηκεύει το 9% των παγκόσμιων αποθεμάτων γλυκού νερού ενώ της Δυτικής Ανταρκτικής περίπου το 7%.

Η πολιτική των περιορισμών της θερμοκρασίας πλεονεκτεί σε σχέση με την πολιτική των περιορισμών των συγκεντρώσεων του άνθρακα λόγω της επικέντρωσης σε παράγοντες καθοριστικής σημασίας για την κλιματική αλλαγή. Παρόλα αυτά το μειονέκτημα αυτής της πολιτικής είναι ότι δεν μπορεί να καθοριστούν με ακρίβεια οι παράγοντες αυτοί.

.....

Το τρέχον καθεστώς που ισχύει για τον έλεγχο των εκπομπών είναι το πρωτόκολλο του Κyoto το οποίο δημιουργήθηκε το 1997 με σκοπό να περιορίσει τις εκπομπές των αερίων του θερμοκηπίου των χωρών του OECD, της Ανατολικής Ευρώπης και το μεγαλύτερο μέρος της Σοβιετικής Ένωσης.

**Το πρωτόκολλο
του Κyoto**

Στο DICE-2007 μελετώνται τρεις παραλλαγές του πρωτοκόλλου :

- I. της αμιγούς εκδοχής που εκτείνεται απεριόριστα,
- II. της αμιγούς εκδοχής που εκτείνεται χωρίς την συμμετοχή των Η.Π.Α., και
- III. της ενισχυμένης εκδοχής του πρωτοκόλλου (strengthened Kyoto Protocol).

Στην πρώτη περίπτωση εξετάζονται οι περιορισμοί των εκπομπών που εκτείνονται απεριόριστα. Η δεύτερη περίπτωση είναι όμοια με την πρώτη με την διαφορά ότι αποκλείει την συμμετοχή των Η.Π.Α.. Η τρίτη περίπτωση είναι αναλυτικότερη και διευρυμένη.

Για την ανάλυση της προσέγγισης του περιορισμού των εκπομπών επιλέγουμε την ενισχυμένη εκδοχή του πρωτοκόλλου κατά την οποία οι χώρες προστίθενται σταδιακά τις επερχόμενες δεκαετίες ξεκινώντας με μειώσεις της τάξεως του 10% και στη συνέχεια προστίθενται επιπλέον μειώσεις των εκπομπών κάθε τέταρτο του αιώνα. Υπό την υπόθεση αυτή οι Η.Π.Α. εισέρχονται στο πρωτόκολλο το 2015 και αναλαμβάνουν μειώσεις εκπομπών της τάξης του 50% μέχρι το έτος 2030. Αντίστοιχα η Κίνα εισέρχεται το 2020 και αναλαμβάνει μειώσεις της τάξης του 50% μέχρι το 2030. Κάθε περιοχή εκτός της υπό-Σαχάριας Αφρικής υποτίθεται ότι αναλαμβάνει σημαντικές μειώσεις των εκπομπών μέχρι τα μέσα του 21ου αιώνα. Με την προσέγγιση αυτή τα επίπεδα των παγκόσμιων μειώσεων των εκπομπών ανέρχονται σε 40% το 2050

δηλαδή λίγο υψηλότερα από τα επίπεδα του 1990. Αυτό συνεπάγεται ότι η εφαρμογή της προσέγγισης αυτής προϋποθέτει πάρα πολύ μεγάλη προσπάθεια.

Σε όλες τις περιπτώσεις του πρωτοκόλλου του Kyoto υποθέτουμε ότι οι περιορισμοί των μειώσεων των εκπομπών αναλαμβάνονται αποτελεσματικά με το οριακό κόστος των μειώσεων [και την τιμή του άνθρακα (carbon price)] να εξισώνεται μεταξύ όλων των συμμετεχόντων. Οι χώρες που δεν συμμετέχουν δεν υποβάλλονται σε περιορισμούς και η τιμή του άνθρακα για αυτές είναι μηδενική.

.....

Φιλόδοξες Προτάσεις Η εκδοχή της κριτικής του Stern

Τον Νοέμβριο του 2006 η Βρετανική Κυβέρνηση παρουσίασε μια εμπειριστατωμένη έρευνα η οποία περιλαμβάνει μια κριτική στα οικονομικά της κλιματικής αλλαγής. Συγκεκριμένα οι πολιτικές που στοχεύουν στην επιβράδυνση της κλιματικής αλλαγής ενσωματώνουν μέτριο ρυθμό μειώσεων των εκπομπών στο βραχυπρόθεσμο ορίζοντα ακολουθώντας πιο έντονες μειώσεις στο μακροπρόθεσμο ορίζοντα. Στο DICE-2007 λαμβάνονται δύο επιτόκια προεξόφλησης: ένα πολύ χαμηλό (περίπου 1%) για τις κλιματικές επενδύσεις, ενώ η υπόλοιπη οικονομία τρέχει με 5,5%.

Η ανάλυση του Stern καταλήγει σε διαφορετικά συμπεράσματα λόγω των διαφορετικών υποθέσεων εν συγκρίσει με τις υπόλοιπες πολιτικές. Ειδικότερα, αρχικά έχουμε απότομες μειώσεις εκπομπών λόγω των χαμηλά προεξοφλημένων μελλοντικών ζημιών. Αυτό οδηγεί σε αναποτελεσματικότητα επειδή οι κλιματικές επενδύσεις χαμηλού επιτοκίου εξαγκωνίζουν της επενδύσεις υψηλού επιτοκίου σε μη κλιματικό κεφάλαιο.

Η πρόταση του Al Gore

Ως εναλλακτική πολιτική για την κλιματική αλλαγή ο Al Gore πρότεινε την συμμετοχή των Ηνωμένων Εθνών σε διεθνή συμφωνία εντός 2 ετών η οποία μειώνει τα αποτελέσματα της υπερθέρμανσης του πλανήτη στις αναπτυγμένες χώρες σε ποσοστό 90% και περισσότερο από 50% παγκοσμίως ώστε οι επόμενες γενιές να κληρονομήσουν ένα υγιή πλανήτη. Για την εφαρμογή

Επιμέλεια: Κωνσταντίνος Τσαρδούνης

της συγκεκριμένης πρότασης το DICE-2007 προϋποθέτει ότι ο ρυθμός περιορισμού των εκπομπών αυξάνεται από 15% το 2010 μέχρι 90% το 2050, ενώ ο ρυθμός συμμετοχής (participation rate) αυξάνεται από 50% ως 100% αντίστοιχα.

Η πολιτική χαμηλού κόστους τεχνολογίας backstop

Η πολιτική αυτή ερευνά την δημιουργία μίας νέας πηγής ενέργειας η οποία θα είναι ικανή να αντικαταστήσει τα τρέχοντα ορυκτά καύσιμα σε ανταγωνιστικά κόστη σε σχέση με τις ήδη υπάρχουσες τεχνολογίες. Στην παρούσα φάση εκτιμάται ότι το οριακό κόστος της καθολικής αντικατάστασης είναι περίπου \$1.000 ανά τόνο άνθρακα.

Μια άλλη εκδοχή είναι η χρησιμοποίηση της γεωμηχανικής⁷ (geoengineering) ώστε να αντισταθμιστούν οι κλιματικές επιδράσεις της αύξησης του CO₂.

Στο DICE-2007 υποθέτουμε πως η συγκεκριμένη backstop τεχνολογία έχει μηδενικές εκπομπές άνθρακα και αντικαθιστά τα υπάρχοντα ορυκτά καύσιμα με κόστος \$5 ανά τόνο άνθρακα (Nordhaus (2008)).

⁷ Η καλύτερη πρόταση της γεωμηχανικής είναι να διασκορπιστούν σωματίδια στην ανώτερη ατμόσφαιρα ώστε να σκεδάζουν την ηλιακή ακτινοβολία κι επομένως να ψυχρανθεί η επιφάνεια της γης. Διαδικασία παρόμοια, δηλαδή, με την έκρηξη αρκετών μεγάλων ηφαιστειών σε ετήσια βάση.

Εμπειρικά Αποτελέσματα

3.1 Συνολικά Αποτελέσματα

Αρχικά παρουσιάζονται οι 16 εναλλακτικές πολιτικές για το υπόδειγμα DICE-2007 στον Πίνακα 3.1 (σελ. 45).

