



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ ΚΑΙ
ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΠΟΦΑΣΕΩΝ

Μοντελοποίηση των επιπτώσεων μιας πράσινης μετάβασης του
Πολωνικού ενεργειακού συστήματος

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Σταυρούλα Ι. Καγιαμανίδου

Επιβλέπων: Χ. Δούκας
Επίκουρος Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Οκτώβριος 2018



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ ΚΑΙ
ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΠΟΦΑΣΕΩΝ

Μοντελοποίηση των επιπτώσεων μιας πράσινης μετάβασης του
Πολωνικού ενεργειακού συστήματος

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Σταυρούλα Ι. Καγιαμανίδου

Επιβλέπων: Χ. Δούκας

Επίκουρος Καθηγητής ΕΜΠ

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 18^η Οκτωβρίου 2018.

.....

Δημήτριος Ασκούνης

.....

Ιωάννης Ψαρράς

.....

Χρυσόστομος Δούκας

Αθήνα, Οκτώβριος 2018

Σταυρούλα Ι. Καγιαμανίδου

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

Copyright © Σταυρούλα Ι. Καγιαμανίδου, 2018

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

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

Περίληψη

Στην Πολωνία, ο άνθρακας υπήρξε βασικός μοχλός οικονομικής ανάπτυξης και ενεργειακής ασφάλειας και, παρά την σταδιακά πτωτική χρήση του, εξακολουθεί να αποτελεί το μεγαλύτερο μέρος του μείγματος ηλεκτροπαραγωγής της χώρας. Η δυναμική μετάβασης για το Πολωνικό ενεργειακό σύστημα που βασίζεται σε ορυκτά καύσιμα μπορεί να αποτυπωθεί σε μια έντονη διαμάχη ανάμεσα σε μια διαδικασία σταδιακής απαγκίστρωσης από τον άνθρακα με στόχο τη μείωση των εκπομπών, και σε μια πιο φιλόδοξη πορεία που βασίζεται στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Και οι δύο οδοί παρουσιάζουν εμπόδια. Μερικά είναι προφανή μέσα από μία τυπική οικονομική ανάλυση, ενώ άλλα απαιτούν επιπρόσθετες μεθόδους για να εντοπιστούν. Στην παρούσα διπλωματική εργασία, χρησιμοποιούμε ένα ενεργειακό μοντέλο, για να προσδιορίσουμε το βέλτιστο ενεργειακό μείγμα για τα δύο μονοπάτια, και ένα δυναμικό στοχαστικό μοντέλο γενικής ισορροπίας για να αξιολογήσουμε τις κοινωνικοοικονομικές επιπτώσεις αυτών. Στη συνέχεια, χρησιμοποιούμε ασαφείς γνωστικούς χάρτες για να διερευνήσουμε την προτίμηση των ενδιαφερόμενων μερών ανάμεσα στις δύο δράσεις και να αναγνωρίσουμε τα παραλειπόμενα κανάλια κινδύνου που σχετίζονται με αμφότερες τις διαδρομές. Τέλος, με βάση τα νέα ευρήματα, επαναλαμβάνουμε τις αναλύσεις προσομοίωσης και αξιολογούμε τις κοινωνικοοικονομικές επιπτώσεις ορισμένων από τα νέα κανάλια κινδύνου που απειλούν τα υπό εξέταση μονοπάτια.

Λέξεις κλειδιά

Πολωνία, κίνδυνοι και αβεβαιότητες, ενεργειακή μετάβαση, κοινωνίες χαμηλών εκπομπών άνθρακα, οικονομική ανάλυση, ασαφείς γνωστικοί χάρτες, ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, μοντελοποίηση

Abstract

In Poland, coal has been a key driver of economic wealth and energy security and, despite its role declining lately, still makes up most of the country's power generation mix. Transition potential for the fossil fuel-based power sector can be reflected in a heated debate between a slow process of gradually reducing emissions, while insisting on coal; and a more ambitious pathway that is driven by the diffusion of renewables. Both routes feature barriers, most of which can be identified by means of standard economic analyses, while others cannot. Here, we use an energy system model to identify the optimal energy mix for each of the two pathways, which is further coupled with a macroeconomic model to assess socioeconomic implications of these pathways. Based on fuzzy cognitive maps, we then explore which agenda stakeholders favor, and identify omitted risk channels associated with both pathways. Finally, based on the new findings, we rerun the modeling simulations and assess the socioeconomic implications of some of the identified risk channels.

Keywords

Poland, risk and uncertainty, energy transition, decarbonisation, macroeconomic analysis, fuzzy cognitive maps, climate change, renewable energy sources

Πρόλογος

Η παρούσα διπλωματική εκπονήθηκε στον Τομέα Ηλεκτρικών Βιομηχανικών Διατάξεων και Συστημάτων Αποφάσεων της σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του ΕΜΠ.

Με την ολοκλήρωσή της, έχω την ανάγκη να ευχαριστήσω θερμά τον καθηγητή, κ. Χάρη Δούκα, για την επίβλεψη της εργασίας καθώς και για την ευκαιρία που μου έδωσε να ασχοληθώ με ένα τόσο επίκαιρο και ενδιαφέρον θέμα. Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω ιδιαιτέρως τον Αλέξανδρο Νίκα, υποψήφιο διδάκτωρ του εργαστηρίου Συστημάτων Αποφάσεων, για την άψογη συνεργασία μας, τις εποικοδομητικές και αναγκαίες συμβουλές του και τη συνεχή καθοδήγηση του καθ'όλη τη διάρκεια εκπόνησης της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Ακόμη, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους φίλους μου, οι οποίοι με στήριξαν κάθε φορά που το χρειαζόμουν και μοιράστηκαν μαζί μου αξέχαστες στιγμές.

Τέλος, οι θερμότερες ευχαριστίες ανήκουν στην οικογένειά μου, για την υπομονή και τη συμπαράστασή τους. Η έμπρακτη αγάπη τους ήταν καθοριστική για την επιτυχία της προσπάθειάς μου.

Περιεχόμενα

Περίληψη	iii
Λέξεις κλειδιά.....	iii
Abstract	v
Keywords.....	v
Πρόλογος.....	vii
Περιεχόμενα.....	ix
Λίστα Σχημάτων	xi
Λίστα Πινάκων	xiii
Ορολογίες-Συντομογραφίες	xiv
1 Εισαγωγή.....	15
1.1 Αντικειμενικός σκοπός και στόχοι	15
1.2 Δομή της εργασίας.....	5
2 Μέθοδοι & Εργαλεία	7
2.1 MacroEconomic Mitigation Options model (MEMO)	7
2.1.1 Μοντέλα γενικής ισορροπίας	7
2.1.2 Το μοντέλο MEMO	11
2.1.3 Περιορισμοί μοντέλου	12
2.2 Model of Optimal Energy Mix (MOEM)	13
2.2.1 Μοντέλα ενεργειακών συστημάτων.....	13
2.2.2 Το μοντέλο MOEM	16
2.2.3 Περιορισμοί.....	17
2.3 Ενσωμάτωση των δύο μοντέλων	17
2.4 Ασαφείς γνωστικοί χάρτες	18
3 Κλασσική Οικονομική Ανάλυση.....	23
3.1 Βασικές έννοιες.....	23
3.2 Εύρεση του βέλτιστου ενεργειακού μείγματος.....	24
3.2.1 Βασική γραμμή Δράσης	24
3.2.2 Πλήρης απεξάρτηση από τον άνθρακα	25
3.3 Μακροοικονομική Ανάλυση Γενικής Ισορροπίας.....	29
3.4 Πλεονεκτήματα και περιορισμοί της κλασσικής οικονομικής ανάλυσης.....	32

4	Πέρα από την κλασική οικονομική ανάλυση – Πιθανοί κίνδυνοι που παραλείφθηκαν....	35
4.1	Εισαγωγή στη χαρτογράφηση των γνώσεων των ενδιαφερόμενων που αφορούν το ζήτημα των εκπομπών	35
4.1.1	Ανάλυση της χαρτογράφησης των γνώσεων των ενδιαφερόμενων	36
4.1.2	Προσομοιώσεις	39
4.2	Οι κίνδυνοι που συνδέονται με τη δράση για την πλήρη απαλλαγή από τον άνθρακα	44
4.3	Οι κίνδυνοι που συνδέονται με τη βασική γραμμή δράσης.....	46
5	Ανάλυση αβεβαιότητας.....	49
5.1	Χαμηλές επιβληθείσες τιμές από την Ευρωπαϊκή Ένωση (ETS).....	49
5.2	Χαμηλά κόστη εγκατάστασης Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας.....	52
	Βασική Γραμμή Δράσης	52
	Πλήρης Απαλλαγή	52
5.3	Υψηλά κόστη εγκατάστασης Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας	54
	Βασική Γραμμή Δράσης	54
	Πλήρης Απαλλαγή	54
5.4	Χωρίς την πυρηνική ενέργεια	56
	Βασική Γραμμή Δράσης	56
	Πλήρης Απαλλαγή	56
6	Συμπεράσματα	59
7	Βιβλιογραφία	61

Λίστα Σχημάτων

Σχήμα 1.1 Δομή της διπλωματικής εργασίας.	5
Σχήμα 2.1 Παράδειγμα γνωστικής χαρτογράφησης.....	19
Σχήμα 2.2 Παράδειγμα ασαφούς γνωστικού χάρτη.....	21
Σχήμα 3.1 Βέλτιστο μείγμα ηλεκτρικής ενέργειας στη βασική γραμμή δράσης.....	24
Σχήμα 3.2 Βέλτιστο μείγμα ηλεκτρικής ενέργειας στο σενάριο της πλήρους απαλλαγής από τις εκπομπές αερίου του θερμοκηπίου.	26
Σχήμα 3.3 Το αρχικό κεφάλαιο (Α.Κ) και οι λειτουργικές δαπάνες (Λ.Δ) που απαιτούνται από το ενεργειακό σύστημα στο πλαίσιο των δύο δράσεων, της βασικής γραμμής δράσης και της πλήρους απαλλαγής από τον άνθρακα.	28
Σχήμα 3.4 Η διαφορά μεταξύ των δύο σεναρίων δράσης-πλήρης απαλλαγή και βασική γραμμή δράσης- στο πλαίσιο της συνολικής επένδυσης και της επένδυσης μόνο στον ενεργειακό τομέα.	30
Σχήμα 3.5 Η διαφορά μεταξύ των δύο σεναρίων –πλήρης απαλλαγή και βασική γραμμή δράσης- στο πλαίσιο της προστιθέμενης αξίας στους κύριους τομείς της οικονομίας	30
Σχήμα 3.6 Η διαφορά μεταξύ των δύο σεναρίων – πλήρης απαλλαγή και βασική γραμμή δράσης- στο πλαίσιο της προστιθέμενης αξίας στους κύριους τομείς της οικονομίας . Ο άξονας Υ εκφράζει το επίπεδο του Α.Ε.Π στη βασική γραμμή δράσης.....	31
Σχήμα 3.7 Η διαφορά μεταξύ των δύο σεναρίων –βασική γραμμή δράσης και πλήρης απαλλαγή- σχετικά με το ποσοστό ανεργίας	32
Σχήμα 4.1 Το αποτέλεσμα του FCM του πολωνικού ζητήματος απαλλαγής από τον άνθρακα.	38
Σχήμα 4.2 Η συνολική διαμόρφωση των πέντε σεναρίων	40
Σχήμα 4.3 Η αξία των αβεβαιοτήτων και τα αποτελέσματα του FCM για τη βασική γραμμή δράσης και την πλήρη απαλλαγή από τον άνθρακα στο κοινωνικοοικονομικό σενάριο της “Δύσβατης οδού”. Οι τιμές των δεικτών: Α.Π.Ε: Οικονομική ανάπτυξη και ΑΝΘΡΑΚΑΣ: Οικονομική ανάπτυξη, αντικατοπτρίζουν την επίδραση των δύο αυτών πολιτικών στήριξης στην οικονομία	41
Σχήμα 4.4 Η αξία των αβεβαιοτήτων και τα αποτελέσματα του FCM για τη βασική γραμμή δράσης και την πλήρη απαλλαγή από τον άνθρακα στο κοινωνικοοικονομικό σενάριο της “Διχασμένης οδού”. Οι τιμές των δεικτών: Α.Π.Ε: Οικονομική ανάπτυξη και ΑΝΘΡΑΚΑΣ: Οικονομική ανάπτυξη, αντικατοπτρίζουν την επίδραση των δύο αυτών πολιτικών στήριξης στην οικονομία	42

Σχήμα 4.5 Η αξία των αβεβαιοτήτων και τα αποτελέσματα του FCM για τη βασική γραμμή δράσης και την πλήρη απαλλαγή από τον άνθρακα στο κοινωνικοοικονομικό σενάριο της “Πράσινης οδού”. Οι τιμές των δεικτών: Α.Π.Ε: Οικονομική ανάπτυξη και ΑΝΘΡΑΚΑΣ: Οικονομική ανάπτυξη, αντικατοπτρίζουν την επίδραση των δύο αυτών πολιτικών στήριξης στην οικονομία.	42
Σχήμα 4.6 Η αξία των αβεβαιοτήτων και τα αποτελέσματα του FCM για τη βασική γραμμή δράσης και την πλήρη απαλλαγή από τον άνθρακα στο κοινωνικοοικονομικό σενάριο της “Οδού του Άνθρακα”. Οι τιμές των δεικτών: Α.Π.Ε: Οικονομική ανάπτυξη και ΑΝΘΡΑΚΑΣ: Οικονομική ανάπτυξη, αντικατοπτρίζουν την επίδραση των δύο αυτών πολιτικών στήριξης στην οικονομία.	43
Σχήμα 4.7 Η αξία των αβεβαιοτήτων και τα αποτελέσματα του FCM για τη βασική γραμμή δράσης και την πλήρη απαλλαγή από τον άνθρακα στο κοινωνικοοικονομικό σενάριο της “Ενδιάμεσης Οδού”. Οι τιμές των δεικτών: Α.Π.Ε: Οικονομική ανάπτυξη και ΑΝΘΡΑΚΑΣ: Οικονομική ανάπτυξη, αντικατοπτρίζουν την επίδραση των δύο αυτών πολιτικών στήριξης στην οικονομία.	43
Σχήμα 5.1 Το βέλτιστο μείγμα ηλεκτρικής ενέργειας για τις δύο κλιματικές πολιτικές με την παραδοχή των χαμηλών τιμών που επιβάλλονται από την Ε.Ε.	50
Σχήμα 5.2 Το Αρχικό Κεφάλαιο (Α.Κ-CAPEX) και οι Λειτουργικές Δαπάνες (Λ.Δ-OPEX) για τη βασική γραμμή δράσης και την πλήρη απαλλαγή, δεδομένου των χαμηλών τιμών που επιβάλλει η Ε.Ε.	51
Σχήμα 5.3 Η διαφορά στο Α.Ε.Π και στην κατανάλωση μεταξύ της βασικής γραμμής δράσης και της πλήρους απαλλαγής, δεδομένου των χαμηλών τιμών που επιβάλλει η Ε.Ε. Οι μονάδες στον κάθετο άξονα γ εκφράζουν το επίπεδο του Α.Ε.Π στη βασική γραμμή δράσης.	51
Σχήμα 5.4 Το βέλτιστο μείγμα ηλεκτρικής ενέργειας για τις 2 κλιματικές πολιτικές-βασική γραμμή δράσης (αριστερά) και πλήρης απαλλαγή από τις εκπομπές (δεξιά) με την παραδοχή του χαμηλού κόστους των Α.Π.Ε διακοπτόμενης λειτουργίας.	52
Σχήμα 5.5 Το Αρχικό Κεφάλαιο (Α.Κ-CAPEX) και οι Λειτουργικές Δαπάνες (Λ.Δ-OPEX) για τη βασική γραμμή δράσης και την πλήρη απαλλαγή, δεδομένου του χαμηλού κόστους των Α.Π.Ε διακοπτόμενης λειτουργίας.	53
Σχήμα 5.6 Η διαφορά στο Α.Ε.Π και στην κατανάλωση μεταξύ της βασικής γραμμής δράσης και της πλήρους απαλλαγής, δεδομένου του χαμηλού κόστους των Α.Π.Ε διακοπτόμενης λειτουργίας. Οι μονάδες στον κάθετο άξονα γ εκφράζουν το επίπεδο του Α.Ε.Π στη βασική γραμμή δράσης.	53

Σχήμα 5.7 Το βέλτιστο μείγμα ηλεκτρικής ενέργειας για τις 2 κλιματικές πολιτικές-βασική γραμμή δράσης (αριστερά) και πλήρης απαλλαγή από τις εκπομπές (δεξιά) με την παραδοχή του υψηλού κόστους των Α.Π.Ε διακοπτόμενης λειτουργίας.....	54
Σχήμα 5.8 Το Αρχικό Κεφάλαιο (Α.Κ-CAPEX) και οι Λειτουργικές Δαπάνες (Λ.Δ-OPEX) για τη βασική γραμμή δράσης και την πλήρη απαλλαγή, δεδομένου του υψηλού κόστους των Α.Π.Ε διακοπτόμενης λειτουργίας.....	55
Σχήμα 5.9 Η διαφορά στο Α.Ε.Π και στην κατανάλωση μεταξύ της βασικής γραμμής δράσης και της πλήρους απαλλαγής, δεδομένου του υψηλού κόστους των Α.Π.Ε. διακοπτόμενης λειτουργίας. Οι μονάδες στον κάθετο άξονα γ εκφράζουν το επίπεδο του Α.Ε.Π στη βασική γραμμή δράσης.....	55
Σχήμα 5.10 Το βέλτιστο μείγμα ηλεκτρικής ενέργειας για τις 2 κλιματικές πολιτικές-βασική γραμμή δράσης (αριστερά) και πλήρης απαλλαγή από τις εκπομπές (δεξιά) ,υποθέτοντας ότι η πυρηνική ενέργεια δε είναι διαθέσιμη.	56
Σχήμα 5.11 Το Αρχικό Κεφάλαιο (Α.Κ-CAPEX) και οι Λειτουργικές Δαπάνες (Λ.Δ-OPEX) για τη βασική γραμμή δράσης και την πλήρη απαλλαγή, υποθέτοντας ότι η πυρηνική ενέργεια δεν είναι διαθέσιμη.....	57
Σχήμα 5.12 Η διαφορά στο Α.Ε.Π και στην κατανάλωση μεταξύ της βασικής γραμμής δράσης και της πλήρους απαλλαγής, υποθέτοντας ότι η πυρηνική ενέργεια δεν είναι διαθέσιμη. Οι μονάδες στον κάθετο άξονα γ εκφράζουν το επίπεδο του Α.Ε.Π στη βασική γραμμή δράσης.	57