Ο Πίνακας 3.2 (σελ. 46) περιλαμβάνει εν συντομία τα αποτελέσματα των διαφορετικών πολιτικών. Οι πρώτες δύο στήλες αναφέρονται στην καθαρά οικονομική επίδραση των διαφορετικών πολιτικών σε σύγκριση με την άνευ ελέγχου (baseline policy).

Η στήλη της αντικειμενικής συνάρτησης μετρά την τρέχουσα αξία της κατανάλωσης υπό την εκάστοτε πολιτική μείον την τρέχουσα αξία της καταναλώσεως (present value of consumption) της πολιτικής άνευ ελέγχων. Η δεύτερη στήλη είναι η κατά προσέγγιση διαφορά της τρέχουσας αξίας των ζημιών και της καταπολέμησης των ζημιών (abatement cost). Οι τρεις επόμενες στήλες παρουσιάζουν την τρέχουσα αξία των ζημιών της κλιματικής αλλαγής, την τρέχουσα αξία του κόστους καταπολέμησης των ζημιών και το άθροισμα του κόστους καταπολέμησης των ζημιών με τις ζημιές. Η έκτη στήλη αφορά το κοινωνικό κόστος του CO₂¹ το έτος 2005 και οι επόμενες δύο στήλες αφορούν την τιμή του άνθρακα ή αλλιώς φόρος άνθρακα (carbon price ή carbon tax).²

¹Το κοινωνικό κόστος (Social Cost of Carbon, SCC) αναφέρεται στο σήμερα και ορίζεται ως η επιπρόσθετη ζημιά που προκαλείται από επιπλέον εκπομπές του άνθρακα.

²Η τιμή του άνθρακα αναφέρεται στην τιμή της αγοράς του άνθρακα σε ένα καθεστώς ανταλλαγών ή στον φόρο που επιβάλλεται στις εκπομπές σε ένα φορολογικό καθεστώς.

1.	<i>Χωρίς ελέγχους</i>	Χωρίς ελέγχους εκπομπών για τα πρώτα 250 έτη
2.		Χωρίς ελέγχους εκπομπών για τα πρώτα 50 έτη
3.	<i>Βέλτιστη πολιτική</i>	Εκπομπές και τιμές άνθρακα οριοθετημένες στα βέλτιστα επίπεδα της δεύτερης περιόδου 2010-2019
4.	<i>Κλιματικοί περιορισμοί με περιορισμούς στις συγκεντρώσεις CO₂</i>	Συγκεντρώσεις CO ₂ περιορισμένες στο 1,5 × προβιομηχανικό επίπεδο (420ppm)
5.		Συγκεντρώσεις CO ₂ περιορισμένες στο 2 × προβιομηχανικό επίπεδο (560ppm)
6.		Συγκεντρώσεις CO ₂ περιορισμένες στο 2,5 × προβιομηχανικό επίπεδο (700ppm)
7.		Αύξηση θερμοκρασίας περιορισμένη στους 1,5 °C
8.	<i>Κλιματικοί περιορισμοί με περιορισμούς στη θερμοκρασία °C</i>	Αύξηση θερμοκρασίας περιορισμένη στους 2 °C
9.		Αύξηση θερμοκρασίας περιορισμένη στους 2,5 °C
10.		Αύξηση θερμοκρασίας περιορισμένη στους 3 °C
11.	<i>Πρωτόκολλο Kyoto. Διάφορες παραλλαγές του Πρωτοκόλλου.</i>	Αρχικό Πρωτόκολλο με τις Ηνωμένες Πολιτείες
12.		Το Πρωτόκολλο χωρίς τις Ηνωμένες Πολιτείες
13.		Το Πρωτόκολλο με τις Ηνωμένες Πολιτείες και άλλες χώρες
14.	<i>Φιλόδοξες Προτάσεις</i>	Πρόταση στο πνεύμα της κριτικής του Stern. Η συγκεκριμένη πολιτική χρησιμοποιεί το πραγματικό επιτόκιο για τις κλιματικές επενδύσεις και το πραγματικό επιτόκιο για τις υπόλοιπες επενδύσεις
15.		Μείωση εκπομπών κατά Gore. Επιδίωξη μείωσης των εκπομπών στο 90% έως το 2050
16.	<i>Χαμηλού κόστους τεχνολογία backstop</i>	Ανάπτυξη τεχνολογίας ή ενεργειακής πηγής που μπορεί να αντικαταστήσει όλα τα ορυκτά καύσιμα στα τρέχοντα κόστη

Πίνακας 3.1: Σύνοψη περιγραφή των πολιτικών.

Τρέξιμο	Διαφορά από Βάση		Παρούσα Αξία Κλιματικών Ζημιών		Παρούσα Αξία Κόστους Καταπολέμησης		Καθαρά Παρούσα Αξία Κόστους καταπολέμησης συν Κλιματικές Ζημιές		Κοινωνικό Κόστος Άνθρακα		Φόρος Άνθρακα		Παγκόσμια Αλλαγή Θερμοκρασίας	
	Αντικειμενική Συνάρτηση	Καταπολέμηση συν Ζημιές												
Χωρίς ελέγχους														
με καθυστέρηση 250 ετών	0	0	22.55	0.04	22.59	28.1	0	1	3.06	5.3				
με καθυστέρηση 50 ετών	2.34	2.14	18.85	1.6	20.45	27.8	0	203.6	2.72	3.52				
Βέλτιστη	3.37	3.07	17.31	2.2	19.52	27.3	33.8	202.4	2.61	3.45				
Περιορισμός Συνγένεσης														
Περιορισμός 1,5 φορά CO ₂	-14.87	-14.60	9.95	27.24	37.19	144	189.7	761.2	1.61	1.78				
Περιορισμός 2 φορές CO ₂	2.88	2.67	15.97	3.95	19.92	29.2	39.6	445.5	2.48	2.84				
Περιορισμός 2,5 φορές CO ₂	3.37	3.08	17.31	2.2	19.51	27.3	37.1	202.4	2.61	3.45				
Περιορισμός Θερμοκρασίας														
Περιορισμός 1,5 °C	-14.73	-14.44	9.95	27.08	37.03	106.5	140.8	899.1	1.5	1.5				
Περιορισμός 2 °C	-1.60	-1.80	13.09	11.3	24.39	45.3	60.2	863.4	2	2				
Περιορισμός 2,5 °C	2.27	1.99	15.32	5.28	20.6	31.3	42.2	539.5	2.41	2.5				
Περιορισμός 3 °C	3.24	3.02	16.67	2.9	19.57	27.9	37.9	256.7	2.57	2.99				
Πρωτόκολλο Kyoto														
με ης Η.Π.Α.	0.71	0.63	21.38	0.58	21.96	27.8	16.2	11.3	2.94	5.23				
χωρίς ης Η.Π.Α.	0.15	0.1	22.43	0.07	22.49	28.1	1.2	1	3.05	5.29				
ενοχλημένο	1	0.71	16.01	5.87	21.88	27.1	36.2	321.8	2.39	3.26				
Κρατική Στεπ	-16.95	-14.18	9.02	27.74	36.77	23.9	305.2	948.9	1.52	1.27				
Πρόταση Gore	-21.66	-21.36	10.05	33.9	43.96	27.8	56.1	865.2	1.49	1.58				
backstop χαμηλού κόστους	17.19	17.19	4.92	0.48	5.4	19	4.9	4.1	0.9	0.83				

Πίνακας 3.2: Αποτελέσματα DICE-2007 για ης 16 διαφορετικές πολιτικές.

Επιμέλεια: Κωνσταντίνος Τσαρδούνης

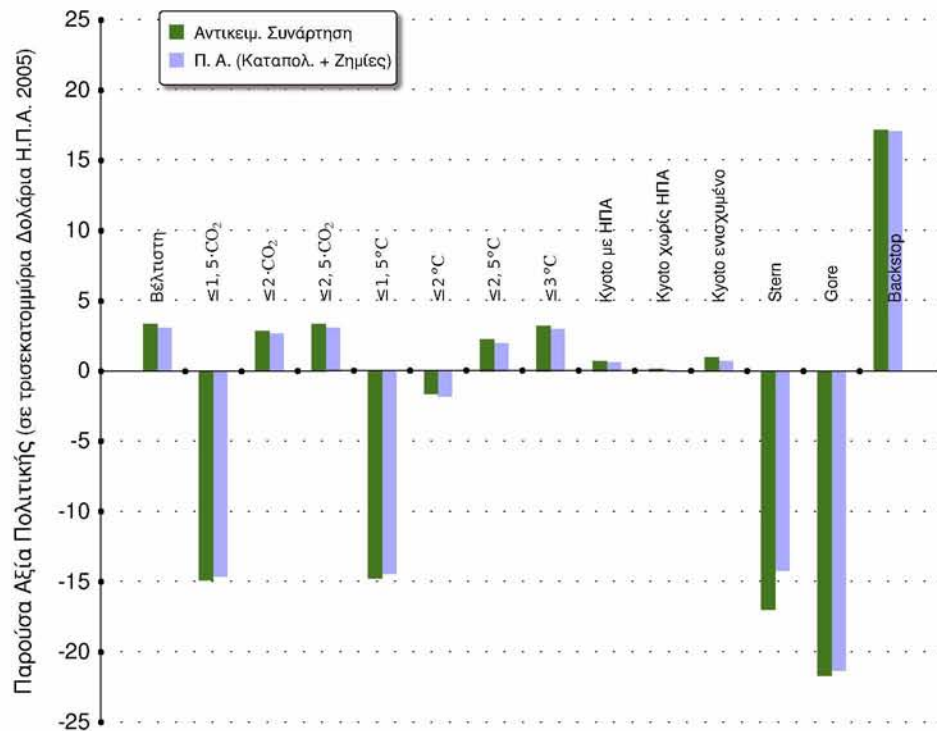
Η άριστη τιμή του άνθρακα ή άριστη τιμή του φόρου είναι αυτή που ισορροπεί τα οριακά κόστη καταπολέμησης των εκπομπών με τα οριακά οφέλη. Σε ένα καθεστώς άνευ ελέγχων το κοινωνικό κόστος θα είναι μεγαλύτερο από την τιμή του άνθρακα. Αντίστοιχα σε ένα άριστο καθεστώς το κοινωνικό κόστος θα είναι ίσο με την τιμή του άνθρακα. Οι δύο τελευταίες στήλες αναφέρονται στη μέση παγκόσμια μεταβολή της θερμοκρασίας το 2100 και το 2200 υπό την επίδραση των εναλλακτικών πολιτικών.

Οι τρεις πολιτικές του πρωτοκόλλου του Κyoto εμφανίζονται ως αναποτελεσματικές. Η τρέχουσα πολιτική δεν έχει καμμία επίδραση στο παγκόσμιο κλίμα ενώ η ενισχυμένη εκδοχή έχει κόστος καταπολέμησης των εκπομπών 2,5 φορές περισσότερο από την άριστη πολιτική. Οι φιλόδοξες προτάσεις είναι εξαιρετικά ακριβές στην εφαρμογή τους αλλά καταφέρνουν να μειώσουν την παγκόσμια θερμοκρασία μεταξύ 1,3 °C και 1,6 °C. Η τεχνολογία χαμηλού κόστους (backstop είναι αρκετά ελκυστική από οικονομικής πλευράς αν και είναι προς το παρόν μη πραγματοποιήσιμη πολιτική.

Στη συνέχεια παρουσιάζεται το καθαρό όφελος (net economic gain) των διαφορετικών πολιτικών σε σύγκριση με την άνευ ελέγχου πολιτική στο Διάγραμμα 3.1 (σελ. 48). Η άριστη πολιτική έχει ουσιαστικά όφελος της τάξης των \$3,4 τρις εκατ. δολάρια. Αν και είναι μεγάλος αριθμός σε απόλυτο μέγεθος, σε ποσοστό αντιστοιχεί σε 0,17 της προεξοφλημένης αξίας (discounted value) του συνολικού μελλοντικού εισοδήματος.

Στον Πίνακα 3.3 (σελ. 49) παρουσιάζεται το επιπρόσθετο κόστος ενός πρόσθετου κλιματικού περιορισμού πάνω από το άριστο επίπεδο του επιπρόσθετου κόστους-οφέλους. Η επιπρόσθετη αυτή επίδραση σχετίζεται με την άριστη πολιτική. Οι μετρήσεις δείχνουν ότι περιορίζοντας τις αυξήσεις της θερμοκρασίας 1,5 °C ή περιορίζοντας τις συγκεντρώσεις του άνθρακα σε 1,5 φορές των προβιομηχανικών επιπέδων είναι δαπανηρό. Η πολιτική περιορισμού των συγκεντρώσεων άνθρακα σε 2,5 φορές των προβιομηχανικών επιπέδων είναι μη δεσμευτική και έτσι είναι όμοια με την άριστη πολιτική.

Ο Πίνακας 3.4 (σελ. 50) δείχνει τα οριακά κόστη και την αναλογία οφέλους-κόστους για κάθε μια μονάδα από τις εναλλακτικές πολιτικές. Κάθε πολιτική με αναλογία οφέλους-κόστους μικρότερης της μονάδας έχει αρνητική καθαρά αξία εν συγκρίσει με την πολιτική άνευ ελέγχων. Οι πολιτικές



Διάγραμμα 3.1: Η Παρούσα Αξία των εναλλακτικών πολιτικών. Η διαφορά στην παρούσα αξία μιας πολιτικής σε σχέση με την πολιτική χωρίς όρους. Η πρώτη στήλη αφορά την αντικειμενική συνάρτηση το 2005 σε δολάρια και η δεύτερη την παρούσα αξία του αθροίσματος του κόστους καταπολέμησης και ζημιών στις ίδιες μονάδες. Η βασική πολιτική προφανώς παραλείπεται επειδή έχει μηδενικές διαφορές παρούσων αξιών

που είναι ακριβές είναι οι φιλόδοξες προτάσεις.

Βασική υπόθεση για να κρίνουμε τις αναλογίες, πάντα κατά Nordhaus (2008), είναι η πλήρης συμμετοχή και η αποτελεσματική εφαρμογή της πολιτικής. Αν δεν εφαρμόζεται αποτελεσματικά τότε τα κόστη θα αυξηθούν με αποτέλεσμα η αναλογία οφέλους-κόστους ακόμη και της άριστης πολιτικής να είναι μικρότερη της μονάδας.

Επίσης ο Πίνακας 3.4 δείχνει την επίδραση των εναλλακτικών πολιτικών στα κόστη και τις ζημιές χωριστά. Παρατηρούμε ότι οι αποτελεσματικές πολιτικές μπορούν να αποφύγουν το λιγότερο 5 τρις εκατ δολάρια σε προεξοφλημένες ζημιές και κόστη λιγότερα από 2,5 τρις εκατ δολάρια. Από την άλλη πλευρά, οι αναποτελεσματικές πολιτικές κοστίζουν 5, 10 ή 30 τρις εκατ.

Επιμέλεια: Κωνσταντίνος Τσαρδούνης

Πολιτική	Επιπρόσθετη Επίδραση σε σχέση με τη Βέλτιστη Πολιτική		
	Παρούσα Αξία Κλιματικών Ζημιών	Παρούσα Αξία Κόστους Καταπολέμησης	Καθαρά Παρούσα Αξία Κόστους καταπολέμησης των Κλιματικών Ζημιών
Τρισεκατομμύρια			
Περιορισμός 1,5 φορές CO ₂	-7.4	25.0	17.7
Περιορισμός 2 φορές CO ₂	-1.3	1.7	0.4
Περιορισμός 2,5 φορές CO ₂	0	0	0
Περιορισμός 1,5 °C	-7.4	24.9	17.5
Περιορισμός 2 °C	-4.2	9.1	4.9
Περιορισμός 2,5 °C	-2.0	3.1	1.1
Περιορισμός 3 °C	-0.6	0.7	0.0

Πίνακας 3.3: Επιπρόσθετα κόστη λόγω πρόσθετων κλιματικών περιορισμών πάνω από το άριστο οικονομικό επίπεδο.

δολάρια περισσότερο από τις αποτελεσματικές πολιτικές.

3.2 Έλεγχοι εκπομπών, το κοινωνικό κόστος του CO₂, και οι τιμές του άνθρακα

Μια από τις πιο σημαντικές μετρήσεις του υποδείγματος DICE-2007 είναι το κοινωνικό κόστος του άνθρακα, δηλαδή η επιπλέον ζημιά που προκαλείται στο κλίμα από ένα επιπρόσθετο τόνο των εκπομπών του διοξειδίου του άνθρακα. Το κοινωνικό κόστος στην περίπτωση της πολιτικής άνευ ελέγχων μας πληροφορεί σχετικά με την μέγιστη αξία που μπορεί να πάρει κάθε πολιτική ελέγχου. Μια μέση πολιτική ελέγχου³ πρέπει να έχει μια τιμή άνθρακα

³Η πολιτική που έχει συμμετοχή λιγότερη από την πολιτική πλήρους συμμετοχής.