Λίστα Πινάκων

Πίνακας 2.1 Επισκόπηση υπολογιστικών μοντέλων γενικής ισορροπίας.....	8
Πίνακας 2.2 Τεχνολογικές αλλαγές και αντιμετώπιση αβεβαιότητας που παρουσιάζουν τα ενεργειακά μοντέλα.....	15
Πίνακας 2.3 Πίνακας γειτνίασης του γνωστικού χάρτη του Σχήματος Σχήμα 2.1.....	20
Πίνακας 2.4 Πίνακας γειτνίασης του γνωστικού χάρτη του Σχήματος Σχήμα 2.2.....	21

Ορολογίες-Συντομογραφίες

Advanced manufacturing	Προηγμένος Παραγωγικός Τομέας
Agriculture	Γεωργία
Baseline	Βασική Γραμμή Δράσης
Biogas	Βιοαέριο
Biomass	Βιομάζα
Bottom-up analysis	«Από κάτω προς τα πάνω» Ανάλυση
CAPEX	Capital Expenditures-Αρχικό Κεφάλαιο
CGE	Computable General Equilibrium
CHP coal	Συμπαραγωγή Άνθρακα
CHP gas	Συμπαραγωγή Αερίου
Cofiring	Ταυτόχρονη Καύση
Construction	Κατασκευαστικός Τομέας
Consumption	Κατανάλωση
Decarbonisation	Πλήρης Απαλλαγή από τον Άνθρακα
DSGE	Dynamic Stochastic General Equilibrium
Energy-intensive industry	Ενεργειακό Σύστημα
ETS	Emissions Trading Scheme
FCM	Fuzzy Cognitive Map-Ασαφής Γνωστικός Χάρτης
Gas	Φυσικό Αέριο
GDP	Gross Domestic Product-Ακαθάριστο Εγχώριο Προϊόν
Hard coal	Λιθάνθρακας
Import	Εισαγωγές
Investment in power sector	Επένδυση στον Ενεργειακό τομέα
Light industry	Ελαφριά Βιομηχανία
Lignite	Λιγνίτης
MWh	MegaWatt per Hour
Nuclear	Πυρηνική Ενέργεια
OPEX	Operational Expenditures-Λειτουργικές Δαπάνες
Photovoltaics	Φωτοβολταϊκά
PLN	Polish Zloty- Πολωνικό νόμισμα (ζλότυ)
Private services	Ιδιωτικός Τομέας
Public services	Δημόσιες Υπηρεσίες
R&D	Research & Development- Έρευνα & Ανάπτυξη
Refined petroleum products	Επεξεργασμένα Πετρελαϊκά Προϊόντα
Small hydro	Μικρά Υδροηλεκτρικοί Σταθμοί
Top-down analysis	«Από πάνω προς τα κάτω» Ανάλυση
Total investment	Συνολική Επένδυση
Transport	Μεταφορές
TWh	TeraWatt per Hour
Wind offshore	Υπεράκτια Αιολική Ενέργεια
Wind onshore	Χερσαία Αιολική Ενέργεια
ΑΠΕ	Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας
E.E	Ευρωπαϊκή Ένωση
ΣΗΘ	Συμπαραγωγή Ηλεκτρισμού και Θερμότητας

1 Εισαγωγή

1.1 Αντικειμενικός σκοπός και στόχοι

Ο πολωνικός τομέας της ηλεκτρικής ενέργειας βρίσκεται σε σταυροδρόμι αντιμετωπίζοντας το πρόβλημα μείωσης των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου: Από τη μία πλευρά μία εξελικτική διαδικασία σταδιακής μείωσης των εκπομπών αυτών με παράλληλη επιμονή στον άνθρακα, ενώ από την άλλη, ένα πιο φιλόδοξο μονοπάτι μετάβασης, βασιζόμενο στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και το φυσικό αέριο. Με αυτόν τον τρόπο η Πολωνία μπορεί να συμβάλει στην παγκόσμια προσπάθεια μείωσης των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου, η οποία αποσκοπεί στην ελαχιστοποίηση του κινδύνου της δυνητικά καταστροφικής κλιματικής αλλαγής. Ταυτόχρονα, μια τέτοια πορεία συνεπάγεται επίσης, θεμελιώδεις διαρθρωτικές αλλαγές στη δομή της παραγωγής στον τομέα της ενέργειας, γεγονός που επιφέρει κόστος για την οικονομία και την κοινωνία, ιδίως επειδή, στην περίπτωση της Πολωνίας, σημαίνει τη σταδιακή κατάργηση του τομέα εξόρυξης άνθρακα, ο οποίος απασχολεί μεγάλο μέρος του εργατικού δυναμικού της χώρας.

Στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η αξιοποίηση της μεθόδου των ασαφών γνωστικών χαρτών, προκειμένου η μελέτη μας να συμβάλει σε αυτήν τη συζήτηση και να στηρίξει τη διαδικασία λήψης αποφάσεων των ενδιαφερόμενων μερών. Ειδικότερα, επιδιώκουμε να παρουσιάσουμε τις πιθανές αρνητικές συνέπειες και των δύο επιλογών που διαθέτει η Πολωνία, να τις ποσοτικοποιήσουμε-όποτε είναι δυνατόν- και να αναφέρουμε τις συνθήκες, κάτω από τις οποίες μπορούν να ενισχυθούν ή να αποφευχθούν.

Αρχικά, προσδιορίζουμε το οικονομικό κόστος που συνδέεται με την ενεργειακή μετάβαση, χρησιμοποιώντας ένα ενεργειακό μοντέλο «από κάτω προς τα πάνω» του βέλτιστου μείγματος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και ένα μακροοικονομικό δυναμικό στοχαστικό μοντέλο

γενικής ισορροπίας (DSGE). Το ενεργειακό μοντέλο "από κάτω προς τα πάνω" διαμορφώνει το μείγμα ηλεκτρικής ενέργειας που ελαχιστοποιεί το κόστος με ή χωρίς περιορισμούς εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου. Στη συνέχεια το μοντέλο γενικής ισορροπίας εξετάζει τις σχετικές κοινωνικοοικονομικές συνέπειες της υιοθέτησης των μιγμάτων που προκύπτουν, συμπεριλαμβανομένων των επιδράσεων στο Ακαθάριστο Εγχώριο Προϊόν (ΑΕΠ), της συνολικής κατανάλωσης, των επενδύσεων, της ανεργίας και των μισθών.

Η μελέτη «από κάτω προς τα πάνω», η οποία προβλέπει την ύπαρξη ενός βέλτιστου συνδυασμού παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας για την Πολωνία, βάσει πολλών στόχων πολιτικής, έχει προετοιμαστεί από το Τμήμα Στρατηγικής Ανάλυσης (Klima, et al., 2015). Χρησιμοποιώντας το ίδιο μοντέλο, παρεκκλίνουμε από την εν λόγω προσέγγιση ως προς δύο συνιστώσες. Αφενός, η πιο φιλόδοξη πολιτική που εξετάζεται στον (Klima, et al., 2015) υπέθεσε μια μείωση των εκπομπών κατά το ήμισυ, εν αντιθέσει με τη δική μας που υπήρξε ακόμη πιο φιλόδοξη, υποθέτοντας τριπλάσια μείωση. Αφετέρου, επικαιροποιούμε το τρέχον κόστος και την αναμενόμενη εξέλιξη των βασικών τεχνολογιών ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (ΑΠΕ), χρησιμοποιώντας την Ετήσια Τεχνολογική Βάση του 2017 που εκπονήθηκε από το Εθνικό Εργαστήριο Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (Hand, et al., 2017).

Υπάρχουν διάφορες μακροοικονομικές μελέτες σχετικά με τις επιπτώσεις των κλιματικών πολιτικών στην πολωνική οικονομία. Η Παγκόσμια Τράπεζα (2011) και οι Bukowski και Kowal (2010) εφαρμόζουν ένα μοντέλο DSGE για να εξετάσουν τις επιπτώσεις της μείωσης του άνθρακα στην οικονομία βάσει του ΑΕΠ. Ωστόσο, χρησιμοποιούν ένα απλοποιημένο μοντέλο από «κάτω προς τα πάνω» που παράγει στοιχεία εισόδου για προσομοιώσεις που δεν λαμβάνουν υπόψη, επί παραδείγματι, τη μείωση του κόστους εγκατάστασης των ΑΠΕ που επέρχεται με την πάροδο του χρόνου ή διαφορετικά καθεστάτα ζήτησης. Πιο πρόσφατα, ο Kiviila (2018) εφάρμοσε ένα υπολογιστικό μοντέλο γενικής ισορροπίας (CGE) για να εξετάσει το μακροοικονομικό κόστος του περιορισμού των εκπομπών στην Πολωνία. Στη μελέτη μας, ακολουθούμε μια παρόμοια προσέγγιση, αλλά εφαρμόζουμε ένα μοντέλο DSGE που διαφέρει από τη συνήθη ρύθμιση CGE με δύο τρόπους. Πρώτον, στο μοντέλο μας DSGE, μια επιχείρηση λαμβάνει υπόψη όχι μόνο το τρέχον κέρδος αλλά και τα αναμενόμενα μελλοντικά κέρδη, γεγονός που δρα καταλυτικά στις αποφάσεις επενδύσεων και προσλήψεων. Πιο συγκεκριμένα, εάν μια επιχείρηση αναμένει μεγάλη ζήτηση στο μέλλον, είναι πιο πρόθυμη να πραγματοποιήσει επενδύσεις και λιγότερο πρόθυμη να απολύσει εργαζόμενους απ' ό,τι στην περίπτωση μιας επιχείρησης που αναμένει μείωση της ζήτησης και κατ' επέκταση των εσόδων της. Δεύτερον, το μοντέλο DSGE λαμβάνει υπόψη τις προστριβές μεταξύ των κλάδων στην

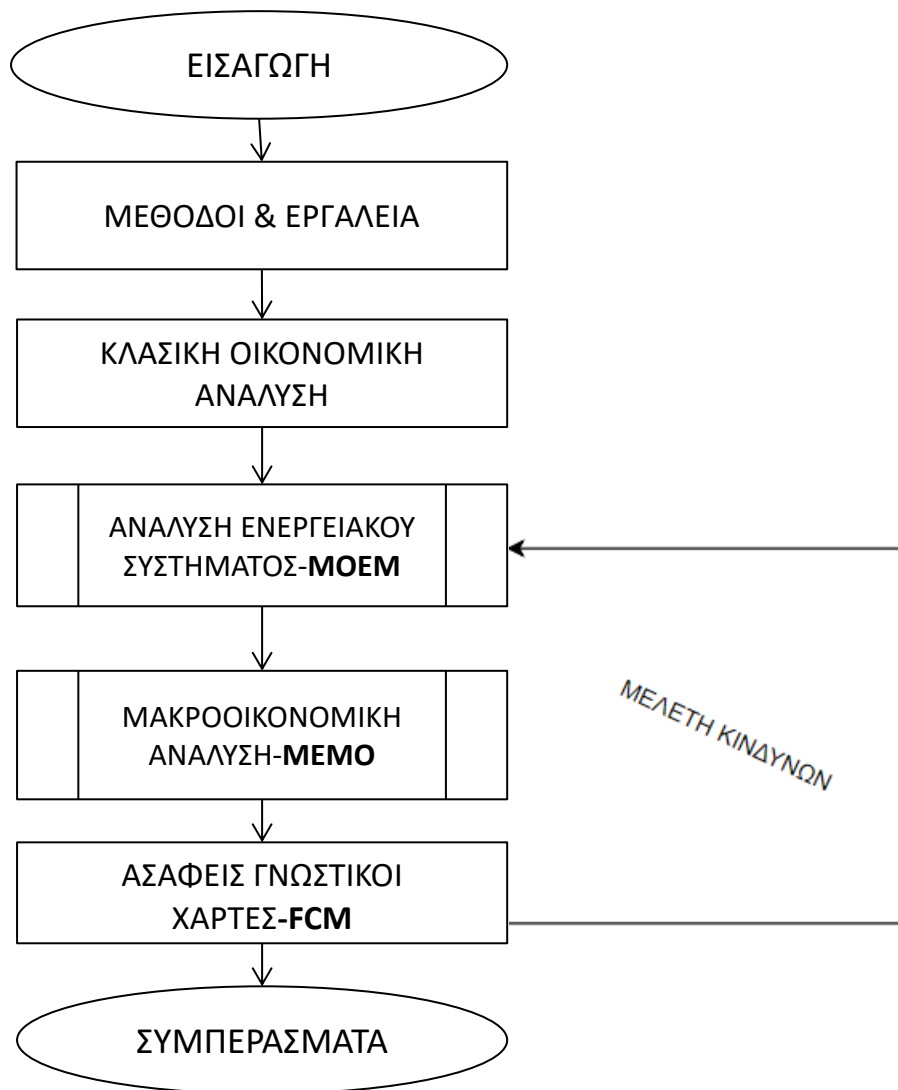
αγορά εργασίας, υιοθετώντας τη μέθοδο αντιστοίχισης μεταξύ της προσφοράς και της ζήτησης. Η μέθοδος αυτή, που χρησιμοποιείται συχνά στα σύγχρονα μακροοικονομικά μοντέλα για τη μελέτη της ανεργίας, προϋποθέτει ότι σε κάθε περίοδο ένας καταγεγραμμένος άνεργος ενδέχεται να απασχολείται στην επόμενη περίοδο, σε συνάρτηση με τον αριθμό των κενών θέσεων εργασίας και τον αριθμό των ατόμων που αναζητούν εργασία. Η αύξηση της ζήτησης σε εργαζόμενους, π.χ. λόγω της πρόσθετης ζήτησης που δημιουργείται από μια επένδυση μεγάλης κλίμακας, θα αυξήσει ταυτόχρονα τον αριθμό των κενών θέσεων και την πιθανότητα εξεύρεσης εργασίας, μειώνοντας μ' αυτό τον τρόπο την ανεργία.

Η κλασική οικονομική ανάλυση που ακολουθήσαμε, μπορεί να οδηγήσει σε μη αμερόληπτα αποτελέσματα, στην περίπτωση που παραλείπονται σημαντικά επακόλουθα της μετάβασης, ή όταν οι υποθέσεις μας για εξωτερικούς παράγοντες, όπως το κόστος, η αποδοχή συγκεκριμένων τεχνολογιών και οι τιμές των αδειών εκπομπής στην Ε.Ε, αποδειχθούν λανθασμένες. Επομένως, εντοπίζουμε διάφορες πτυχές που δεν συνυπολογίζονται στο πρώτο βήμα, χρησιμοποιώντας τους Fuzzy Cognitive Maps (FCM). Η μέθοδος χρησιμοποιείται για να απεικονίσει τις πιθανές συνέπειες των δύο προσεγγίσεων σε ένα διάγραμμα συσχέτισης αιτίου-αποτελέσματος. Στο εν λόγω διάγραμμα συνδέονται οι προτεινόμενες πολιτικές με την οικονομική ανάπτυξη, ενώ παράλληλα παρέχεται η δυνατότητα αξιολόγησης των θετικών εκβάσεων αυτών των σχέσεων στους άμεσα ενδιαφερόμενους. Η διαδικασία ποσοτικοποίησης της σημασίας των κινδύνων χρησιμοποιώντας την προσέγγιση FCM, που λειτουργεί με γνώμονα τα ενδιαφερόμενα μέρη, πραγματοποιήθηκε κατά τη διάρκεια ενός εργαστηρίου των ενδιαφερομένων μερών που πραγματοποιήθηκε στη Βαρσοβία τον Οκτώβριο του 2017. Τα FCM χρησιμοποιούνται από καιρό για τη χάραξη στρατηγικών (Vergini & Groumpos, 2017), κυρίως όσον αφορά τον περιβαλλοντικό και ενεργειακό σχεδιασμό, καθώς και για άλλες εφαρμογές κάθε δράσης (Groumpos, 2010), συμπεριλαμβανομένων των μεταβάσεων στις νέες πολιτικές και της ατρωσίας (Olazabal & Pascual, 2016). Ωστόσο, δεν έχουν αξιοποιηθεί επαρκώς για την χάραξη κλιματικής πολιτικής, όπου οι περισσότερες επιστημονικές μελέτες επικεντρώνονται στην προσομοίωση με κύρια συνιστώσα επιρροής το ανάλογο οικονομικό κόστος. Εντούτοις, έχουν υπάρξει περιπτώσεις συνδυασμού μοντέλων με FCM, προκειμένου οι αναλύσεις μοντελοποίησης να γίνουν πιο εύχρηστες στα ενδιαφερόμενα μέρη, και οι τελευταίοι να αξιοποιήσουν τις γνώσεις τους για βελτιστοποίηση των αποτελεσμάτων που προκύπτουν από την μέθοδο (Van Vliet, et al., 2010), (Mallampalli, et al., 2016)). Εν προκειμένω, χρησιμοποιήσαμε τη μεθοδολογία FCM (Nikas & Doukas, 2016), όπως πρόσφατα εφαρμόστηκε για την αξιολόγηση των στρατηγικών ενεργειακής απόδοσης (Nikas, et al., 2018c) και την επιλογή δράσεων απαλλαγής από τον άνθρακα στον τομέα ενέργειας της Ολλανδίας (Nikas, et al., 2018b).

Τέλος, διερευνάται ο τρόπος που μεταβάλλονται τα αποτελέσματα της αρχικής τυποποιημένης οικονομικής ανάλυσης, στην περίπτωση που αλλάζουμε τις υποθέσεις / παραμέτρους, όπως είναι το τεχνολογικό κόστος, οι τιμές των αδειών εκπομπής και η διαθεσιμότητα ή η κοινωνική αποδοχή της πυρηνικής ενέργειας. Η σημασία αυτών των παραγόντων για την αξιολόγηση των πλεονεκτημάτων που συνδέονται ακολουθώντας την εκάστοτε πορεία δράσης, έγινε σαφής από τις θετικές αντιδράσεις και εντυπώσεις των ενδιαφερομένων στην προσομοίωση FCM.

1.2 Δομή της εργασίας

Για να γίνει περισσότερο κατανοητή η δομή της εργασίας, παραθέτουμε το παρακάτω διάγραμμα ροής της μελέτης μας.



Σχήμα 1.1 Δομή της διπλωματικής εργασίας.

2 Μέθοδοι & Εργαλεία

2.1 Macroeconomic Mitigation Options model (MEMO)

2.1.1 Μοντέλα γενικής ισορροπίας

Τα υπολογιστικά μοντέλα γενικής ισορροπίας (Computable General Equilibrium ή CGE) αποτελούν μια αλγεβρική απεικόνιση της περίπλοκης λειτουργίας μιας οικονομίας της αγοράς και βασίζονται στο κεντρικό αφηρημένο θεωρητικό υπόβαθρο για το πώς λειτουργεί ένα αποκεντρωμένο σύστημα τιμών. (Wing., 2011). Δεν αναζητούν βέλτιστες λύσεις, εξετάζουν τις επιπτώσεις συγκεκριμένων πολιτικών στις οικονομικές, κοινωνικές και περιβαλλοντικές παραμέτρους. Χαρακτηρίζονται ως υπολογιστικά, διότι αποτελούν μια αλγεβρική απεικόνιση της περίπλοκης λειτουργίας της οικονομίας και διεξάγουν τη διαδικασία προσομοίωσης της, χρησιμοποιώντας τα διαθέσιμα εθνικά οικονομικά δεδομένα με τη μορφή αριθμητικών παραμέτρων, γεγονός που τα καθιστά εξαιρετικά αξιόπιστα μοντέλα. Συνήθως οι παράμετροι αυτές είναι οι τιμές ισορροπίας και τα επίπεδα ζήτησης και προσφοράς.

Τα μοντέλα γενικής ισορροπίας έχουν τη δυνατότητα να υπολογίζουν όχι μόνο τις άμεσες επιπτώσεις μιας πολιτικής σε έναν τομέα της οικονομίας ,αλλά και την πλήρη επίδρασή της στους αλληλεξαρτούμενους τομείς της .Με αυτόν τον τρόπο υπολογίζεται η συνολική μεταβολή που επέρχεται στην κατανάλωση (ή χρησιμότητα) βάσει της οποίας αποτυπώνεται η ευημερία της χώρας. Για παράδειγμα ο φόρος άνθρακα δεν θα αυξήσει μόνο το κόστος ορισμένων μορφών ενέργειας, αλλά θα επηρεάσει επίσης τη ζήτηση και την προσφορά άλλων αγαθών. Επομένως το χαρακτηριστικό αυτό καθίσταται το συγκριτικό τους πλεονέκτημα σε σχέση με μοντέλα μερικής ισορροπίας που επικεντρώνονται σε έναν ενιαίο τομέα ή σε άλλα μοντέλα που δεν διαθέτουν λεπτομερή διατμηματική αναπαράσταση της οικονομίας. Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι τα μοντέλα νεοκλασικής ανάπτυξης που μοντελοποιούν την οικονομία ως

ενιαίο τομέα και δεν μπορούν να καταγράψουν αυτές τις γενικές επιδράσεις ισορροπίας, παρά το γεγονός ότι εστιάζουν στην ευρύτερη κατανόηση της μακροπρόθεσμης δυναμικής.

Επιπλέον ένας ενδεικτικός τρόπος καταγραφής των επιπτώσεων μιας κλιματικής αλλαγής από ένα μοντέλο γενικής ισορροπίας είναι η μοντελοποίηση των απότομων αλλαγών μέσα από διάφορα σενάρια εξελίξεων στην οικονομία. Ο προσδιορισμός της βέλτιστης λύσης και η χάραξη μιας νέας κλιματικής πολιτικής βασισμένη στα CGE μοντέλα επιτυγχάνεται με τον υπολογισμό νέων ισορροπιών της αγοράς, που θα επέλθουν μετά από διαφοροποίηση εξωγενών παραμέτρων της οικονομίας και η σύγκριση τους με τους αρχικούς συντελεστές ισορροπίας, όπως για παράδειγμα το επίπεδο χρησιμότητας και το επίπεδο τιμών.

Παρακάτω παρατίθεται ένας πίνακας που αναφέρει τα κυριότερα μοντέλα γενικής ισορροπίας με μερικά από τα σημαντικότερα πλαίσια μοντελοποίησης τους.

Πίνακας 2.1 Επισκόπηση υπολογιστικών μοντέλων γενικής ισορροπίας

Μοντέλο	Συστάθηκε από	Σύντομη Περιγραφή	Ενδεικτικές εφαρμογές
AIM	(Kainuma, et al., 1999)	Ένα παγκόσμιο μοντέλο γενικής ισορροπίας με αναδρομική δυναμική, που υπολογίζει την απορρόφηση των εκπομπών αερίων διοξειδίου του άνθρακα στην περιοχή της Ασίας-Ειρηνικού και τις επιπτώσεις τους στο περιβάλλον, την κοινωνία και την οικονομία	(Dai, et al., 2011) (Fujino, et al., 2006)
AIM/Material	(Masui, et al., 2003)	Ένα εθνικό μοντέλο με αναδρομική δυναμική	(Masui, 2005)
Dynamic GTAP	(Walmsley, et al., 2006)	Ένα δυναμικό μοντέλο γενικής ισορροπίας	(Golub, et al., 2009)
G-CUBED	(McKibbin & Wilcoxon, 1999)	Ένα πολυκρατικό, πολυτομεακό, διαχρονικό μοντέλο που εφαρμόζεται στην μελέτη των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου, της απελευθέρωσης του εμπορίου	(McKibbin, et al., 2004)
GEM-E3	(Van Regemorter, 2005)	Ένα στατικό μοντέλο γενικής ισορροπίας για την αξιολόγηση των κλιματικών και περιβαλλοντικών πολιτικών	(Nilsson, 1999)
GREEN	(Burniaux, et al., 1992)	Ένα δυναμικό μοντέλο γενικής ισορροπίας που μελετάει τις οικονομικές	(Nicoletti & Oliveira-Martins, 1993)

Μοντέλο	Συστάθηκε από	Σύντομη Περιγραφή	Ενδεικτικές εφαρμογές
		επιπτώσεις των πολιτικών που αποσκοπούν στη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου στην Ευρώπη	
GTAP-E	(Burniaux & Truong, 2002)	Ένα στατικό μοντέλο γενικής ισορροπίας	(Kremers, et al., 2000)
GTEM	(Pant, 2007)	Ένα δυναμικό μοντέλο της παγκόσμιας οικονομίας που αναπτύχθηκε για την αντιμετώπιση των ζητημάτων παγκόσμιας αλλαγής, συμπεριλαμβανομένων εκείνων που σχετίζονται με την πολιτική για την αλλαγή του κλίματος	(Jakeman & Fisher, 2006)
ICES	(Bosselo, et al., 2009)	Αναδρομικό, δυναμικό, πολυπεριφερειακό μοντέλο γενικής ισορροπίας της παγκόσμιας ισορροπίας, επέκταση του GTAP-E	(Bosselo, et al., 2010) (Parrado & De Cian, 2014)
IGEM	(Goettle, et al., 2007)	Ένα δυναμικό μοντέλο της αμερικανικής οικονομίας που περιγράφει την ανάπτυξης λόγω της συσσώρευσης κεφαλαίου, των τεχνικών αλλαγών και της αλλαγής του πληθυσμού.	(Goettle & Fawwcett, 2009)
IMACLIM-R	(Crassous, et al., 2006)	Ένα πολυτομεακό, πολυπεριφερειακό, αναδρομικό μοντέλο γενικής ισορροπίας που προσομοιώνει την παγκόσμια οικονομία σε ετήσια βάση.	(Crassous, et al., 2006)
LINKAGE	(Van de Mensbrugghe, 2005)	Ένα παγκόσμιο, πολυπεριφερειακό, πολυτομεακό δυναμικό μοντέλο γενικής ισορροπίας.	(Laborde, et al., 2016)
MEMO	(Bukowski & Kowal, 2010)	Ένα μεγάλης κλίμακας, πολυτομεακό δυναμικό μοντέλο γενικής ισορροπίας για την Πολωνία	

Μοντέλο	Συστάθηκε από	Σύντομη Περιγραφή	Ενδεικτικές εφαρμογές
MIRAGE	(Bchir, et al., 2002)	Ένα πολυπεριφερειακό, πολυτομεακό μοντέλο γενικής ισορροπίας, αφιερωμένο στην ανάλυση της εμπορικής πολιτικής	(Zaki, 2011)
MIT EPPA	(Paltsev, et al., 2005)	Ένα αναδρομικό δυναμικό, πολυπεριφερειακό μοντέλο της παγκόσμιας οικονομίας που βασίζεται στο σύνολο δεδομένων της ανάλυσης του παγκόσμιου εμπορίου.	(Viguier, et al., 2003)
MS-MRT	(Bernstein, et al., 1999b)	Ένα πολυτομεακό μοντέλο γενικής ισορροπίας πολλαπλών περιοχών που χρησιμοποιείται για την ανάλυση των παγκόσμιων επιπτώσεων του πρωτοκόλλου του Κυότο, δίνοντας έμφαση στις πτυχές του διεθνούς εμπορίου	(Bernstein, et al., 1999a)
SGM 2004	(Edmonds, et al., 2004)	Ένα μοντέλο γενικής ισορροπίας που αναλύει θέματα σχετικά με την ενέργεια, την οικονομία και τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου.	(Schumacher & Sands, 2006)
WIAGEM	(Kemfert, 2001)	Μία οικονομική προσέγγιση που επικεντρώνεται στη διεθνή αγορά ενέργειας που ενσωματώνει τις κλιματικές σχέσεις μέσω των αλλαγών της θερμοκρασίας και των διακυμάνσεων της στάθμης της θάλασσας	(Kemfert, 2005) (Kemfert, et al., 2006) (Kemfert & Truong, 2007)
WORLDSCAN	(Lejour, et al., 2006)	Αναδρομικό δυναμικό μοντέλο για μακροχρόνια ζητήματα στη διεθνή οικονομία	(Bollen & Gielen, 1999) (Bollen, 2015)

2.1.2 Το μοντέλο MEMO

Το MEMO είναι ένα δυναμικό στοχαστικό μοντέλο γενικής ισορροπίας (Dynamic Stochastic General Equilibrium ή DSGE), το οποίο προσομοιώνει τη δυναμική της πολωνικής οικονομίας. Θεωρεί ότι μια αντιπροσωπευτική επιχείρηση σε κάθε τομέα παράγει τα αγαθά ή τις υπηρεσίες της, χρησιμοποιώντας τέσσερις εισροές: κεφάλαιο, εργατικό δυναμικό, ενέργεια και υλικά. Η επιχείρηση έχει ορισμένες δυνατότητες να υποκαταστήσει μια είσοδο με μια άλλη. Για παράδειγμα, μετά από μια αύξηση της τιμής της ενέργειας, οι επιχειρήσεις μπορούν να επιλέξουν να στραφούν σε μια περισσότερο συμφέρουσα, ενεργειακά, παραγωγή.

Η παραγωγή κάθε επιχείρησης μπορεί:

- (i) να χρησιμοποιηθεί ως υλικό από μια επιχείρηση άλλου τομέα,
- (ii) να αποτελεί συστατικό στοιχείο ενός επενδυτικού σχεδίου που αναλαμβάνεται από άλλη επιχείρηση,
- (iii) να αγοράζεται από τα νοικοκυριά για κατανάλωση,
- (iv) να αγοραστεί από την κυβέρνηση.

Για παράδειγμα, η παραγωγή (αγαθά και υπηρεσίες) που προέρχεται από τον κατασκευαστικό τομέα θα αξιοποιηθεί κατά κύριο λόγο ως στοιχείο των επενδυτικών δράσεων που πραγματοποιούνται σε άλλους τομείς, αλλά μπορεί επίσης να αγοραστεί απευθείας από νοικοκυριά ή από την κυβέρνηση.

Οι επιλογές των επιχειρήσεων καθορίζονται από τη μεγιστοποίηση του κέρδους. Ουσιαστικά, μια επιχείρηση λαμβάνει υπόψη, όχι μόνο το τρέχον κέρδος αλλά και τα αναμενόμενα μελλοντικά κέρδη. Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό για την απόφαση μιας επιχείρησης σχετικά με τις επενδύσεις και την πρόσληψη προσωπικού. Δηλαδή εάν μια επιχείρηση αναμένει μεγάλη ζήτηση στο μέλλον, είναι πιο πρόθυμη να πραγματοποιήσει επενδύσεις και λιγότερο πρόθυμη να απολύσει εργαζομένους απ'ό,τι στην περίπτωση μιας επιχείρησης που αναμένει οικονομική ύφεση.

Όταν οι επιχειρήσεις κάνουν τις επιλογές των εισροών και των εκροών τους, λαμβάνουν όλες τις τιμές (συμπεριλαμβανομένης της τιμής της δικής τους παραγωγής) και τους μισθούς που έχουν δοθεί. Αυτό σημαίνει ότι η οικονομία μπορεί να περιγραφεί από ένα σύνολο επιλογών για τις εισροές (ζήτηση) και επιλογών για τις εκροές (προσφορά) ως συνάρτηση των τιμών. Για παράδειγμα, η αύξηση της τιμής για τις κατασκευές θα συνεπάγεται μείωση της ζήτησης για κατασκευή από άλλους τομείς και αύξηση της προσφοράς από κατασκευαστικές επιχειρήσεις. Υποθέτουμε ότι, σε κάθε σημείο, η οικονομία βρίσκεται σε κατάσταση ισορροπίας: οι τιμές είναι

τέτοιες ώστε η προσφορά και η ζήτηση να είναι ισορροπημένες και να επέρχεται η εκκαθάριση της αγοράς. Η κατάσταση ισορροπίας επιδρά σημαντικά στη δυναμική της οικονομίας. Για παράδειγμα, ένα επενδυτικό σχέδιο μεγάλης κλίμακας στον ενεργειακό τομέα, το οποίο αυξάνει τη ζήτηση για κατασκευές, θα οδηγήσει σε αύξηση της τιμής των κατασκευαστικών αγαθών για να εξασφαλιστεί ότι η ζήτηση καλύπτεται από την προσφορά. Εντούτοις, η αύξηση της τιμής των κατασκευαστικών αγαθών μπορεί να μειώσει την αποδοτικότητα των επενδυτικών σχεδίων σε άλλους τομείς, γεγονός που μπορεί με τη σειρά του να επιβραδύνει τη συσσώρευση κεφαλαίου και να οδηγήσει σε μικρότερη παραγωγή αυτών των τομέων στο μέλλον.

Ένα σημαντικό μέρος του μοντέλου MEMO είναι αυτό του εργατικού δυναμικού. Το τμήμα αυτό βασίζεται στο πλαίσιο αναζήτησης-αντιστοίχισης, το οποίο χρησιμοποιείται συχνά στα σύγχρονα μακροοικονομικά μοντέλα για να μελετήσει τη δυναμική της ανεργίας. Το πλαίσιο υποθέτει ότι, σε κάθε περίοδο, ένας άνεργος πολίτης, έχει κάποια πιθανότητα να απασχολείται στην επόμενη περίοδο. Αυτή η πιθανότητα είναι συνάρτηση του αριθμού των κενών θέσεων και του αριθμού των ατόμων που αναζητούν εργασία. Η αύξηση της ζήτησης των εργαζομένων (π.χ. λόγω της πρόσθετης ζήτησης που δημιουργείται από ένα επενδυτικό σχέδιο μεγάλης κλίμακας) θα αυξήσει τόσο τον αριθμό των κενών θέσεων εργασίας όσο και την πιθανότητα εύρεσης εργασίας και θα μειώσει την ανεργία.