Πολιτική	Οφέλη (μειωμένες ζημιές)	Κόστη καταπολέμησης	Λόγος Κόστους - Οφέλους
<i>Χωρίς ελέγχους</i>			
με καθυστέρηση 50 ετών	3.69	1.55	2.4
<i>Βέλτιστη</i>	5.23	2.16	2.4
<i>Περιορισμός Συγκέντρωσης</i>			
Περιορισμός 1,5 φορά CO ₂	12.6	27.2	0.5
Περιορισμός 2 φορές CO ₂	6.57	3.9	1.7
Περιορισμός 2,5 φορές CO ₂	5.24	2.16	2.4
<i>Περιορισμός Θερμοκρασίας</i>			
Περιορισμός 1,5 °C	12.6	27.03	0.5
Περιορισμός 2 °C	9.45	11.25	0.8
Περιορισμός 2,5 °C	7.22	5.24	1.4
Περιορισμός 3 °C	5.88	2.86	2.1
<i>Πρωτόκολλο Kyoto</i>			
με τις Η.Π.Α.	1.17	13.53	0.54
χωρίς τις Η.Π.Α.	0.12	12.5	0.02
ενισχυμένο	6.54	17.63	5.82
<i>Κριτική Stern</i>	27.7	2.2	0.5
<i>Πρόταση Gore</i>	33.86	5	0.4
<i>backstop χαμηλού κόστους</i>	0.44	1.1	39.9

Πίνακας 3.4: Αυξητικά κόστη καταπολέμησης και ζημιές σε σχέση με την άνευ ελέγχων πολιτική καθώς και Λόγους Κόστους-Οφέλους για τις διάφορες πολιτικές.

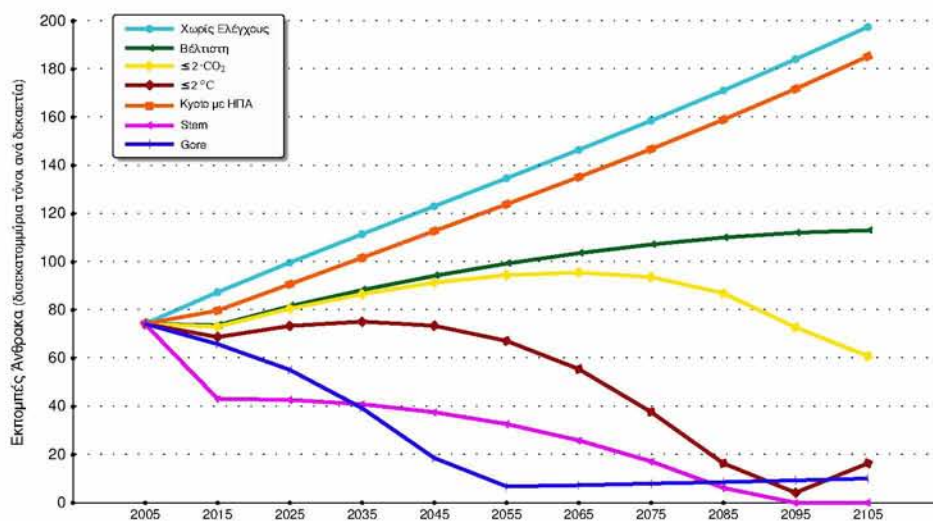
η οποία θα είναι μεγαλύτερη από την άριστη αλλά ποτέ μεγαλύτερη από την τιμή του κοινωνικού κόστους⁴.

Στον Πίνακα 3.5 (σελ. 52) και στο αντίστοιχο Διάγραμμα παρατηρούμε τις τιμές του άνθρακα που σχετίζονται με τις διαφορετικές πολιτικές. Χαρακτη-

⁴Τιμές μεγαλύτερες του κοινωνικού κόστους παρουσιάζουν οι φιλόδοξες προτάσεις.

ριστικό είναι ότι η πολιτική άνευ ελέγχου έχει μια αρχική τιμή (Hotelling rent) ίση με 0,07 ανά τόνο άνθρακα. Πολιτικές που σταθεροποιούν τις συγκεντρώσεις του άνθρακα και το επίπεδο θερμοκρασίας έχουν αρχική τιμή άνθρακα κοντά στις τιμές της άριστης πολιτικής. Οι φόροι αυτοί τείνουν να αυξάνονται απότομα όσο πλησιάζουν τους στόχους.

Στον επόμενο Πίνακα 3.6 (σελ. 53) και στο σχετικό διάγραμμα απεικονίζεται ο ρυθμός ελέγχου εκπομπών από τις διαφορετικές πολιτικές. Δηλαδή απεικονίζεται ο βαθμός καταπολέμησης των εκπομπών κάτω από τα επίπεδα αναφοράς. Χαρακτηριστικό είναι ότι τα πιο σκληρά μέτρα μειώσεων των εκπομπών ξεκινούν με σχετικό χαμηλό ρυθμό ελέγχου των εκπομπών αλλά στη συνέχεια ο ρυθμός αυξάνεται απότομα μεταξύ 25% και 80% μέχρι τα μέσα του αιώνα.



Διάγραμμα 3.2: Παγκόσμιες εκπομπές βιομηχανικού CO₂ για τον επόμενο αιώνα για διάφορες πολιτικές. Η τιμή του 2005 είναι πραγματική τιμή.

	2005	2015	2025	2035	2045	2055	2065	2075	2085	2095	2105
Πολιτική	(2005 δολάρια ΗΠΑ ανά τόνο άνθρακα)										
<i>Χωρίς ελέγχους</i>											
με καθυστέρηση 50 ετών	0.08	0.03	0.04	0.07	0.1	0.15	0.23	0.35	0.53	0.79	1.18
με καθυστέρηση 250 ετών	0.08	0.03	0.04	0.07	0.1	99.31	118.26	139.33	162.82	189.02	218.25
<i>Βέλτιστη</i>	27.28	41.9	53.39	66.49	81.31	98.01	116.78	137.82	161.37	187.68	217.02
<i>Περιορισμός Συγκέντρωσης</i>											
Περιορισμός 1,5 φορά CO ₂	144.04	247.61	421.92	609.52	659.23	695.10	720.73	738.71	750.96	758.88	763.51
Περιορισμός 2 φορές CO ₂	29.24	45.11	58.67	75.18	95.69	121.96	157.06	206.45	280.13	396.87	494.11
Περιορισμός 2,5 φορές CO ₂	27.28	41.9	53.39	66.49	81.31	98.01	116.78	137.82	161.37	187.68	217.02
<i>Περιορισμός Θερμοκρασίας</i>											
Περιορισμός 1,5 °C	106.5	174.68	268.94	410.07	611.49	870.32	1018.38	997.24	818.69	932.67	865.51
Περιορισμός 2 °C	45.3	71.82	102.25	146.01	209.83	303.07	436.46	615.52	817.77	919.77	807.01
Περιορισμός 2,5 °C	31.29	48.48	64.04	83.72	109.15	142.9	188.88	252.76	341.91	463.38	615.68
Περιορισμός 3 °C	27.89	42.89	54.98	69.04	85.38	104.52	127.16	154.4	187.82	229.76	283.55
<i>Πρωτόκολλο Kyoto</i>											
με τις Η.Π.Α.	0.08	15.02	15.72	14.74	13.7	12.95	12.4	11.99	11.67	11.43	11.25
χωρίς τις Η.Π.Α.	0.08	1.56	1.08	0.95	0.93	0.95	0.23	0.35	0.53	0.79	1.18
ενισχυμένο	0.08	19.82	53.15	114.51	181.34	223.05	251.54	275.48	296.34	314.21	329.3
<i>Κριτική Stern</i>	248.98	336.38	408.68	480.24	554.59	633.89	719.59	812.89	915.08	958.01	939.82
<i>Πρόταση Gore</i>	24.99	94.14	264.73	501.28	794.11	948.82	928.56	909.29	890.96	873.52	856.93
<i>Backstop χαμηλού κόστους</i>	5	4.88	4.76	4.65	4.55	4.45	4.35	4.26	4.18	4.09	4.02

Πίνακας 3.5: Φόροι ή Τιμές Άνθρακα για τις Διάφορες Πολιτικές.