2.1.3 Περιορισμοί μοντέλου

Ωστόσο το μοντέλο MEMO υπόκειται σε ορισμένους περιορισμούς. Αρχικά δεν λαμβάνει υπόψη την ακαμψία των μισθών σε τομεακό επίπεδο: οι μισθοί είναι ελεύθεροι να προσαρμόζονται σε οποιαδήποτε μεταβολή της ζήτησης. Για παράδειγμα, σύμφωνα με το μοντέλο, η πτώση της ζήτησης των ανθρακωρύχων θα προκαλέσει μεγάλη μείωση των μισθών τους. Αυτό έχει σημαντικές συνέπειες για τη δυναμική της ανεργίας. Η προσαρμογή των μισθών προς τα κάτω συνεπάγεται ότι η μείωση του αριθμού των κενών θέσεων είναι μικρότερη από ό,τι στην περίπτωση αδυναμίας τέτοιων προσαρμογών. Αυτό, με τη σειρά του, μεταφράζεται σε μικρότερη αύξηση της ανεργίας. Με άλλα λόγια, αν η παραδοχή μας είναι λανθασμένη και οι τομεακοί μισθοί δεν μπορούν να προσαρμοστούν ελεύθερα, τότε το μοντέλο MEMO θα υποτιμήσει την αύξηση της ανεργίας, λόγω της μείωσης της ζήτησης στον τομέα των ορυχείων.

Το μοντέλο, επιπλέον, δεν λαμβάνει υπόψη του πιθανά εμπόδια εισόδου των εγχώριων επιχειρήσεων, στην αγορά των τεχνολογιών ΑΠΕ. Στην τρέχουσα μελέτη, υποθέτουμε ότι, η εγκατάσταση Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας απαιτεί ισάξια συμμετοχή των εγχώριων επιχειρήσεων, σε σχέση με τις διεθνείς, ως μοχλό ανάπτυξης των επενδύσεων στην πολωνική οικονομία. Εάν η υπόθεση αυτή αποτύχει, όπως θα μπορούσε να συμβεί σε ένα σενάριο όπου

σχεδόν όλα τα ανταλλακτικά των εγκαταστάσεων ΑΠΕ παράγονται στο εξωτερικό και οι πολωνικές επιχειρήσεις δεν έχουν την ευκαιρία να ανταγωνιστούν μία ήδη έτοιμη αγορά για την απόκτηση μεριδίου σε αυτή, η πρόβλεψη για τη μείωση των ανθρακούχων εκπομπών θα έχει μεγαλύτερο αντίκτυπο στις εισαγωγές.

Ένας άλλος σημαντικός περιορισμός του μοντέλου είναι ότι, δεν λαμβάνει υπόψη την επίδραση των διαρθρωτικών αλλαγών που πραγματοποιούνται στον κλάδο της έρευνας και ανάπτυξης (R&D) και τις επιπτώσεις των προσπαθειών αυτών στην ανάπτυξη της οικονομίας. Αν και έγιναν απόπειρες βελτίωσης, το πρόβλημα αυτό δεν μπορεί να λυθεί πλήρως στα οικονομικά μοντέλα, λόγω της έλλειψης ισορροπίας (Acemoglu, et al., 2012).

2.2 Model of Optimal Energy Mix (MOEM)

2.2.1 Μοντέλα ενεργειακών συστημάτων

Το MOEM ανήκει στην κατηγορία των μοντέλων ενεργειακών συστημάτων, τα οποία μπορούν να θεωρηθούν ως μια υποκατηγορία μοντέλων μερικής ισορροπίας, που παρέχουν λεπτομερή περιγραφή του ενεργειακού τομέα, δηλαδή των ενεργειακών τεχνολογιών και των συναφών δαπανών τους. Αυτά χρησιμοποιούνται, μεταξύ άλλων, για τον προσδιορισμό των λιγότερο δαπανηρών τρόπων επίτευξης των μειώσεων των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου ή του κόστους των εναλλακτικών πολιτικών για το κλίμα. Συνδέονται συχνά με τα μακροοικονομικά μοντέλα ή τα μοντέλα γενικής ισορροπίας, με σκοπό να προσθέσουν το απαιτούμενο επίπεδο γνώσης, σε top-down προσεγγίσεις.

Ενώ τα μοντέλα μερικής ισορροπίας υπολογίζουν κυρίως τις ζημιές που μπορεί να προκαλέσει η κλιματική αλλαγή, τα μοντέλα ενεργειακών συστημάτων επικεντρώνονται στον ίδιο τον τομέα της ενεργειακής παραγωγής, στοχεύοντας τόσο στη βελτιστοποίηση της τεχνολογίας των συστημάτων παραγωγής με σκοπό να μειωθούν οι εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου, όσο στον περιορισμό του κόστους που χρειάζεται για τη μείωση αυτή. Όπως αναφέρει ο (Mundaca, et al., 2010), αυτά τα μοντέλα αποτελούν αναλυτικές παραστάσεις του συστήματος ενέργειας οικονομίας, που περιλαμβάνουν λεπτομερείς περιγραφές των υφιστάμενων και των νέων ενεργειακών τεχνολογιών και μπορούν να προσομοιώσουν εναλλακτικές τεχνολογικές μεθόδους. Η εφαρμογή των μοντέλων αυτών αποφέρει τον προσδιορισμό μέσων χαμηλότερου κόστους για την επίτευξη των στόχων εκπομπών, αλλά και παραμέτρων που αφορούν την κλιματική και την ενέργεια, εκτός του κόστους, συμπεριλαμβανομένων των καλύτερων τεχνολογικών ευκαιριών, του κόστους εναλλακτικών πολιτικών μετριασμού και της δυνατότητας του συστήματος για μεγαλύτερη ενεργειακή απόδοση.

Τα μοντέλα ενεργειακών συστημάτων μπορούν ευρέως να ταξινομηθούν ως μοντέλα βελτιστοποίησης ή μοντέλα προσομοίωσης. Τα μοντέλα βελτιστοποίησης χρησιμοποιούν πληροφορίες σχετικά με το κόστος και τους περιορισμούς των χαρακτηριστικών της τεχνολογίας, για να αξιολογήσουν την τεχνολογία ως «καλύτερη», «λιγότερο δαπανηρή» ή «βέλτιστη». Το μοντέλο θεωρεί πως ο καταναλωτής συμπεριφέρεται λογικά, επιλέγοντας ως συμφέρουσες τις οικονομικότερες λύσεις, ενώ ο ενεργειακός εφοδιασμός πραγματοποιείται σύμφωνα με τις ενεργειακές απαιτήσεις και με τη χρήση των τεχνολογιών με το ελάχιστο δυνατό κόστος. Τα μοντέλα προσομοίωσης έχουν σχεδιαστεί για να καταγράφουν την τεχνολογική και οικονομική δυναμική, όσο το δυνατόν πιο ρεαλιστικά. Αντί να επιδιώκουν να βρουν τη λύση με το χαμηλότερο κόστος, απεικονίζουν τις πιθανές εκβάσεις σε περιπτώσεις πολιτικού σοκ. Υπάρχουν πολλά μοντέλα προσομοίωσης, διαφόρων βαθμών πολυπλοκότητας. Η λειτουργία τους αποτελείται από μια διαδοχική επαναληπτική διαδικασία προσομοίωσης για την εξεύρεση ενός συνόλου λύσεων ισορροπίας μεταξύ του επιπέδου των τιμών και της ζήτησης της αγοράς. Με την εφαρμογή κάθε πιθανής πολιτικής μεταβάλλονται οι τιμές και κατά συνέπεια, πραγματοποιούνται οι απαιτούμενες επαναλήψεις μέχρι να βρεθεί μια νέα ισορροπία. Τα αποτελέσματα είναι πολύ ευαίσθητα στη δυναμική σχέση των παραγόντων της οικονομίας και των τεχνολογιών που χρησιμοποιήθηκαν. Για παράδειγμα, θα είχαμε πολύ διαφορετικά αποτελέσματα, εάν σε μία προσομοίωση λαμβάναμε υπόψη την επίδραση της χρήσης των τεχνολογιών εξόρυξης και αποθήκευσης άνθρακα, συγκριτικά με μία προσομοίωση χωρίς τις τεχνολογίες αυτές.

Το πλεονέκτημα των μοντέλων ενεργειακών συστημάτων είναι η τεχνολογική σαφήνεια και η λεπτομέρεια με την οποία είναι κατασκευασμένα, διότι τους επιτρέπει να εξετάζουν θέματα όπως το πώς οι πολιτικές αποφάσεις μπορούν να προωθήσουν την εμπορευματοποίηση και τη διάδοση της τεχνολογίας. Αντίθετα αυτά τα μοντέλα έχουν επικριθεί για έλλειψη μικροοικονομικού ρεαλισμού και πληρότητας. Τα αποτελέσματα τους θεωρούνται υπερβολικά αισιόδοξα όσον αφορά το ύψος των κερδών που προβλέπουν, όταν εξετάζεται η ενεργειακή αποδοτικότητα με τεχνολογίες χαμηλών εκπομπών, σε σχέση με το αντίστοιχο κέρδος που επιτυγχάνεται με τις φθηνές τεχνολογίες. Μέρος του προβλήματος είναι ότι τα μοντέλα "bottom-up" επικεντρώνονται κυρίως στο οικονομικό κόστος, χωρίς να λαμβάνουν υπόψη παράγοντες όπως οι μεγαλύτεροι κίνδυνοι, τα μεγαλύτερα κόστη και οι μεγαλύτερες περιόδους αποπληρωμής που σχετίζονται με επενδύσεις στον ενεργειακό τομέα.

Παρακάτω παρατίθεται ένας πίνακας με τα κυριότερα μοντέλα ενεργειακών συστημάτων:

Πίνακας 2.2 Τεχνολογικές αλλαγές και αντιμετώπιση αβεβαιότητας που παρουσιάζουν τα ενεργειακά μοντέλα

Μοντέλο	Τεχνολογικές Αλλαγές		Αντιμετώπιση Αβεβαιότητας		Παράγοντες αβεβαιότητας
	Ενδογενείς	Εξωγενείς	Ντετερμινιστικό	Στοχαστικό	
DNE21+	✓	✓	Ανάλυση σεναρίων		Κόστος των δυνατοτήτων μείωσης των εκπομπών (Akimoto, et al., 2010), επίδραση πολιτικών, φόρος του άνθρακα, επίπεδα σταθεροποίησης (Akimoto, et al., 2004), ζήτηση (Yamaji, et al., 2000)
EFOM		✓	Ανάλυση σεναρίων		Στρατηγικές ελαχιστοποίησης κόστους (Van der Voort, 1982), αύξηση της ζήτησης για ηλεκτρική (Plinkie, et al., 1990)
ERIS	✓		Ανάλυση σεναρίων Ανάλυση ευαισθησίας	Υποκειμενική πιθανότητα	Τεχνολογική διαδικασία μάθησης (Kypreos, et al., 2000), βαθμός απόσβεσης (Barreto & Kypreos, 2004)
GENIE	✓		Ανάλυση σεναρίων		Τεχνολογικά επενδυτικά προφίλ, πολιτική μετριασμού (Mattsson & Wene, 1997)
GET-LFL	✓		Ανάλυση σεναρίων		Επίπεδα σταθεροποίησης των εκπομπών, τεχνολογικές αλλαγές (Hedenus, et al., 2006)
MARKAL/TIMES	✓	✓	Ανάλυση σεναρίων Ανάλυση ευαισθησίας	Στοχαστικός προγραμματισμός Monte Carlo ανάλυση (Seebregts, et al., 2002)	Βαθμός εκπτώσεων, τιμές ορυκτών καυσίμων, περιορισμοί εκπομπών (Seebregts, et al., 2000), εξωτερικές δαπάνες (Rafaj & Kypreos, 2007)
MEDEE 2		✓	Ανάλυση σεναρίων		Μείγμα πολιτικών (Lapillonne, 1980)
MESSAGE		✓	Ανάλυση σεναρίων Ανάλυση ευαισθησίας		Βαθμός εκπτώσεων, χρόνος λειτουργίας των ανεμογεννητριών, κόστος των πυρηνικών σταθμών κατά τη διάρκεια της νύχτας (Hainoun, et al., 2010), ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας, περιορισμοί αερίων του θερμοκηπίου (Sullivan, et al., 2013)

Μοντέλο	Τεχνολογικές Αλλαγές		Αντιμετώπιση Αβεβαιότητας		Παράγοντες αβεβαιότητας
	Ενδογενείς	Εξωγενείς	Ντετερμινιστικό	Στοχαστικό	
MOEM		✓	Ανάλυση σεναρίων		
NEMS		✓	Ανάλυση σεναρίων		Προφίλ ηλεκτρικών φορτωτικών οχημάτων (Yu, 2008)
POLES	✓		Ανάλυση σεναρίων		Κλιματική αλλαγή (Mima & Criqui, 2009), σταθεροποίηση εκπομπών (Kitous, et al., 2010)
PRIMES		✓	Ανάλυση σεναρίων		Μείωση εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα (Capros, et al., 1999)), κλίμακα της κλιματικής δραστηριοποίησης, καθυστερήσεις στην κλιματική δράση, καθυστερήσεις τεχνολογικής διάχυσης (Capros, et al., 2012)
WEM		✓	Ανάλυση σεναρίων		Μείγμα πολιτικών (Kesicki & Yanagisawa, 2015)

2.2.2 Το μοντέλο MOEM

Ο σκοπός του μοντέλου MOEM (Model of Optimal Energy Mix) είναι να επιλύσει το πρόβλημα βελτιστοποίησης ενός ενδιαφερόμενου, ο οποίος επιθυμεί να ελαχιστοποιήσει το συνολικό κόστος του ενεργειακού συστήματος, το οποίο περιλαμβάνει τόσο τα αρχικά κεφαλαιουχικά έξοδα όσο και τα λειτουργικά έξοδα, αφού εφαρμοστούν οι σχετικοί φυσικοί, οικονομικοί και τεχνολογικοί περιορισμοί. Τα αποτελέσματα του μοντέλου απεικονίζουν ουσιαστικά την εξέλιξη του μείγματος της ηλεκτρικής ενέργειας, τη χρήση των διάφορων ενεργειακών πόρων και εκπομπών, από το 2015 έως το 2050.

Παρακάτω αναφέρονται ενδεικτικά, κάποιες παράμετροι που λαμβάνει υπόψη του το MOEM:

- Η εξέλιξη του κόστους για βασικές τεχνολογίες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας
- Η διαθεσιμότητα (σε ετήσιο βάση) των εγχώριων πόρων και ανώτατων ορίων κατά την εισαγωγή
- Ο χρόνος που απαιτείται για την κατασκευή ορυχείων και σταθμών ηλεκτροπαραγωγής
- Αύξηση της ετήσιας ζήτησης της ηλεκτρικής ενέργειας

- Μεταβολές στη ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας ανάλογα με τις ώρες και τις ημέρες κατά τη διάρκεια του έτους
- Ζήτηση της θερμότητας στο δίκτυο θέρμανσης που συνδέεται με μονάδες Συμπαραγωγής Ηλεκτρισμού & Θερμότητας
- Μεταβολή της τιμής των εκπομπών του διοξειδίου του άνθρακα.

2.2.3 Περιορισμοί

Το μοντέλο έχει τρεις βασικούς περιορισμούς. Αρχικά δεν λαμβάνει σοβαρά υπόψη τη διακοπτόμενη λειτουργία των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, αντιθέτως απλουστεύει τη σύνθετη εφαρμογή και σύνδεση τους. Επιπλέον υποθέτει ότι η εξέλιξη του κόστους των τεχνολογιών, αποτελεί εξωγενή παράγοντα, όπως επίσης και η ζήτηση.

2.3 Ενσωμάτωση των δύο μοντέλων

Υπάρχουν τρία αποτελέσματα (έξοδοι) του μοντέλου MOEM, που χρησιμοποιούνται ως δεδομένα (είσοδοι) στο μοντέλο MEMO:

- Οι αλλαγές στη χρήση ορυκτών καυσίμων: φυσικό αέριο και άνθρακας (δεν χρησιμοποιείται το πετρέλαιο στον τομέα της ενέργειας στην Πολωνία)
- Το κόστος του ενεργειακού συστήματος που υπολογίζεται, όπως το Αρχικό Κεφάλαιο και οι Λειτουργικές Δαπάνες, διαιρούνται με την ποσότητα της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας.
- Οι Κεφαλαιουχικές δαπάνες-Αρχικό Κεφάλαιο

Στις προσομοιώσεις γενικής ισορροπίας, η ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας που προβλέπεται από το μοντέλο MEMO μπορεί να είναι διαφορετική από την αντίστοιχη ζήτηση που προβλέπεται από το μοντέλο MOEM. Συγκεκριμένα, το μοντέλο MOEM δεν λαμβάνει υπόψη ότι η αύξηση των τιμών της ηλεκτρικής ενέργειας θα μειώσει τη ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας. Για να λάβουμε υπόψη μας αυτήν την παράμετρο στο μοντέλο MEMO, μεταβάλλουμε τη χρήση των ορυκτών καυσίμων και τις κεφαλαιουχικές δαπάνες, αναλογικά με τη ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας που προσομοιώσαμε αλλά και με τη σταθερή ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας. Για παράδειγμα, αν το μοντέλο MEMO, εξετάζοντας το σενάριο πλήρους απαλλαγής από τον άνθρακα, προβλέψει ότι η αύξηση των τιμών ηλεκτρικής ενέργειας, οδηγεί σε πτώση της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας κατά 10%, οι κεφαλαιουχικές δαπάνες και οι αλλαγές στη χρήση πόρων που προβλέπονται από το μοντέλο MOEM, θα μεταβληθούν με συντελεστή 0,9 για το μοντέλο MEMO.

2.4 Ασαφείς γνωστικοί χάρτες

Πληθώρα μοντέλων και ποσοτικών μεθοδολογιών έχουν προσπαθήσει να αποτυπώσουν και να αξιολογήσουν τις περιβαλλοντικές πολιτικές μείωσης εκπομπών των αερίων του θερμοκηπίου. Ωστόσο, στο σύνολο τους φαίνεται να παρουσιάζουν κάποιες αδυναμίες, όπως η δυσκολία να διευρύνουν τα ευρήματα τους σε παραπάνω από έναν τομείς, να ενσωματώσουν κάποιους αστάθμητους παράγοντες, κινδύνους ή αβεβαιότητες, καθώς και να συνυπολογίσουν τις κοινωνικοοικονομικές διαστάσεις της κλιματικής αλλαγής. Αυτό το κενό, έρχονται να καλύψουν οι ασαφείς γνωστικοί χάρτες (FCM).