	2005	2015	2025	2035	2045	2055	2065	2075	2085	2095	2105
Πολιτική	2005 ΗΠΑ δολάρια ανά τόνο άνθρακα										
<i>Χωρίς ελέγχους</i>											
με καθυστέρηση 50 ετών	0.005	0.003	0.003	0.005	0.006	0.007	0.009	0.012	0.015	0.019	0.024
με καθυστέρηση 250 ετών	0.005	0.003	0.003	0.005	0.006	0.271	0.302	0.335	0.37	0.406	0.444
<i>Βέλτιστη</i>	0.005	0.159	0.185	0.212	0.24	0.269	0.3	0.333	0.368	0.404	0.443
<i>Περιορισμός Συγκέντρωσης</i>											
Περιορισμός 1,5 φορές CO ₂	0.005	0.428	0.583	0.725	0.766	0.799	0.825	0.846	0.864	0.879	0.891
Περιορισμός 2 φορές CO ₂	0.005	0.166	0.195	0.227	0.262	0.304	0.354	0.417	0.500	0.613	0.7
Περιορισμός 2,5 φορές CO ₂	0.005	0.159	0.185	0.212	0.24	0.269	0.3	0.333	0.368	0.404	0.443
<i>Περιορισμός Θερμοκρασίας</i>											
Περιορισμός 1,5 °C	0.005	0.352	0.454	0.581	0.735	0.905	1	1	0.906	0.985	0.955
Περιορισμός 2 °C	0.005	0.215	0.265	0.328	0.406	0.504	0.625	0.765	0.906	0.978	0.919
Περιορισμός 2,5 °C	0.005	0.173	0.205	0.24	0.282	0.332	0.392	0.466	0.558	0.668	0.791
Περιορισμός 3 °C	0.005	0.162	0.188	0.216	0.246	0.315	0.355	0.4	0.452	0.514	0.279
<i>Πρωτόκολλο Kyoto</i>											
με τις Η.Π.Α.	0.005	0.09	0.094	0.092	0.089	0.087	0.086	0.086	0.085	0.085	0.086
χωρίς τις Η.Π.Α.	0.005	0.026	0.021	0.02	0.02	0.02	0.009	0.012	0.015	0.019	0.024
ενισχυμένο	0.005	0.105	0.184	0.284	0.374	0.46	0.489	0.515	0.538	0.556	0.425
<i>Κριτική Stern</i>	0.423	0.507	0.573	0.635	0.696	0.825	0.893	0.964	1	1	0.759
<i>Πρόταση Gore</i>	0.005	0.25	0.45	0.65	0.85	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95
<i>backstop χαμηλού κόστους</i>	0.105	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

Πίνακας 3.6: Ρυθμοί Ελέγχου Εκπομπών για τις Διάφορες Πολιτικές

3.3 Εκπομπές, συγκεντρώσεις CO₂ και κλιματική αλλαγή

3.3.1 Εκπομπές CO₂

Ο Πίνακας 3.7 και το αντίστοιχο Διάγραμμα 3.2 απεικονίζει τις συνολικές εκπομπές CO₂ ανά δεκαετία. Υπό την πολιτική άνευ ελέγχων, οι προβλέψεις για τα επίπεδα των εκπομπών CO₂ του υποδείγματος DICE-2007 δείχνουν ότι συνεχίζουν να αυξάνονται ταχύτατα τις επόμενες δεκαετίες φτάνοντας τα 19 εκ τόνους άνθρακα το χρόνο, το 2100. Στην περίπτωση της άριστης πολιτικής οι εκπομπές περιορίζονται σε 12,5 γιγατόνους άνθρακα το χρόνο, το έτος 2100.

3.3.2 Συγκεντρώσεις CO₂

Οι συγκεντρώσεις CO₂ της ατμόσφαιρας παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.8 και στο Διάγραμμα 3.3. Ξεκινώντας από συγκέντρωση εκπομπών της τάξης των 380ppm το έτος 2005 υπό την πολιτική άνευ ελέγχων και φτάνοντας μέχρι 1.183ppm το έτος 2200. Στην περίπτωση της άριστης πολιτικής οι συγκεντρώσεις CO₂ περιορίζονται σε 659ppm το 2200. Παρατηρώντας τα αποτελέσματα συμπεραίνουμε ότι οι διαφορές στις συγκεντρώσεις CO₂ των εκάστοτε πολιτικών αρχίζουν να γίνονται εμφανείς μετά το 2050.

3.3.3 Αύξηση της θερμοκρασίας

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα σχετικά με την αύξηση της θερμοκρασίας που παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.9 και στο Διάγραμμα 3.4). Παρατηρούμε ότι εκτός από τις φιλόδοξες προτάσεις οι υπόλοιπες πολιτικές δεν διαφέρουν πολύ μέχρι τα μέσα του 21ου αιώνα. Μετά το 2050 υπάρχει μία τάση καθοδικής πορείας για τις πολιτικές περιορισμού των συγκεντρώσεων και της θερμοκρασίας με πιο έντονη καθοδική τροχιά να παρουσιάζουν οι φιλόδοξες προτάσεις. Η άνευ ελέγχων πολιτική κάνει τις πιο απαισιόδοξες προβλέψεις και στην συνέχεια ακολουθεί η άριστη πολιτική με προβλεπόμενη αύξηση σε 2,61 °C μέχρι το 2100 και σε 3,45 °C μέχρι το 2200.

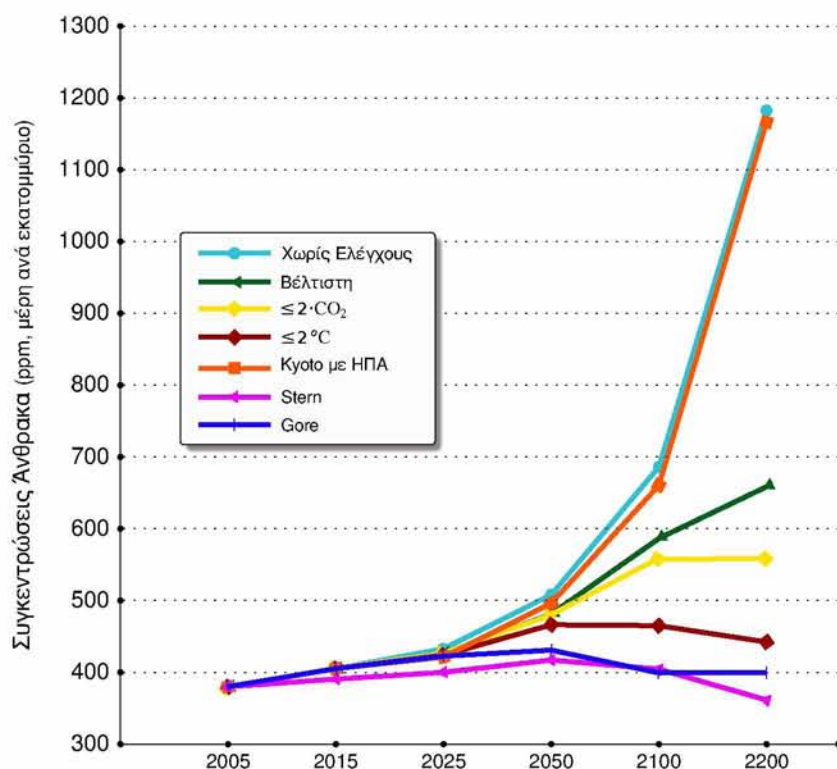
Επιμέλεια: Κωνσταντίνος Τσαρδούνης

	2005	2015	2025	2035	2045	2055	2065	2075	2085	2095	2105
Πολιτική	2005 ΗΠΑ δολάρια ανά τόνο άνθρακα										
<i>Χωρίς ελέγχους</i>											
με καθυστέρηση 50 ετών	74.3	87.4	99.7	111.5	123.1	134.7	146.5	158.6	171.1	184.1	197.5
με καθυστέρηση 250 ετών	74.3	87.5	99.7	111.5	123.1	99	103.3	106.8	109.7	111.7	112.8
<i>Βέλτιστη</i>	74.3	73.7	81.6	88.3	94.2	99.3	103.6	107.2	110.1	112.1	113.1
<i>Περιορισμός Συγκέντρωσης</i>											
Περιορισμός 1,5 φορές CO ₂	74.3	50.1	41.6	30.7	28.7	27	25.6	24.5	23.5	22.7	22
Περιορισμός 2 φορές CO ₂	74.3	73.1	80.6	86.6	91.4	94.5	95.6	93.7	87	72.8	60.9
Περιορισμός 2,5 φορές CO ₂	74.3	73.7	81.6	88.3	94.2	99.3	103.6	107.2	110.1	112.1	113.1
<i>Περιορισμός Θερμοκρασίας</i>											
Περιορισμός 1,5 °C	74.3	56.7	54.5	46.8	32.7	12.8	16.1	2.8	9	0	0
Περιορισμός 2 °C	74.3	68.8	73.4	75.2	73.5	67.2	16.4	4.2	16.4	55.5	37.7
Περιορισμός 2,5 °C	74.3	72.5	79.6	85.1	88.9	90.7	89.9	85.7	76.9	62.4	42.5
Περιορισμός 3 °C	74.3	73.5	81.3	87.8	93.4	97.9	101.4	103.7	104.4	103	98.7
<i>Πρωτόκολλο Kyoto</i>											
με τις Η.Π.Α.	74.3	79.8	90.7	101.7	112.8	123.9	135.2	146.8	159	171.8	185.3
χωρίς τις Η.Π.Α.	74.3	85.4	97.9	109.8	121.3	132.9	146.5	158.6	171.7	184.1	197.5
ενισχυμένο	74.3	78.5	81.6	80	77.6	78.1	80	82	84.3	86.8	89.6
<i>Κριτική Stern</i>	43.1	43.2	42.7	40.9	37.6	32.7	25.9	17.2	6.2	0	0
<i>Πρόταση Gore</i>	74.3	65.9	55.2	39.3	18.6	6.8	7.3	8	8.6	9.3	10.1
<i>backstop χαμηλού κόστους</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

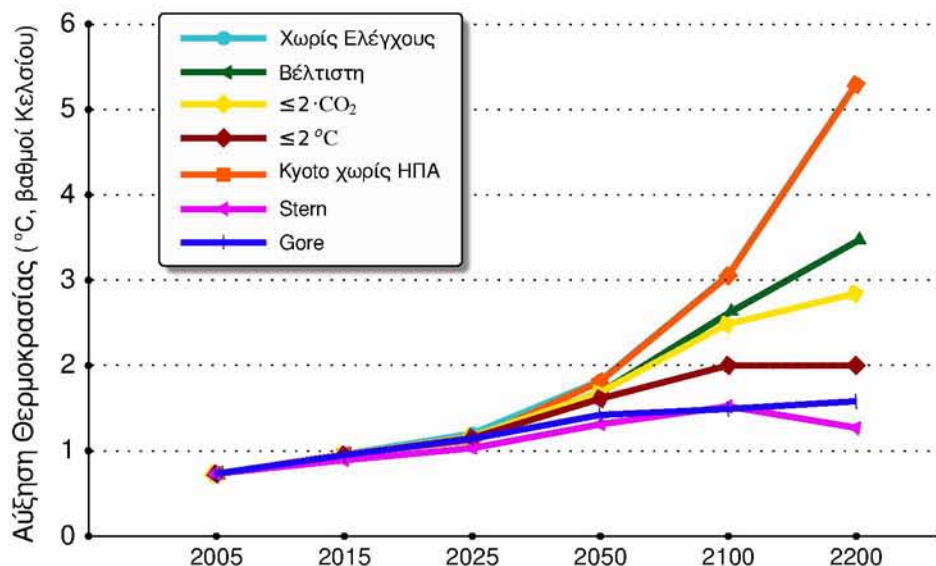
Πίνακας 3.7: Παγκόσμιες Εκπομπές Βιομηχανικού CO₂.

	2005	2015	2025	2050	2100	2200
Πολιτική	2005 ΗΠΑ δολάρια ανά τόνο άνθρακα					
<i>Χωρίς ελέγχους</i>						
με καθυστέρηση 50 ετών	379.8	405.2	432.7	507.9	685.9	1182.6
με καθυστέρηση 250 ετών	379.8	405.2	432.7	507.9	602.9	667.6
<i>Βέλτιστη</i>	379.8	405.2	426.2	480.9	586.4	658.5
<i>Περιορισμός Συγκέντρωσης</i>						
Περιορισμός 1,5 φορά CO ₂	379.8	405.2	415.1	420.2	420.2	420.2
Περιορισμός 2 φορές CO ₂	379.8	405.2	425.9	479	557.8	558
Περιορισμός 2,5 φορές CO ₂	379.8	405.2	426.2	480.9	586.4	658.5
<i>Περιορισμός Θερμοκρασίας</i>						
Περιορισμός 1,5 °C	379.8	405.2	418.2	434.4	400.4	388.2
Περιορισμός 2 °C	379.8	405.2	423.9	466.2	464.9	442.2
Περιορισμός 2,5 °C	379.8	405.2	425.7	477.3	544.4	504.6
Περιορισμός 3 °C	379.8	405.2	426.1	480.4	579.3	575.7
<i>Πρωτόκολλο Kyoto</i>						
με τις Η.Π.Α.	379.8	405.2	429.1	496	660.3	1166.2
χωρίς τις Η.Π.Α.	379.8	405.2	431.7	505.6	684	1181.5
ενισχυμένο	379.8	405.2	428.5	474.9	543.8	629.2
<i>Κριτική Stern</i>	379.8	390.5	400	417	404.4	361.2
<i>Πρόταση Gore</i>	379.8	405.2	422.5	430.9	399.2	399.4
<i>backstop χαμηλού κόστους</i>	379.8	370.3	363.3	352.2	340.3	325.2

Πίνακας 3.8: Συγκεντρώσεις CO₂ στην ατμόσφαιρα.



Διάγραμμα 3.3: Οι διαφορετικές συγκεντρώσεις CO_2 για διαφορετικές πολιτικές για τους επόμενες δύο αιώνες. Η τιμή του 2005 είναι πραγματική τιμή.