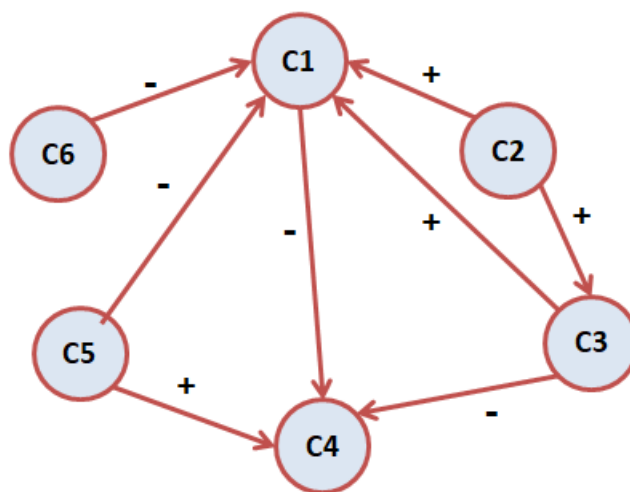
Παρά την αδιαμφισβήτητη συμβολή τους, τα προαναφερθέντα ποσοτικά μοντέλα αποτελούνται από υποθέσεις και απλουστεύσεις, διότι σε πρώτη φάση περιορίζονται κατασκευαστικά από την υπολογιστική ισχύ και σε δεύτερη φάση χρειάζεται να είναι κατανοητά στους μελετητές, χωρίς υπερβολική περιπλοκότητα. Δυστυχώς όμως στην προσπάθεια τους για απλούστευση των δεδομένων τους, τείνουν να είναι τεχνικά υπερβολικά περίπλοκα για να κατασκευαστούν ή να γίνουν αντιληπτά. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα, οι υπεύθυνοι για τη χάραξη περιβαλλοντικών πολιτικών να θεωρήσουν αυτά τα μοντέλα, λόγω της πολυπλοκότητας τους, ακατάλληλα να μετατρέψουν τις δικές τους ιδέες σε πολιτικές ή δράσεις και διστάζουν να εμπιστευτούν τα αποτελέσματά τους. Είναι συνεπώς ζωτικής σημασίας να δημιουργηθούν μέθοδοι που να έχουν τη δυνατότητα, να μοντελοποιούν περίπλοκα συστήματα και ταυτόχρονα να συνυπολογίζουν την υπάρχουσα γνώση και ανθρώπινη εμπειρία. Τέτοιες μέθοδοι ταιριάζουν στη χάραξη περιβαλλοντικών πολιτικών σε εθνικό επίπεδο, διότι εκτός από τις τεχνολογικές και οικονομικές ιδιαιτερότητες μιας χώρας, είναι απαραίτητο να ενσωματώνονται οι γνώσεις από τους εμπειρογνώμονες σχετικά με τις αβεβαιότητες και τους κινδύνους, όταν δεν υπάρχουν διαθέσιμα ποσοτικά στοιχεία ή όταν η εύρεση τους είναι εξαιρετικά δαπανηρή.

Σε αυτή τη μελέτη, οι ασαφείς γνωστικοί χάρτες (Fuzzy Cognitive Maps – FCM) προτείνονται ως μία τέτοια μεθοδολογία, για τη μοντελοποίηση του πολύπλοκου προβλήματος, που είναι η εξεύρεση μιας πολιτικής μετριασμού των επιπτώσεων της αλλαγής του κλίματος, σύμφωνα με την Ευρωπαϊκή Ένωση. Τα FCM είναι ασαφείς δομές, που μοιάζουν έντονα με νευρωνικά δίκτυα και χρησιμοποιούνται συχνά ως κατάλληλο εργαλείο για τη μοντελοποίηση σύνθετων συστημάτων. Οι Özsemi και Özsemi (2004), συζητούν εκτενώς τους λόγους για τους οποίους να επιλέξουμε τα FCM, όταν ασχολούμαστε με περιβαλλοντικά προβλήματα, έναντι άλλων μεθόδων μοντελοποίησης, όπως τα δυναμικά μοντέλα ή η πολυκριτηριακή ανάλυση αποφάσεων. Το πιο σημαντικό πλεονέκτημα των FCM, ειδικά σε σχέση με τα ποσοτικά μοντέλα, είναι η ανεξαρτησία τους από τη διαθεσιμότητα των δεδομένων· η ευρωστία τους δεν

εξαρτάται από διαδικασίες που απαιτούν μεγάλο όγκο δεδομένων. Επιπλέον, λαμβάνοντας υπόψη πως το θεμέλιο πάνω στο οποίο έχουν βασιστεί είναι η ανθρώπινη εξειδικευμένη γνώση, είναι ιδιαίτερα ευέλικτα και εύκολο να συμπεριλάβουν τις κοινωνικές επιδράσεις. Στη συνέχεια αναλύουμε εις βάθος τη σημασία των επί μέρους εννοιών των Ασαφών Γνωστικών Χαρτών.

Αρχικά, αξίζει να τονιστεί ότι, ως γνωστική χαρτογράφηση ορίζουμε, μια ποιοτική τεχνική που στοχεύει να συλλάβει την αντίληψη ενός ατόμου για ένα συγκεκριμένο ζήτημα και να την μετατρέψει σε διαγραμματική μορφή. Παρέχει τόσο στον αναλυτή όσο και στον ερωτώμενο ένα εργαλείο που δεν περιορίζεται από αυστηρή δομή και μέσω του οποίου μπορούν να αποκτηθούν πρόσθετες γνώσεις. Σε αυτό το πλαίσιο, ένας χάρτης εστιάζει στις αξίες, τις πεποιθήσεις και τις υποθέσεις ενός ατόμου σχετικά με έναν συγκεκριμένο τομέα και αποκαλύπτει τη συσχέτιση που έχουν αυτές μεταξύ τους, παρέχοντας πληροφορίες σχετικά με το πώς η αλλαγή του ενός θέματος μπορεί να επηρεάσει τα άλλα. Επομένως, ένας γνωστικός χάρτης μπορεί να οριστεί ως η γραφική αναπαράσταση ενός συστήματος, στον οποίο οι κόμβοι αντιπροσωπεύουν έννοιες ή ιδέες και οι βρόχοι, τις μεταξύ τους σχέσεις.

Οι αιτιώδεις σχέσεις μεταξύ αυτών των εννοιών αναπαρίστανται από τις ακμές οι οποίες είναι θετικά ή αρνητικά προσανατολισμένες ώστε να φαίνεται αρχικά η κατεύθυνση της επίδρασης και στη συνέχεια η προαγωγική ή η ανασταλτική δράση αντίστοιχα. Μπορούμε να δούμε ένα παράδειγμα γνωστικού χάρτη στο **Σχήμα 2.1**, όπου έχουμε πέντε κόμβους που αντιπροσωπεύουν έννοιες ενός θέματος προς μελέτη και τα βέλη δείχνουν τις σχέσεις επιρροής μεταξύ τους. Σε κάθε βέλος υπάρχει ένα σύμβολο «+» ή «-» που φανερώνει αν η επίδραση είναι θετική ή αρνητική.



Σχήμα 2.1 Παράδειγμα γνωστικής χαρτογράφησης

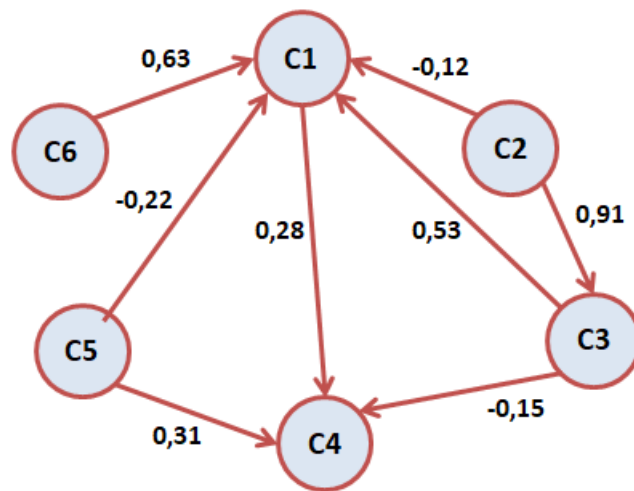
Επιπλέον κάθε γνωστικός χάρτης διαθέτει ένα μοναδικό πίνακα γειτνίασης $A = [a_{ij}]$ που επεξηγεί περαιτέρω τη δομή του, δηλαδή τον τρόπο σύνδεσης των εννοιών μεταξύ τους. Ο πίνακας γειτνίασης είναι ένας τετραγωνικός πίνακας που περιλαμβάνει όλες τις έννοιες ομοιόμορφα κατανομημένες, τόσο στον κάθετο όσο και στον οριζόντιο άξονα. Ο παρακάτω πίνακας γειτνίασης, περιγράφει την αιτιώδη σύνδεση μεταξύ των εννοιών C_i και C_j : αν υπάρχει θετική αλληλεπίδραση, τότε $a_{ij} = 1$, ενώ αν είναι αρνητική, τότε $a_{ij} = -1$ και κατ'επέκταση, αν οι έννοιες είναι ασυσχέτιστες, τότε $a_{ij} = 0$. Συνεπώς, αν $a_{ij} = 1$ ή $a_{ij} = -1$, τότε η έννοια C_i θεωρείται αιτία της έννοιας C_j , άρα και η έννοια C_j θεωρείται το αποτέλεσμα της C_i , ενώ αν η επίδραση είναι θετική ή αρνητική καθορίζεται από το πρόσημο.

Πίνακας 2.3 Πίνακας γειτνίασης του γνωστικού χάρτη του Σχήματος Σχήμα 2.1.

	C1	C2	C3	C4	C5	C6
C1	0	0	0	-1	0	0
C2	1	0	1	0	0	0
C3	1	0	0	-1	0	0
C4	0	0	0	0	0	0
C5	-1	0	0	1	0	0
C6	-1	0	0	0	0	0

Η έννοια της ασάφειας εισήχθη στους γνωστικούς χάρτες από τον Kosko (1986), ο οποίος πρότεινε τη χρησιμότητα των Ασαφών Γνωστικών Χαρτών (FCM) σε εκείνους τους επιστημονικούς τομείς, που περιλαμβάνουν υψηλό βαθμό αβεβαιότητας. Η βασική διαφορά μεταξύ των FCM (Ασαφών Γνωστικών Χαρτών) και των C.M (Γνωστικών Χαρτών) είναι ότι οι αιτιώδεις σχέσεις μεταξύ των κόμβων αποκτούν βαρύτητα, δηλαδή προστίθεται ένας αριθμός που χαρακτηρίζει την αλληλεπίδραση τους, ώστε να εκφραστεί ο βαθμός επιρροής των δύο εννοιών. Επομένως, ένας ασαφής γνωστικός χάρτης περιγράφεται από έναν πίνακα γειτνίασης και έναν πίνακα βαρών $W = [W_{ij}]$. Οι είσοδοι στον πίνακα βαρών ενός FCM δεν είναι δυαδικοί αριθμοί (0 ή 1), αλλά μπορεί να πάρουν οποιοδήποτε αριθμό εντός του διαστήματος $[-1,1]$. Οπότε εάν υπάρχει μια θετικά προσανατολισμένη σχέση αλληλεπίδρασης από μια έννοια C_i σε

μια έννοια C_j , τότε η τιμή του w_{ij} , θα πάρει τιμές εντός του διαστήματος $(0, 1]$ ενώ το w_{ij} θα κυμανθεί εντός του διαστήματος $[-1, 0)$, αν μια θετική μεταβολή στην έννοια C_i οδηγεί σε μείωση της έννοιας C_j . Τέλος, αν δεν υπάρχει καμία σχέση μεταξύ των δύο εννοιών τότε $w_{ij} = 0$. Στο **Σχήμα 2.2** φαίνεται το ίδιο παράδειγμα FCM, που πραγματοποιήσαμε παραπάνω, αλλά διαφέρει ως προς στην προσήμανση του κάθε βέλους, όπου έχει προστεθεί ένα βάρος, αντί για απλό πρόσημο, που αναδεικνύει τον βαθμό επίδρασης της μιας έννοιας στην άλλη, ενώ ο **Πίνακας 2.4** Πίνακας γειτνίασης του γνωστικού χάρτη του Σχήματος **2.2**. αποτελεί τον πίνακα βαρών του συγκεκριμένου FCM.



Σχήμα 2.2 Παράδειγμα ασαφούς γνωστικού χάρτη.

Πίνακας 2.4 Πίνακας γειτνίασης του γνωστικού χάρτη του Σχήματος **2.2**.

	C1	C2	C3	C4	C5	C6
C1	0	0	0	0,28	0	0
C2	-0,12	0	0,91	0	0	0
C3	0,53	0	0	-0,15	0	0
C4	0	0	0	0	0	0
C5	-0,22	0	0	0,31	0	0
C6	0,63	0	0	0	0	0

3 Κλασική Οικονομική Ανάλυση

3.1 Βασικές έννοιες

Βρισκόμαστε αντιμέτωποι με το δίλημμα δύο εναλλακτικών πολιτικών για την πολωνική οικονομία: τη βασική γραμμή δράσης και την πλήρη απαλλαγή του ενεργειακού συστήματος από τον άνθρακα, εξετάζοντας παράλληλα και τους κινδύνους που συνδέονται με αυτά τα δύο μονοπάτια.

Ορίζουμε ως βασική γραμμή δράσης, τη διαδρομή που θα ακολουθούσε ο κεντρικός αρμόδιος σχεδιαστής, με στόχο την ελαχιστοποίηση του κόστους του ενεργειακού συστήματος υπό από το κατώφλι των οικονομικών και τεχνολογικών περιορισμών. Υποθέτουμε ότι ο σχεδιαστής αυτός λαμβάνει υπόψη την αναμενόμενη εξέλιξη του κόστους των τεχνολογιών, όπως προέβλεψαν οι (Hand, et al., 2017), την αύξηση των τιμών των αδειών εκπομπής, στο πλαίσιο των τιμών που επιβάλλονται από την Ευρωπαϊκή Ένωση (ETS), από 5 €/τόνοι CO_2 το 2017 έως 80 €/τόνοι CO_2 το 2050) και τέλος την περιορισμένη διαθεσιμότητα πόρων. Αν και ο αρμόδιος σχεδιαστής υπολογίζει τον φόρο εκπομπών που έχει καθοριστεί από την Ευρωπαϊκή Ένωση, δεν λαμβάνει υπόψη τα όρια των συνολικών εκπομπών από τον τομέα της ηλεκτρικής ενέργειας.

Από την άλλη, το μονοπάτι της πλήρους απαλλαγής από τον άνθρακα, συνεπάγεται πως ακολουθούμε μια πορεία που βασίζεται στις ίδιες υποθέσεις και έχει τον ίδιο στόχο όπως και αυτή της βασικής οδού, δηλαδή την ελαχιστοποίηση του κόστους του ενεργειακού συστήματος, αλλά με τον επιπρόσθετο περιορισμό της τριπλάσιας μείωσης των εκπομπών από τον τομέα ενέργειας: από 137 εκατομμύρια τόνους το 2015 στα 45 εκατομμύρια τόνους το 2050.

Τέλος με τον όρο κίνδυνο, εννοούμε τη δυνατότητα ενός φαινομένου, μιας δράσης ή μιας πολιτικής, όταν το αποτέλεσμα είναι αβέβαιο, να προκαλέσει αρνητικές συνέπειες στους οικονομικούς, κοινωνικούς και πολιτιστικούς μας πόρους. Παρόλο που στη μελέτη μας

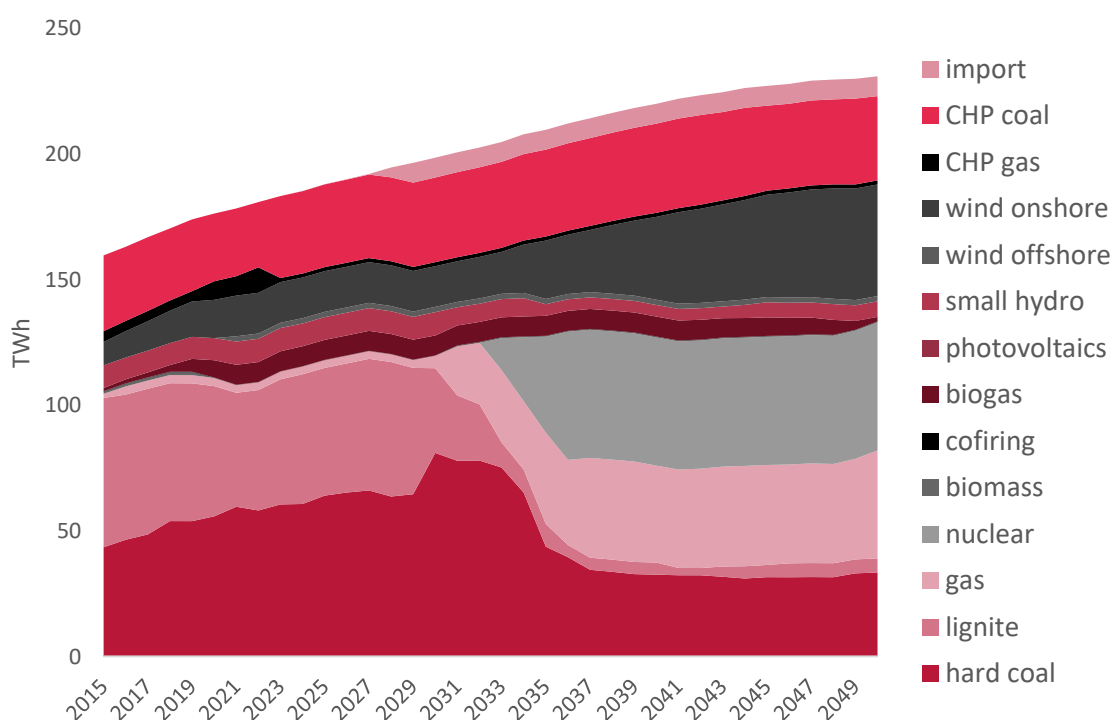
εστιάζουμε στους οικονομικούς κινδύνους, προσπαθούμε παράλληλα, να εντοπίσουμε και να εξετάσουμε τους σημαντικότερους κινδύνους, που είναι έμμεσα συνυφασμένοι με την οικονομία, όπως η απώλεια της διεθνούς φήμης.