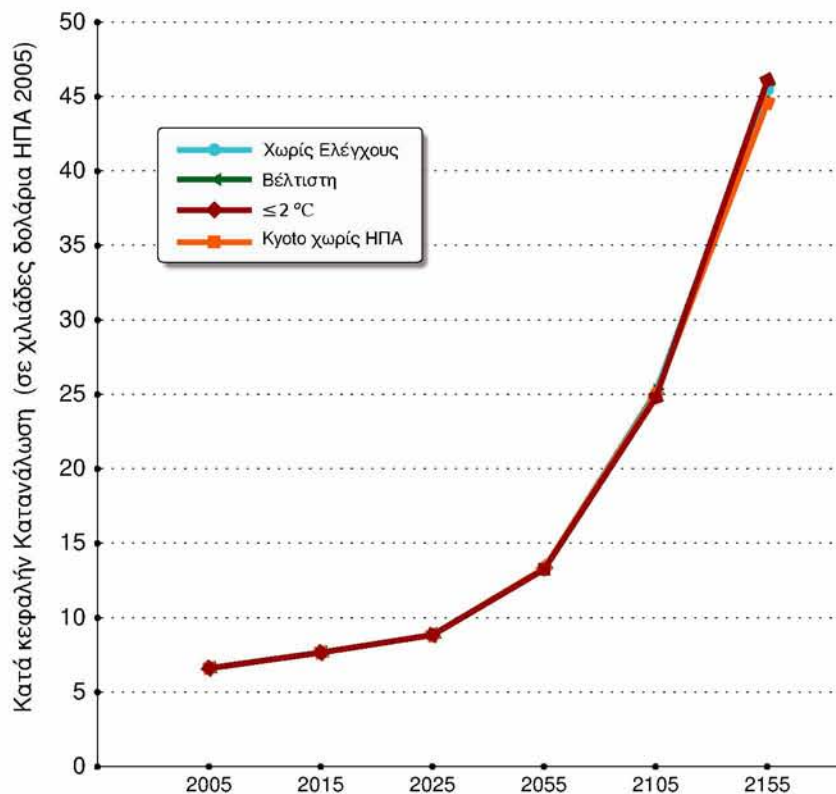
Διάγραμμα 3.4: Αύξηση της θερμοκρασίας

	2005	2015	2025	2050	2100	2200
Πολιτική	2005 ΗΠΑ δολάρια ανά τόνο άνθρακα					
<i>Χωρίς ελέγχους</i>						
με καθυστέρηση 50 ετών	0.73	0.96	1.2	1.82	3.06	5.3
με καθυστέρηση 250 ετών	0.73	0.96	1.2	1.81	2.72	3.52
<i>Βέλτιστη</i>	0.73	0.95	1.17	1.68	2.61	3.45
<i>Περιορισμός Συγκέντρωσης</i>						
Περιορισμός 1,5 φορά CO ₂	0.73	0.94	1.1	1.36	1.61	1.78
Περιορισμός 2 φορές CO ₂	0.73	0.95	1.16	1.67	2.48	2.84
Περιορισμός 2,5 φορές CO ₂	0.73	0.95	1.17	1.68	2.61	3.45
<i>Περιορισμός Θερμοκρασίας</i>						
Περιορισμός 1,5 °C	0.73	0.94	1.12	1.43	1.5	1.5
Περιορισμός 2 °C	0.73	0.95	1.15	1.61	2	2
Περιορισμός 2,5 °C	0.73	0.95	1.16	1.66	2.41	2.5
Περιορισμός 3 °C	0.73	0.95	1.17	1.68	2.57	2.99
<i>Πρωτόκολλο Kyoto</i>						
με τις Η.Π.Α.	0.73	0.96	1.18	1.76	2.94	5.23
χωρίς τις Η.Π.Α.	0.73	0.96	1.2	1.81	3.05	5.29
ενισχυμένο	0.73	0.95	1.17	1.66	2.39	3.26
<i>Κριτική Stern</i>	0.73	0.89	1.03	1.31	1.52	1.27
<i>Πρόταση Gore</i>	0.73	0.95	1.14	1.42	1.49	1.58
<i>backstop χαμηλού κόστους</i>	0.73	0.8	0.84	0.86	0.9	0.83

Πίνακας 3.9: Αύξηση Θερμοκρασίας.

3.4 Άλλες οικονομικές μεταβλητές

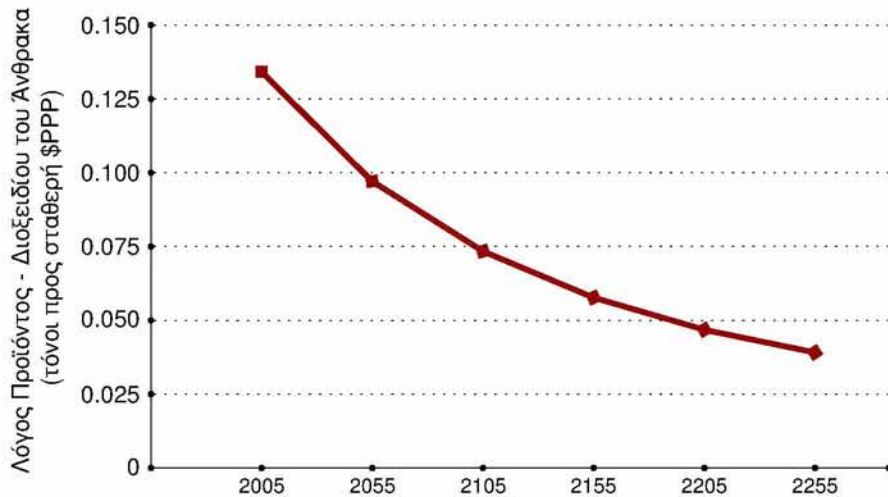
Το υπόδειγμα περιλαμβάνει πολλές οικονομικές και περιβαλλοντικές μεταβλητές που αποτελούν μέρος της ανάλυσης της ολοκληρωμένης αποτίμησης (integrated assessment analysis). Στο Διάγραμμα 3.5 εμφανίζεται η κατά κεφαλήν κατανάλωση. Το υπόδειγμα υποθέτει συνεχόμενη οικονομική ανάπτυξη τα επόμενα χρόνια. Η πρόβλεψη του υποδείγματος για την περίοδο 2005–2105 είναι της τάξης του 1.3% το χρόνο. Ως επακόλουθο της ανάπτυξης αυτής είναι η αύξηση των εκπομπών αλλά και του επιπέδου διαβίωσης.



Διάγραμμα 3.5: Κατά κεφαλήν κατανάλωση για 4 πολιτικές. Η προβολή της τάσης της κατά κεφαλήν κατανάλωσης είναι έντονα αυξητική στο DICE-2007 και για όλες τις πολιτικές σχεδόν ταυτόσημη.

Στο Διάγραμμα 3.6 παρουσιάζεται η προβλεπόμενη αναλογία άνθρακα-παραγωγής. Την περίοδο του 1965–2005 η εκτίμηση της μείωσης της αναλογίας (πάντα κατά τον Nordhaus (2008)) ήταν της τάξης του 1,7% το χρόνο.

Οι προβλέψεις για την επόμενη περίοδο δείχνουν μία μείωση της αναλογίας CO_2 -GDP σε ποσοστό 0.6% το χρόνο. Αυτό οφείλεται περισσότερο στο αυξανόμενο μερίδιο παραγωγής των αναπτυσσόμενων χωρών όπως η Κίνα. Αυτό έχει σημαντικές συνέπειες στο πρωτόκολλο του Κyoto κατά το οποίο τίθενται περιορισμοί μόνο στις χώρες τις ήδη αναπτυγμένες.



Διάγραμμα 3.6: Παραγωγή άνθρακα στην παγκόσμια παραγωγή.

Συμπεράσματα και Προτάσεις για Περαιτέρω Έρευνα

Η εργασία αναπαρήγαγε το ολοκληρωμένο υπόδειγμα αποτίμησης για το κλίμα και την οικονομία DICE-2007.

Το κυριότερο αποτέλεσμα του DICE-2007 είναι πως οι εκπομπές CO₂ από 7,4 δισεκατομμύρια τόνους άνθρακα ανά έτος το 2005 θα ανεβούν στα 19 δισεκατομμύρια τόνους ανά έτος. Ακόμη, η συγκέντρωση του CO₂ από 280 μέρη στο εκατομμύριο (parts per million, ppm) στην προβιομηχανική εποχή και 380ppm το 2005 θα αυξηθεί στα 685ppm το 2100. Η μέση παγκόσμια επιφανειακή θερμοκρασία το 2100 αναμένεται να αυξηθεί κατά 2,4 °C, ενώ από το 1900 ως το 2005 σημείωσε αύξηση μόλις 0,7 °C (Nordhaus (2008)). Αν και η περαιτέρω εκτίμηση υπόκειται σε τεράστια αβεβαιότητα, το 2200 η διαφορά της θερμοκρασίας από το 1900 αναμένεται, σύμφωνα με το DICE-2007, στους 5,3 °C. Το τελευταίο οδηγεί σε αύξηση στις ζημιές οφειλόμενες στην κλιματική αλλαγή από 3% του παγκόσμιου προϊόντος το 2100 σε 8% το 2200.

Οι εκτιμήσεις του DICE-2007 δίνουν πως η βέλτιστη πολιτική καταπολέμησης των εκπομπών CO₂ καταφέρνει 15% μείωση την πρώτη περίοδο, 25% ως το 2050 και 45% ως το 2100. Έτσι η διαφορά της θερμοκρασίας από το 1900 ως το 2200 θα είναι μικρότερη και θα ανέρχεται στους 3,4 °C, ενώ το 2100 από 3,1 στους 2,6 °C.

Το κόστος αυτής της αποτελεσματικής πολιτικής καταπολέμησης της κλιματικής αλλαγής είναι σχετικά φθηνό και θα είχε δραστική μείωση στη μακροχρόνια θερμοκρασία του πλανήτη. Η καθαρά παρούσα αξία των οφελών

είναι 3 τρισεκατομμύρια δολάρια Η.Π.Α. που προκύπτει από 2 τρισεκατομμύρια δολάρια που απαιτούνται για το κόστος της καταπολέμησης της αλλαγής (abatement cost) και 5 τρισεκατομμύρια από τις μειωμένες κλιματικές ζημιές. Ακόμη και με αυτήν την πολιτική η κλιματική ζημία θα ανέρχεται σε 17 τρισεκατομμύρια δολάρια Η.Π.Α..

Μελλοντικές προεκτάσεις της εργασίας είναι η αναπαραγωγή άλλων μοντέλων ολοκληρωμένης αποτίμησης καθώς και πιθανός συνδυασμός των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών του καθενός στη δημιουργία ενός νέου μοντέλου ολοκληρωμένης αποτίμησης.

Ακόμη, θα μπορούσαν να συμπεριληφθούν αέρια εκτός του διοξειδίου του άνθρακα (όπως οργανοαλογόνα) που είναι πιο ικανά στην παγίδευση της θερμότητας στην ατμόσφαιρα (Halkos (2010)).

Βιβλιογραφία

- Abadie, I. J. & Carpentier, J. (1969). Generalization of the wolfe reduced gradient method to the case of nonlinear constraints. In *Optimization*, London. Academic Press.
- Avriel, I. M. (1976). *Nonlinear Programming: Methods and Analysis*. Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice-Hall, Inc.
- Bailey, I. P., Gough, C., Chadwick, M., & McGranahan, G. (1996). *Methods for Integrated Environmental Assessment: Research Directions for the European Union*. Stockholm Environment Institute (SEI).
- Bosetti, I. V., Carraro, C., & Galeotti, M. (2006). The dynamics of carbon and energy intensity in a model of endogenous technical change. *Energy Journal, Endogenous Technological Changes and the Economics of Atmospheric Stabilization Special Issue*.
- Bosetti, I. V., Massetti, E., & Tavoni, M. (2007). The witch model: structure, baseline and solutions. *Nota di Lavoro*, **10**.
- Bryant, I. E. (1997). *Climate Process and Change*. Cambridge University Press.
- Buchner, I. B., Carraro, C., Cersosimo, I., & Marchiori, C. (2005). Back to kyoto? us participation and the linkage between r&d and climate coope-

- ration. In *The Coupling of Climate and Economic Dynamics*, Amsterdam. Springer.
- Burniaux, I. J.-M. & Truong, T. P. (2002). Gtap-e: An energy-environmental version of the gtap model. *GTAP Technical Paper*, (16).
- Changjoo, I. K., Csatho, B., Thomas, R., & van der Veen, C. J. (2000). Studying and monitoring the greenland ice sheet using gis techniques. In *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, volume **B7 – XXXIII**, Amsterdam. ISPRS Foundation.
- Committee on Abrupt Climate Change, Board, O. S., Board, P. R., on Atmospheric Sciences, B., Climate, on Earth, D., Studies, L., & Council, N. R. (2002). *Abrupt Climate Change*. Washington, D.C.: National Academy Press.
- Dowlatabadi, I. H. (1998). Sensitivity of climate change mitigation estimates to assumptions about technical change. *Energy Economics*, **20**(5), 473–493.
- Edenhofer, I. O., Bauer, N., & Kriegler, E. (2005). The impact of technological change on climate protection and welfare: insights from the model mind. *Ecological Economics*, **54**, 277–292.
- Edenhofer, I. O., Lessmann, K., & Bauer, N. (2006). Mitigation strategies and costs of climate protection: the effects of etc in the hybrid model mind. *Energy Journal, Endogenous Technological Changes and the Economics of Atmospheric Stabilization Special Issue*.
- Edwards, I. N., Grepin, H., Haurie, A., & Viguier, L. (2005). Linking climate and economic dynamics. In Haurie, A. & Viguier, L. (Eds.), *The Coupling of Climate and Economic Dynamics: Essays on Integrated Assessment*, Amsterdam. Springer.
- Gentner, I. D. R., Mille, A. M., & Goldstein, A. H. (2010). Seasonal variability in anthropogenic halocarbon emissions. *Environmental Science & Technology*, **44**(14), 5377–5382.

- Halkos, I. G. (2010). Construction of abatement cost curves: The case of f-gases. *Munich Personal RePEc Archive*.
- Hicks, I. J. R. (1968). *The Theory of Wages*. St. Martins Press.
- Hotelling, I. H. (1931). The economics of exhaustible resources. *Journal of Political Economy*, **39**, 137–175.
- Huwald, I. H., Higgins, C. W., Boldi, M. O., Bou-Zeid, E., Lehning, M., & Parlange, M. B. (2009). Albedo effect on radiative errors in air temperature measurements. *Water Resources Research*, **45**(W08431), 1–13.
- IPCC, I. I. P. o. C. C. (2007). Climate change 2007: The physical science basis. In Ed. Bert Metz, Ogunlade Davidson, Peter Bosch, Rutu Dave, and Leo Meyer. *Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*.
- Kasemir, I. B., Jaeger, C. C., & Dürrenberger, G. (1996). Embedding integrated assessment models in social discourse. *Science and Public Policy*, **23**(2), 124–125.
- Kelly, I. D. L. & Kolstad, C. D. (1999). Integrated assessment models for climate change control. In *International Yearbook of Environmental and Resource Economics 1999/2000: A Survey of Current Issues*, Cheltenham, UK. Edward Elgar.
- MAGGIC: Model for the Assessment of Greenhouse-Gas Induced Climate Change (2007). developed by Tom Wigley, Sarah Raper, Mike Salmon and Tim Osborn.
- Manne, I. 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.
- NASA Science (2000). Retreat of the west antarctic ice sheet.
- Nordhaus, I. W. (1973). The allocation of energy reserves. *Brookings Papers*, **3**, 529–570.

- Nordhaus, I. W. (2008). *A Question of Balance: Weighting the Options on Global Warming Policies*. Yale University Press, New Haven & London.
- Nordhaus, I. W. D. (1994). *Managing the Global Commons: The Economics of Climate Change*. Cambridge: MIT Press.
- Nordhaus, I. W. D. & Yang, Z. (1996). A regional dynamic general-equilibrium model of alternative climate change strategies. *American Economic Review*, (886), 741–765.
- Oppenheimer, I. M. & Alley, R. B. (2004). The west antarctic ice sheet and long term climate policy. *Climatic Change*, **64**, 1–10.
- Ortiz, I. R. A. & Markandya, A. (2009). Integrated impact assessment models of climate change with an emphasis on damage functions: a literature review. *BC3 WORKING PAPER SERIES*, (06).
- Parson, I. E. A. (1994). Searching for integrated assessment: A preliminary investigation of methods and projects in the integrated assessment of global climatic change. In *3rd meeting of the CIESIN-Harvard Commission on Global Environmental Change Information Policy*, NASA Headquarters.
- Pike, I. R. W. (2001). *Optimization for Engineering Systems*. Louisiana State University.
- Popp, I. D. (2006). Comparison of climate policies in the entice-br model. *Energy Journal, Endogenous Technological Changes and the Economics of Atmospheric Stabilization Special Issue*.
- Prell, I. M. A. (1996). Backstop technology and growth: Doomsday or steady state? *Journal of Environmental Economics and Management*, **30**(2), 254 – 264.
- Rotmans, I. J. & Dowlatabadi, H. (1995). Integrated assessment of climate change: Evaluation of methods and strategies. S. Rayner and J. Emonds (eds.) *State of the Art report*.

- Sluijs, I. J. v. d. (1996). Integrated assessment models and the management of uncertainties.
- Stanton, I. E. A., Ackerman, F., & Kartha, S. (2008). Inside integrated assessment models: four issues in climate economics. *Stockholm Environment Institute Working Paper*, WP-US-0801.
- Strassmann, I. K., Plattner, G. K., & Joos, F. (2009). CO₂ and non-CO₂ radiative forcings in climate projections for twenty-first century mitigation scenarios. *Climate Dynamics*, **33**, 737–749. 10.1007/s00382-008-0505-4.
- Swart, I. R. (1994). *Climate Change: Managing the Risks (Thesis)*. Amsterdam: Free University.
- Toth, I. F. L. (1995). Practice and progress in integrated assessments of climate change, a workshop overview. *Energy Policy*, **23**(4/5), 253–267.
- Toth, I. F. L. (2005). Coupling climate and economic dynamics: recent achievements and unresolved problems. In *The Coupling of Climate and Economic Dynamics: Essays on Integrated Assessment*. Springer.
- Wake, I. L. M., Huybrechts, P., Box, J. E., Hanna, E., Janssens, I., & Milne, G. A. (2009). Surface mass-balance changes of the greenland ice sheet since 1866. *Annals of Glaciology*, **50**(50), 189–187.
- wikipedia.org (2009). Climatic research unit email controversy.
- Wilde, I. D. J. & Beightler, C. S. (1967). *Foundations of Optimization*. Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice-Hall, Inc.
- Wolfe, I. P. (1963). Methods of nonlinear programming in recent advances. In *Mathematical Programming*, New York. McGraw - Hill Book Company.