Αφού αναλύσαμε τις βασικές έννοιες, στη συνέχεια του κεφαλαίου θα πραγματοποιηθεί ανάλυση του ενεργειακού συστήματος μέσω της εύρεσης του βέλτιστου μείγματος ενέργειας με το μοντέλο MOEM.

3.2 Εύρεση του βέλτιστου ενεργειακού μείγματος

3.2.1 Βασική γραμμή Δράσης

Αυτή η πορεία ελαχιστοποιεί το κόστος του ενεργειακού συστήματος υπό την προϋπόθεση αύξησης των τιμών που επιβάλλει η Ε.Ε (ETS). Δεν υφίστανται άλλοι περιορισμοί όσον αφορά τις επιτρεπόμενες εκπομπές. Η πορεία που ικανοποιεί αυτά τα κριτήρια σύμφωνα με το μοντέλο MOEM φαίνεται στο σχήμα 3.1 .



Σχήμα 3.1 Βέλτιστο μείγμα ηλεκτρικής ενέργειας στη βασική γραμμή δράσης

Μέχρι το 2030, το μείγμα ηλεκτρικής ενέργειας αλλάζει ελάχιστα. Υπάρχει μια σχετικά μικρή μείωση του μεριδίου του άνθρακα και μια μέτρια αύξηση των χερσαίων αιολικών. Η προσομοίωση υποδηλώνει επίσης ότι το βιοαέριο, το οποίο απουσιάζει από την αρχή της

εξεταζόμενης περιόδου, επιτυγχάνει να καταλαμβάνει ένα αξιοσημείωτο μερίδιο μέχρι το 2030. Η συμβολή των άλλων πηγών δεν μεταβάλλεται σημαντικά.

Η δεκαετία του 2030 ξεκινάει με ταχεία πτώση του λιγνίτη, εξαιτίας της εξάντλησης των υφιστάμενων ορυχείων και της κατασκευής νέων. Παρόμοια πτώση προβλέπεται σε όλα τα σενάρια που εξετάζονται. Ο λιγνίτης αντικαθίσταται αρχικά από λιθάνθρακα (αυξάνεται η χρήση του από 39εκατ. τόνους το 2020 σε 52 εκατ. τόνους το 2030) και αργότερα από φυσικό αέριο (αύξηση από 1.3 δισεκατ. κυβικά μέτρα το 2030 σε 7.2 δισεκατ. κυβικά μέτρα το 2040).

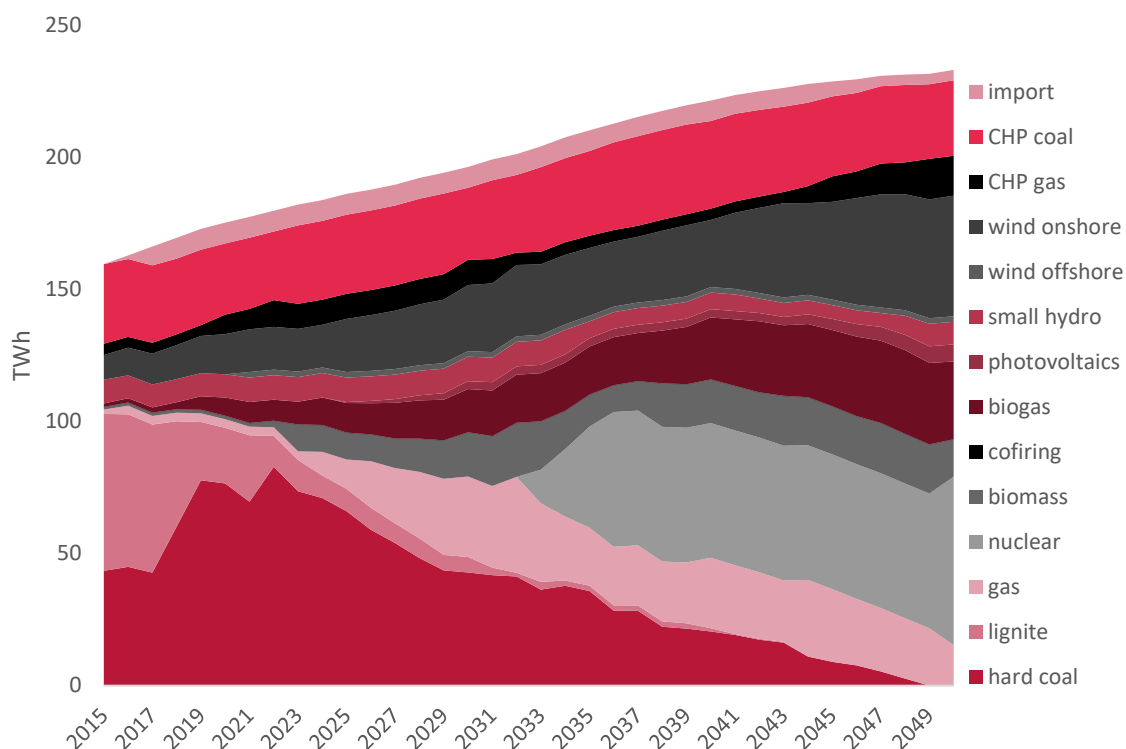
Μεταξύ 2032 και 2035, η ολοκλήρωση της κατασκευής πυρηνικού σταθμού οδηγεί σε μια σημαντική μείωση του μεριδίου της λιθάνθρακα, από 51εκατ. τόνους σε 36 εκατ. τόνους, επειδή οι δαπάνες που συνδέονται με την ηλεκτρική ενέργεια από άνθρακα συνδέονται από τις υψηλές τιμές που επιβάλλει η Ευρωπαϊκή Ένωση (ETS).

Η τελευταία περίοδος της ανάλυσης μας, μεταξύ 2035 και 2050, παρουσιάζει αύξηση του μεριδίου των Α.Π.Ε, ιδίως της χερσαίας αιολικής ενέργειας. Αυτό οφείλεται στη μείωση των δαπανών της τεχνολογίας των ΑΠΕ (Hand, et al., 2017).

Υπάρχουν διάφορες γενικές παρατηρήσεις σχετικά με τη βασική γραμμή δράσης. Αρχικά, η βέλτιστη λύση, δεδομένου της προαναφερθείσας αύξησης των τιμών από την Ευρωπαϊκή Ένωση (ETS), συνεπάγεται μια σημαντική συρρίκνωση του μεριδίου του άνθρακα. Δεύτερον, παρά τη μεγάλη πτώση των τιμών εγκατάστασης του χερσαίων αιολικών πάρκων που προβλέπεται από τους (Hand, et al., 2017), δεν παρατηρείται αντίστοιχη ενεργειακή επένδυση μέχρι τα τέλη του 2030. Τρίτον, παρά το υψηλό κόστος των πυρηνικών, το οποίο ανέρχεται στο επίπεδο των 25,8 εκατ. PLN (6 εκατ. ευρώ) ανά MW, τα πυρηνικά εμφανίζονται στο βασικό σενάριο, αν και δεν θα καταστούν διαθέσιμα πριν από το 2035, λόγω της χρονοβόρας κατασκευής τους. Τέλος, ορισμένες πηγές (ηλιακή) δεν εισέρχονται στο μείγμα, παρότι υποθέτουμε μια απότομη μείωση του αντίστοιχου κόστους τους σύμφωνα με τα σενάρια πρόβλεψης του (Hand, et al., 2017)

3.2.2 Πλήρης απεξάρτηση από τον άνθρακα

Το μονοπάτι πλήρους απαλλαγής από τον άνθρακα που αποτυπώνεται από τις προσομοιώσεις του μοντέλου MOEM, στο παρακάτω διάγραμμα, αναλύεται σε διάφορες φάσεις.



Σχήμα 3.2 Βέλτιστο μείγμα ηλεκτρικής ενέργειας στο σενάριο της πλήρους απαλλαγής από τις εκπομπές αερίου του θερμοκηπίου.

Η πρώτη φάση (μέχρι το 2022) χαρακτηρίζεται από μέτρια μείωση του μεριδίου του άνθρακα. Συγκεκριμένα, η χρήση ηλεκτρικής ενέργειας που προέρχεται από την καύση άνθρακα, μειώνεται από 98 TWh το 2020 σε 94 TWh το 2025 και το μερίδιο αυτό, αντικαθίσταται από την αιολική ενέργεια και το βιοαέριο. Ένα άλλο αξιοσημείωτο στοιχείο αυτής της φάσης είναι η προσωρινή αντικατάσταση του άνθρακα με το φυσικό αέριο σε συμπαραγωγή ηλεκτρισμού και θερμότητας (ΣΗΘ). Η προσομοίωση προβλέπει επίσης μια αντικατάσταση μεγάλης κλίμακας της ηλεκτρικής ενέργειας από λιγνίτη, με ηλεκτρική ενέργεια από λιθάνθρακα, αν και αυτή η πρόβλεψη πρέπει να ληφθεί συντηρητικά. Τα κυβερνητικά σχέδια που αφορούν το λιγνίτη, αναμένουν ότι η παραγωγή θα διατηρηθεί στα ίδια επίπεδα χωρίς σημαντικές αλλαγές έως το 2030. Τα σχέδια αυτά θα μπορούσαν να επαναπροσδιοριστούν μεσοπρόθεσμα, αν καταστεί απαραίτητο, αν και η άμεση προσαρμογή σε πιθανή μεταβολή είναι απίθανη. Επιπλέον, αν και θεωρητικά ο διπλασιασμός της κατανάλωσης λιθάνθρακα θα μπορούσε να επιτευχθεί με την αύξηση των εισαγωγών, ένα τέτοιο σενάριο πιθανότατα δεν θα γίνει δεκτό από τους υπεύθυνους χάραξης πολιτικής, λόγω ανησυχιών σχετικά με ενδεχόμενη απώλεια ενεργειακής ασφάλειας και επάρκειας.

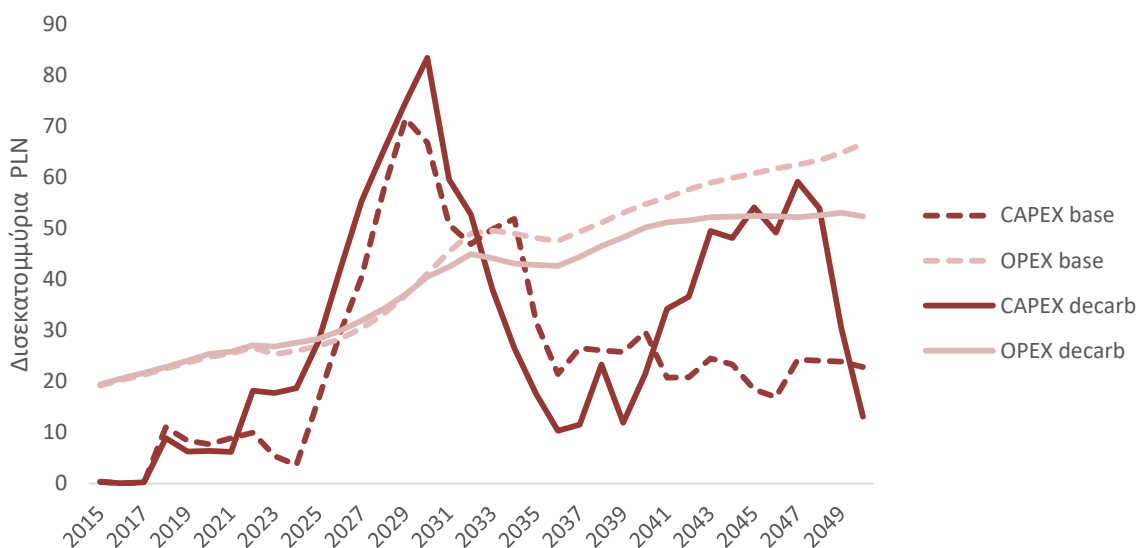
Η δεύτερη φάση, μεταξύ 2022 και 2032, χαρακτηρίζεται από ταχύτερη μείωση της κατανάλωσης του άνθρακα η οποία επιτυγχάνεται με την αύξηση των χερσαίων αιολικών, των βιοκαυσίμων και του προσωρινά του φυσικού αερίου.

Μεταξύ του 2032 και του 2040, η ολοκλήρωση του πυρηνικού σταθμού επιτρέπει τη γρήγορη μείωση του άνθρακα. Η πυρηνική ενέργεια επιτρέπει επίσης τη μείωση της χρήσης του φυσικού αερίου και της βιομάζας και αναχαιτίζει την κατασκευή νέων χερσαίων σταθμών αιολικής ενέργειας. Για την ακρίβεια, η χερσαία αιολική ενέργεια μειώνεται, λόγω της φυσικής φθοράς των παλαιότερων ανεμογεννητριών.

Στην τελευταία φάση, παρατηρούμε μια γρήγορη ανάπτυξη των χερσαίων αιολικών και των ηλιακών φωτοβολταϊκών. Συγκεκριμένα το 2050, η χερσαία αιολική ενέργεια γίνεται η δεύτερη πηγή ηλεκτρικής ενέργειας, μετά την πυρηνική και το μερίδιο ενέργειας που καταλαμβάνει, φτάνει το 20%.

Καταλήγουμε πάλι, σε κάποιες γενικές παρατηρήσεις σχετικά με την εξέλιξη του ενεργειακού μείγματος, όσον αφορά το μονοπάτι εγκατάλειψης του άνθρακα. Αρχικά, όπως είναι αναμενόμενο, ακολουθώντας αυτό το σενάριο, η χρήση του άνθρακα ως μέσο παραγωγής της ηλεκτρικής ενέργειας μειώνεται ραγδαία. Στο τέλος της εξεταζόμενης περιόδου, ο άνθρακας χρησιμοποιείται αποκλειστικά στις μονάδες ΣΗΘ που παράγουν ηλεκτρική ενέργεια μαζί με ατμό, ο οποίος χρησιμοποιείται αργότερα για τα δίκτυα θέρμανσης. Δεύτερον, η πτώση του γίνεται περισσότερο σταδιακά συγκριτικά με τη βασική γραμμή δράσης, γεγονός που υποδηλώνει ότι η μετάβαση των παραγωγικών συντελεστών, κυρίως του εργατικού δυναμικού, από τον τομέα εξόρυξης σε άλλους, ενδέχεται να είναι λιγότερο απότομη από ό,τι στο βασικό σενάριο. Τρίτον, το φυσικό αέριο και η βιομάζα θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν ως μεταβατικό καύσιμο, επιτρέποντας τη μείωση των εκπομπών προσωρινά, μέχρι να ολοκληρωθεί το πυρηνικό εργοστάσιο. Τέλος, τα φωτοβολταϊκά, το βιοαέριο και η βιομάζα έχουν σημαντικό μερίδιο στο μείγμα ηλεκτρικής ενέργειας στο τέλος της εξεταζόμενης περιόδου, σε αντίθεση με το αμελητέο μερίδιο που καταλαμβάνουν στη βασική πορεία δράσης. Συνεπώς, το ενεργειακό μείγμα στο σενάριο αυτό της πλήρους απαλλαγής είναι αρκετά πιο διαφοροποιημένο.

Το αρχικό κεφάλαιο (Α.Κ) και οι λειτουργικές δαπάνες (Λ.Δ) που απαιτούνται από το ενεργειακό σύστημα στο πλαίσιο των δύο δράσεων, παρουσιάζονται στο **Σχήμα 3.3**.



Σχήμα 3.3 Το αρχικό κεφάλαιο (Α.Κ) και οι λειτουργικές δαπάνες (Λ.Δ) που απαιτούνται από το ενεργειακό σύστημα στο πλαίσιο των δύο δράσεων, της βασικής γραμμής δράσης και της πλήρους απαλλαγής από τον άνθρακα.

Παρατηρούμε πως και στις δύο δράσεις, η αιχμή των κεφαλαιουχικών εξόδων εμφανίζεται μεταξύ των ετών 2025 και 2035, λόγω της κατασκευής του πυρηνικού σταθμού. Κατά τη δεκαετία του 2020, το Αρχικό Κεφάλαιο (Α.Κ) στο σενάριο της πλήρους απεξάρτησης από τον άνθρακα είναι μεγαλύτερο, λόγω της κατασκευής εγκαταστάσεων Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (Α.Π.Ε) και σταθμών παραγωγής φυσικού αερίου. Η διαφορά στο Α.Κ μεταξύ των δύο δράσεων στη δεκαετία μεταξύ 2030 και 2040, οφείλεται στην αντίστοιχη χρονική διάρκεια που απαιτείται για την κατασκευή των χερσαίων αιολικών· η ταχεία ανάπτυξη αυτής της χωρητικότητας στη βασική γραμμή δράσης ξεκινά στα μέσα της δεκαετίας του 2030, ενώ στη δράση της πλήρους απαλλαγής, καθυστερεί μέχρι τις αρχές του 2040. Δεδομένου ότι η άνοδος των χερσαίων αιολικών στο σενάριο της πλήρους απεξάρτησης είναι πολύ ταχύτερη, το Α.Κ γίνεται τελικά πολύ μεγαλύτερο από το αντίστοιχο της βασικής γραμμής δράσης.

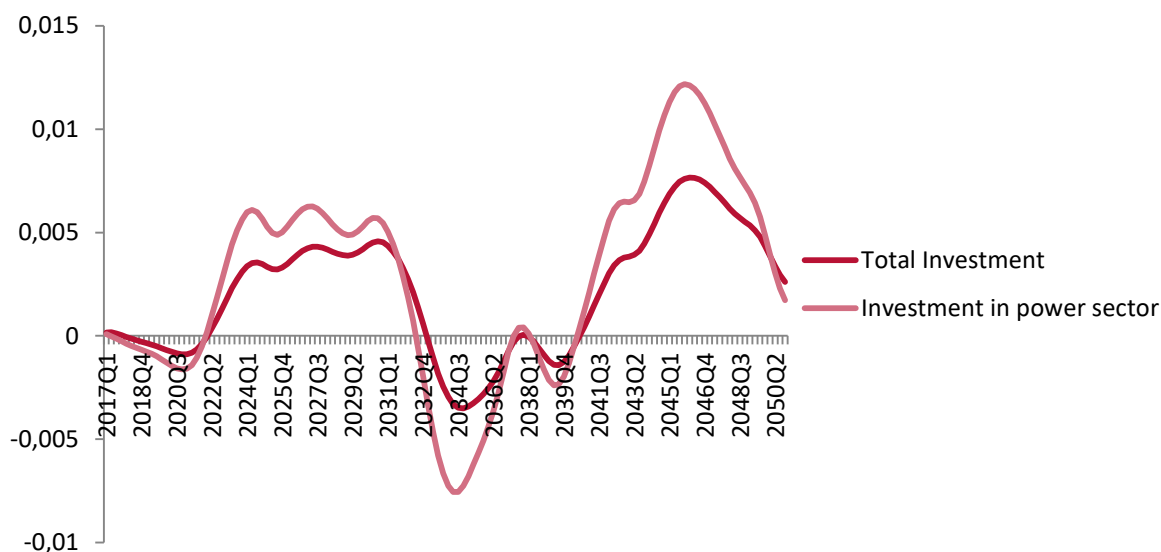
Οι Λειτουργικές Δαπάνες (Λ.Δ) που απεικονίζονται στο **Σχήμα 3.3**, περιλαμβάνουν το κόστος των καυσίμων, το κόστος λειτουργίας και συντήρησης όλων των χρησιμοποιούμενων εγκαταστάσεων, καθώς και το συνολικό κόστος εκπομπών που επιβάλλεται από την Ευρωπαϊκή Ένωση (ETS). Αρχικά, οι Λ.Δ των δύο δράσεων δεν αποκλίνει. Ενώ η βασική πορεία δράσης περιλαμβάνει εκτενέστερη χρήση του άνθρακα και μεγαλύτερες καταβολές για τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου στην Ευρωπαϊκή Ένωση, η δράση της πλήρους απαλλαγής από τις ανθρακούχες εκπομπές απαιτεί μεγαλύτερη χρήση βιομάζας, βιοαερίου και φυσικού αερίου. Η διαφορά μεταξύ των δύο δράσεων γίνεται περισσότερο αντιληπτή από στη δεκαετία του 2030 και μετά, όπου οι τιμές που επιβάλλονται από την Ευρωπαϊκή Ένωση γίνονται πολύ υψηλές.

3.3 Μακροοικονομική Ανάλυση Γενικής Ισορροπίας

Σε αυτό το κεφάλαιο θα παρουσιάσουμε τις μακροοικονομικές συνέπειες της μετάβασης από την υφιστάμενη πολιτική που εξαρτάται από τον άνθρακα, σε μία πολιτική πλήρους απαλλαγής από αυτόν, χρησιμοποιώντας το μοντέλο MEMO. Τα σχήματα που ακολουθούν, δείχνουν την πορεία των βασικών μακροοικονομικών δεικτών στο σενάριο εγκατάλειψης του άνθρακα, συγκριτικά με τη βασική γραμμή δράσης. Τα αποτελέσματα εκφράζονται ως εκατοστιαία απόκλιση από τα αντίστοιχα της πορείας της βασικής γραμμής δράσης. Η σχετική θέση των σημείων με τον άξονα y υποδηλώνει την αξία της μεταβλητής: τα σημεία πάνω από το μηδέν του άξονα y εκφράζουν ότι η μεταβλητή παίρνει μεγαλύτερη τιμή στο σενάριο απαλλαγής από τον άνθρακα, από ότι στην οδό βασικής γραμμής δράσης, ενώ τα σημεία κάτω από το μηδέν σημαίνουν το αντίθετο.

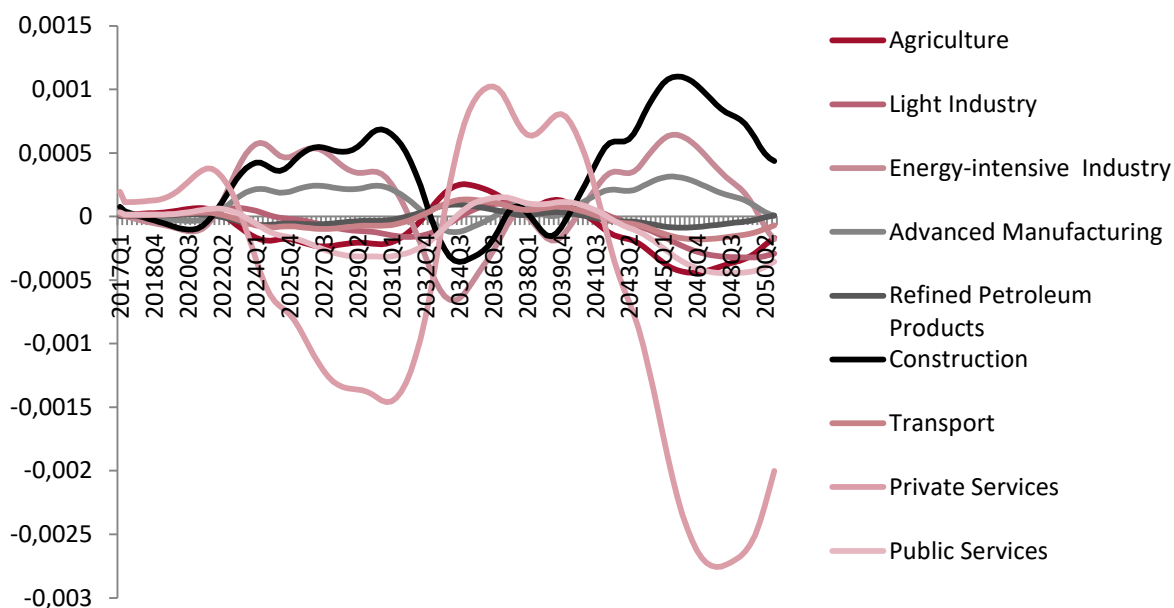
Η απεξάρτηση του ενεργειακού μας συστήματος από τον άνθρακα και τις εκπομπές του, έχει ως άμεση συνέπεια την αύξηση των επενδύσεων που σχετίζονται με τον ενεργειακό τομέα, όπως βλέπουμε στο **Σχήμα 3.4**. Αυτή η μεταβλητή δικαιολογεί τη διαφορά στο Α.Κ μεταξύ των δύο δράσεων που κλιμακώνονται από το ΑΕΠ. Κατά μέσο όρο, οι επενδύσεις που απαιτούνται στο σενάριο απαλλαγής από τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα είναι μεγαλύτερες κατά 0,5% του ΑΕΠ, αν και η διαφορά αυτή κυμαίνεται διαχρονικά.

Οι επενδύσεις στον τομέα της ενέργειας πλήττουν τις επενδύσεις σε άλλους τομείς της οικονομίας (**Σχήμα 3.4**), διότι αυξάνεται η τιμή των αγαθών που είναι απαραίτητα για την επένδυση. Συγκεκριμένα οι επενδύσεις που συνδέονται με τη μείωση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα αυξάνουν τη ζήτηση για κατασκευές και την παραγωγή των βιομηχανικών τομέων, οι οποίοι δεν μπορούν να αντεπεξέλθουν γρήγορα στο βραχυπρόθεσμο ορίζοντα, με αποτέλεσμα την αύξηση της τιμής των αγαθών τους. Συνεπώς, οι επενδύσεις σε άλλους οικονομικούς τομείς καθίστανται πιο δαπανηρές και οι αποδόσεις μειώνονται, οδηγώντας σε λιγότερα επενδυτικά έργα να πραγματοποιούνται σε εκείνα τα οικονομικά τμήματα. Παρόμοια κατάσταση έχει συζητηθεί και από τους Bernardo και D'Alessandro (2016). Ωστόσο η αύξηση των επενδύσεων στον ενεργειακό τομέα οδηγεί σε αύξηση της συνολικής επένδυσης, παρόλο που η τελευταία είναι μικρότερη και καθυστερεί. Για αυτό το λόγο επιβεβαιώνεται πως η διαφορά αυτή μεταξύ των επενδύσεων του ενεργειακού τομέα και των συνολικών επενδύσεων πρέπει να αντισταθμιστεί από τη μείωση των επενδύσεων στους υπόλοιπους τομείς της οικονομίας.



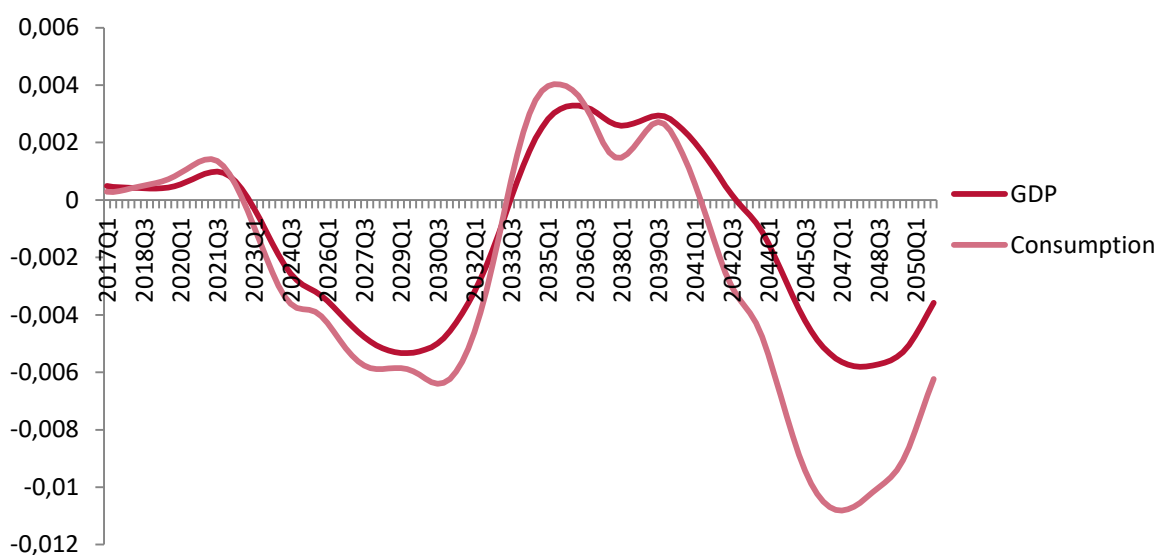
Σχήμα 3.4 Η διαφορά μεταξύ των δύο σεναρίων δράσης-πλήρης απαλλαγή και βασική γραμμή δράσης- στο πλαίσιο της συνολικής επένδυσης και της επένδυσης μόνο στον ενεργειακό τομέα.

Αυτή η κατάσταση στον επενδυτικό τομέα συνεπάγεται με τη σειρά της, ελάττωση της παραγωγής στους περισσότερους τομείς μεσοπρόθεσμα. Όπως βλέπουμε στο **Σχήμα 3.5** παρακάτω, η μεγαλύτερη μείωση παρατηρείται στον κλάδο των υπηρεσιών (0,3% σε σχέση με τη βασική γραμμή δράσης). Αντίστοιχη κατάληξη, αν και με μικρότερο εύρος, παρατηρείται σε όλους σχεδόν τους άλλους τομείς με εξαίρεση τον βιομηχανικό και τον κατασκευαστικό. Η παραγωγή αυτών των δύο τομέων λειτουργεί αντίστροφα· πρέπει να αυξηθεί προκειμένου να ικανοποιηθεί η αυξημένη ζήτηση των συνολικών επενδύσεων.



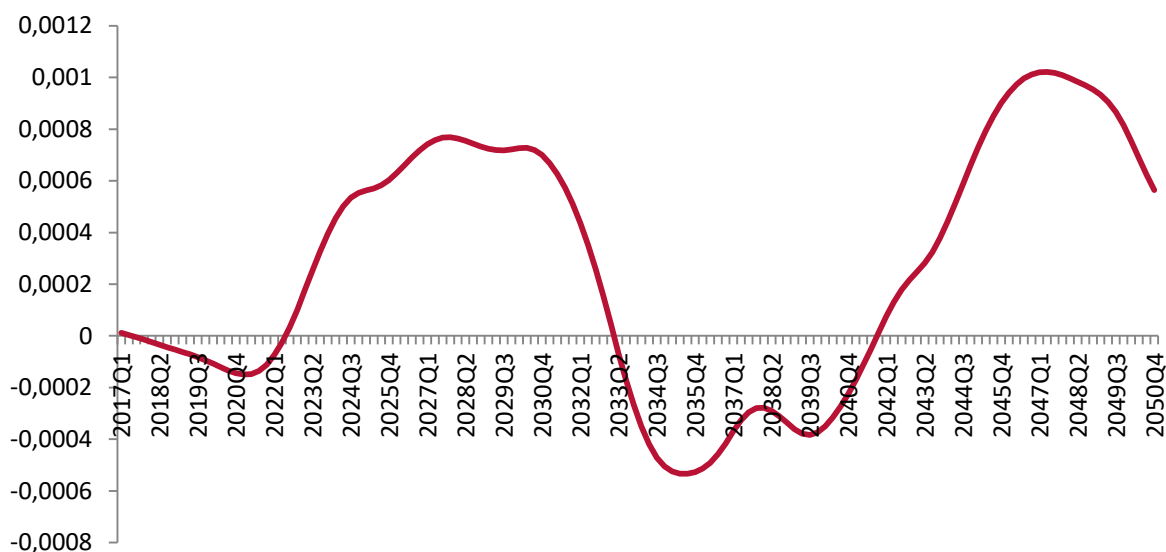
Σχήμα 3.5 Η διαφορά μεταξύ των δύο σεναρίων –πλήρης απαλλαγή και βασική γραμμή δράσης- στο πλαίσιο της προστιθέμενης αξίας στους κύριους τομείς της οικονομίας .

Στο παρακάτω διάγραμμα απεικονίζεται μια πολύ μικρή μείωση της παραγωγής και της κατά κεφαλήν κατανάλωσης (**Σχήμα 3.6**), αν ακολουθήσουμε τη δράση πλήρους απαλλαγής από τον άνθρακα. Η διαφορά μεταξύ των δύο σεναρίων ενισχύεται στα τέλη του 2020 και στα τέλη του 2040, δηλαδή στις περιόδους κατά τις οποίες οι επενδυτικές ανάγκες στο σενάριο απαλλαγής είναι οι μέγιστες. Σε αυτές τις περιόδους παρατηρούμε επίσης, ότι η πτώση της κατανάλωσης είναι βαθύτερη από εκείνη του Α.Ε.Π, καθώς οι μεγαλύτερες επενδύσεις σε αυτή την περίοδο υποδηλώνουν ότι μικρότερο μερίδιο του ΑΕΠ μπορεί να αποδοθεί στην κατανάλωση. Ωστόσο, η μείωση της κατανάλωσης φαίνεται να είναι ασήμαντη σε σύγκριση με τα υπόλοιπα μεγέθη. Ακόμη στα τέλη της δεκαετίας του 2040, η κατανάλωση είναι κατά 1% χαμηλότερη από ό,τι στη βασική γραμμή δράσης. Για παράδειγμα, εάν υποθέσουμε ότι παρατηρείται αύξηση της κατανάλωσης στο βασικό σενάριο με ετήσιο ρυθμό 3%, τότε ο μέσος ετήσιος ρυθμός αύξησης στο σενάριο πλήρους απαλλαγής θα είναι 2,97%.



Σχήμα 3.6 Η διαφορά μεταξύ των δύο σεναρίων – πλήρης απαλλαγή και βασική γραμμή δράσης- στο πλαίσιο της προστιθέμενης αξίας στους κύριους τομείς της οικονομίας . Ο άξονας Y εκφράζει το επίπεδο του Α.Ε.Π στη βασική γραμμή δράσης.

Όσον αφορά το εργατικό δυναμικό, διαπιστώνεται πως η βραδύτερη αύξηση του Α.Ε.Π μεταφράζεται σε χαμηλότερη ζήτηση εργασίας και αύξηση της ανεργίας. Εντούτοις, η επίπτωση αυτή μπορεί να θεωρηθεί αμελητέα, σύμφωνα με το **Σχήμα 3.7**: η αιχμή της ανεργίας θα εμφανιστεί στα τέλη της δεκαετίας του 2040 και το αποτέλεσμα θα ήταν μικρότερο από 0,1% πάνω από τον αντίστοιχο δείκτη του σεναρίου της βασικής γραμμής δράσης.



Σχήμα 3.7 Η διαφορά μεταξύ των δύο σεναρίων –βασική γραμμή δράσης και πλήρης απαλλαγή- σχετικά με το ποσοστό ανεργίας

3.4 Πλεονεκτήματα και περιορισμοί της κλασικής οικονομικής ανάλυσης

Οι προσομοιώσεις που παρουσιάζονται στο Κεφάλαιο 3 έχουν δύο στόχους. Αρχικά, επιδιώκουν να διευκολύνουν στην κατανόηση του τρόπου με τον οποίο, το πρόσθετο κόστος που συνδέεται με τη δράση πλήρους απεξάρτησης από τον άνθρακα, οδηγεί σε απώλειες του Α.Ε.Π και της κατανάλωσης. Δεύτερον, παρέχουν μια εκτίμηση της αναμενόμενης οικονομικής ζημίας που συνδέεται με αυτή τη διαδρομή.

Το αποτέλεσμα του θετικού κόστους της απαλλαγής από τον άνθρακα και τις εκπομπές που παράγει, προέκυψε βάσει της διάρθρωσης του ερευνητικού μας σχεδίου: έχουμε ορίσει τη βασική γραμμή δράσης ως το μονοπάτι που ελαχιστοποιεί το κόστος του συστήματος ηλεκτρισμού και συνεπώς, κάθε επιπρόσθετος περιορισμός του συστήματος (συμπεριλαμβανομένων των μειώσεων των εκπομπών) που αλλάζει τη σύσταση του μείγματος σε αυτή τη δράση, πρέπει να έχει ως αποτέλεσμα υψηλότερο κόστος ηλεκτρικής ενέργειας. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι, από μακροοικονομική άποψη, το υψηλότερο κόστος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, συνεπάγεται χρήση περισσότερων πόρων στον τομέα της ηλεκτρικής ενέργειας και αναγκαστικά παραμένουν λιγότεροι για τους άλλους τομείς. Αυτή η απώλεια αποτελεσματικότητας στη χρήση των πόρων, πρέπει να οδηγήσει σε μείωση της κατανάλωσης. Αυτό το αποτέλεσμα είναι ανεξάρτητο από τη δομή του μοντέλου ή οποιαδήποτε βαθμονόμηση των παραμέτρων. Στην πραγματικότητα, η οικονομική απώλεια από την επιβολή περιβαλλοντικού περιορισμού θα προβλεφθεί από οποιοδήποτε νεοκλασικό μοντέλο ή μοντέλο

ισορροπίας, που υποθέτει τη βελτιστοποίηση των παραγόντων και την πλήρη εκκαθάριση της αγοράς (Nikas, et al., 2018a).

Είναι απαραίτητο να διευκρινιστεί πως το συμπέρασμα που αναφέρει ότι η απότομη μείωση του άνθρακα (Πλήρης απαλλαγή- **Σχήμα 3.2**), σε αντίθεση με τη συγκρατημένη μείωση του άνθρακα (Βασική γραμμή δράσης-**Σχήμα 3.1**), μέχρι το 2050, οδηγεί σε οικονομικές απώλειες, βασίζεται στην παραδοχή ότι η τελευταία δράση πράγματι μειώνει το κόστος. Για παράδειγμα, αν το κόστος της ηλεκτρικής ενέργειας που τροφοδοτείται από τον άνθρακα υπολογίζεται λανθασμένα, η δράση με το ελάχιστο κόστος μπορεί να μην παρουσιάζει την προσδοκώμενη μείωση της κατανάλωσης του άνθρακα. Ομοίως, η διαφορά στο κόστος των δύο οδών μπορεί να είναι πλασματική και να παρερμηνεύσει την πραγματικότητα, εάν το μοντέλο δεν εκτιμήσει σωστά το κόστος που απαιτείται σύμφωνα με την βασική γραμμή δράσης κάτω από το πλαίσιο των ισχυόντων περιβαλλοντικών περιορισμών. Υπάρχουν δύο λόγοι που αιτιολογούν μία τέτοια περίπτωση. Πρώτον, το μοντέλο μπορεί να μην λαμβάνει υπόψη όλα τα στοιχεία από τα οποία προκύπτει το κόστος του συστήματος της ηλεκτρικής ενέργειας. Για παράδειγμα, μπορεί να αγνοήσει το κόστος της εφεδρικής χωρητικότητας που διατίθεται σε περιπτώσεις όπου τα φωτοβολταϊκά ή τα αιολικά πάρκα δεν παράγουν για ορισμένη διάρκεια, λόγω φυσικών φαινομένων. Δεύτερον, οι τιμές των παραμέτρων του μοντέλου που επιλέχθηκαν μπορεί να είναι εσφαλμένες.

Με το ίδιο σκεπτικό είναι επίσης αναγκαίο να διευκρινιστεί μία επιπρόσθετη παραδοχή πάνω στην οποία βασίζεται το συμπέρασμα, που αναφέρει ότι η επιβολή περιβαλλοντικών περιορισμών προκαλεί οικονομικές απώλειες. Η παραδοχή αυτή παίρνει ως δεδομένο, ότι δεν υπάρχουν εξωτερικές επιδράσεις από τη πλευρά των επιχειρήσεων, οι αγορές είναι απόλυτα ανταγωνιστικές και οι καταναλωτές και οι επιχειρήσεις αντιδρούν λογικά. Αυτοί οι εξωτερικοί παράγοντες προκύπτουν όταν οι επιχειρήσεις δεν λαμβάνουν υπόψη τις κοινωνικές επιπτώσεις και τα οφέλη των αποφάσεών τους. Για παράδειγμα, εάν οι εκπομπές μιας ενεργειακής εταιρείας οδηγήσουν σε απώλεια της διεθνούς της φήμης και αυτή η παράμετρος δεν συνυπολογιστεί στη λήψη αποφάσεων, τότε δημιουργείται ένας αστάθμητος εξωτερικός παράγοντας. Εάν προκύψουν παράλληλα τέτοιοι έντονοι και πολυπληθείς εξωτερικοί παράγοντες στον πραγματικό κόσμο, η βέλτιστη οδός που υποδεικνύεται από τα πρότυπα οικονομικά μοντέλα τα οποία αγνοούν τις εξωτερικές παραμέτρους, θα είναι διαφορετική από την πραγματικά βέλτιστη πορεία σε κοινωνικό επίπεδο. Ομοίως, εάν οι αγορές δεν είναι ανταγωνιστικές (π.χ. οι μισθοί δεν μπορούν να προσαρμοστούν ελεύθερα) ή εάν οι παράγοντες

δεν θεωρούνται ότι διαθέτουν συμπεριφορά προσανατολισμένη προς τη βέλτιστη λύση , τα τυποποιημένα οικονομικά μοντέλα ενδεχομένως να παρέχουν λανθασμένες προβλέψεις.

4 Πέρα από την κλασική οικονομική ανάλυση – Πιθανοί κίνδυνοι που παραλείφθηκαν

Στο κεφάλαιο 4 εξετάζουμε κάποιους πιθανούς εξωτερικούς παράγοντες, που όπως αναφέραμε παραπάνω, μπορούν να προβούν καθοριστικοί για τις προβλέψεις μας και τους οποίους αγνοούν τα προαναφερθέντα μοντέλα, καθώς και ορισμένα αδύνατα σημεία της αγοράς. Επιπλέον μελετάμε με ποιον τρόπο και σε τι βαθμό θα μπορούσαν να επηρεάσουν τα αποτελέσματά μας. Βέβαια, ο κατάλογος αυτός είναι ενδεικτικός και απαιτεί περαιτέρω διερεύνηση πέρα από το πεδίο εφαρμογής του παρόντος εγγράφου.

4.1 Εισαγωγή στη χαρτογράφηση των γνώσεων των ενδιαφερόμενων που αφορούν το ζήτημα των εκπομπών

Οι γνώσεις που παρέχονται από τα ενδιαφερόμενα μέρη και τις συμμετοχικές διαδικασίες μπορούν να βοηθήσουν σημαντικά στη γεφύρωση των γνωστικών κενών στις μελέτες κλιματικής μετάβασης (Kampelmann, et al., 2017). Η ασαφής γνωστική χαρτογράφηση είναι μια τεχνική οιονεί ποσοτικής μοντελοποίησης της πληθώρας των γνώσεων που διαθέτουν τα ενδιαφερόμενα μέρη για ένα συγκεκριμένο ζήτημα και η απόδοσή τους σε διαγραμματική μορφή, δημιουργώντας με αυτόν τον τρόπο την απαραίτητη δομή και ευελιξία που χρειάζεται το μοντέλο αυτό ως βάση, για να προστεθεί το επιθυμητό επίπεδο λεπτομέρειας και πολυπλοκότητας (Kosko, 1986). Τα στοιχεία από τα οποία αποτελείται το εξεταζόμενο σύστημα, συνδέονται μεταξύ τους μέσω σχέσεων αιτίου-αποτελέσματος. Οι προσομοιώσεις του μοντέλου μέσα από τεχνικές που αναπαριστούν ένα τεχνητό δίκτυο, αποδίδουν τον τρόπο με τον οποίο

λειτουργεί η αιτιώδης διάδοση στο σύστημα, σε επιβληθέντα «σοκ» και παραδοχές που διατυπώνονται από τα ενδιαφερόμενα μέρη ή/και δεδομένα. Η μεθοδολογία αυτή διευκολύνει τους εμπειρογνώμονες να εκτιμήσουν ένα σύνθετο πρόβλημα και να λάβουν μια δύσκολη απόφαση, χρησιμοποιώντας κυρίως τις δικές τους γνώσεις, βοηθώντας τους στην άντληση αυτής της γνώσης και τελικά μέσω αυτού του εργαλείου να κατευθύνουν κατάλληλα τις προσομοιώσεις προκειμένου να καταλήξουν σε συμπεράσματα, τα οποία σε κάθε άλλη περίπτωση, θα ήταν δύσκολο να οδηγηθούν μόνοι τους.

Δεκαοκτώ πολίτες της Πολωνίας (ενδιαφερόμενα μέρη), ανάμεσα στους οποίους υπήρχαν εκπρόσωποι του τμήματος έρευνας και ανάπτυξης ιδιωτικών επιχειρήσεων από τον τομέα της ενέργειας, ενδιαφερόμενοι από τα γραφεία δημόσιας διοίκησης και ερευνητές, συμμετείχαν σε ένα εργαστήριο με τίτλο «Κίνδυνοι μετάβασης σε χαμηλές εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα στην Πολωνία» που πραγματοποιήθηκε τον Οκτώβριο του 2017, στη Βαρσοβία. Σε μια ειδικά διαμορφωμένη συνεδρία, οι ενδιαφερόμενοι ενημερώθηκαν για τη λειτουργία και τους στόχους της μεθοδολογίας FCM, καθοδηγήθηκαν καθ' όλη τη διάρκεια της διαδικασίας και διευκολύνθηκαν σχετικά με τον πώς θα μπορέσουν να συμβάλλουν στην συγκεκριμένη πρωτοβουλία. Για το σκοπό αυτό παρουσιάστηκαν λεπτομερώς τα πρωταρχικά αποτελέσματα του μοντέλου, που σχετίζονται με τις δύο δράσεις που αναλύουμε. Η διαδικασία υποστηρίχθηκε από τρισδιάστατους χάρτες συστημάτων (Nikas, et al., 2017), με στόχο τη διαμόρφωση της προσέγγισής μας.

4.1.1 Ανάλυση της χαρτογράφησης των γνώσεων των ενδιαφερόμενων

Πριν από το εργαστήριο, οι συγγραφείς ανέπτυξαν το μοντέλο FCM βασιζόμενοι σε συνεντεύξεις, βιβλιογραφία και την προσωπική τους εμπειρία, μελετώντας τον πολωνικό ενεργειακό τομέα. Οι δύο δράσεις που συζητάμε, αποτελούνταν συνολικά από επτά πολιτικές και χωρίζονται ως εξής: Η δράση με σκοπό την απαλλαγή από τις εκπομπές του διοξειδίου του άνθρακα, βασίστηκε στις εξής πολιτικές:

- ❖ Μηχανισμός της αγοράς των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας διακοπτόμενης λειτουργίας **(P1)**
- ❖ Σταθερότητα των πολιτικών στήριξης των Α.Π.Ε **(P2)**
- ❖ Επιδοτήσεις για τον τομέα έρευνας και ανάπτυξης των Α.Π.Ε **(P3)**
- ❖ Εκπαιδευτικά προγράμματα και άλλες παιδευτικές μεθόδους που αποσκοπούν στη διευκόλυνση των εργαζόμενων ανθρακωρύχων, να προσαρμοστούν σε έναν πιο «πράσινο» ενεργειακό τομέα. **(P4)**

Η εξαρτώμενη από τον άνθρακα βασική γραμμή δράσης απαρτίζεται από τις εξής πολιτικές:

- ❖ Πολιτική στήριξη προς τις επενδύσεις στις μονάδες εξόρυξης του άνθρακα **(P5)**
- ❖ Επιδοτήσεις για την έρευνα και ανάπτυξη των τεχνολογιών του άνθρακα **(P6)**
- ❖ Κατάλληλη σχεδίαση της εγχώριας αγοράς του άνθρακα **(P7)**.

Στη συνέχεια επιλέχθηκαν έντεκα αβεβαιότητες που προκύπτουν μέσα από αυτή τη δράση, βασιζόμενες κυρίως στη βιβλιογραφία των μελετών που επικεντρώνονται στις σχετικές πολιτικές:

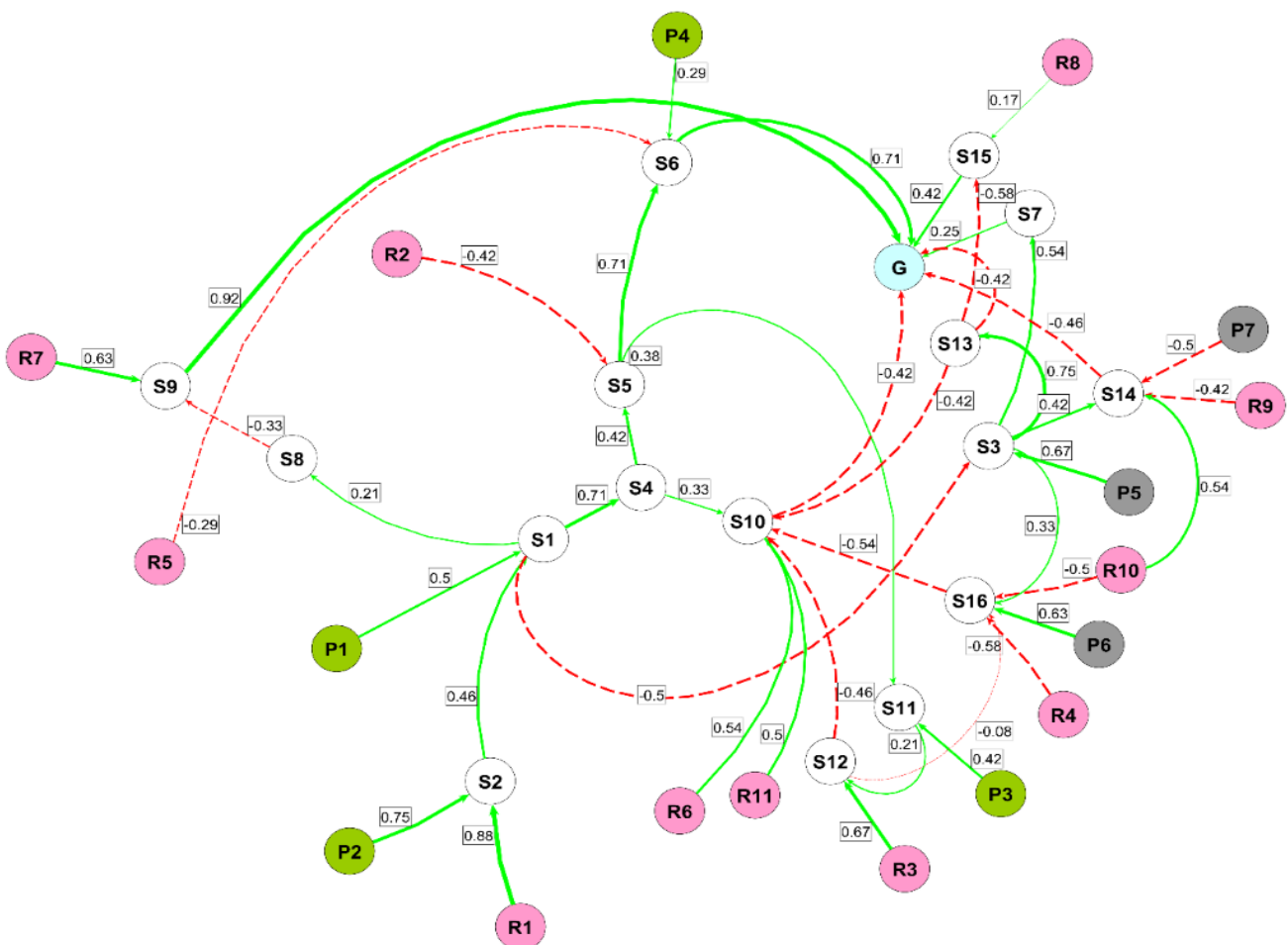
- Διαθεσιμότητα ξένου και εγχώριου κεφαλαίου **(R1)**
- Εμπόδια εισόδου για τις εγχώριες επιχειρήσεις **(R2)**
- Εξωγενής τεχνολογική πρόοδος **(R3)**
- Κόστος αερίου και πυρηνικής ενέργειας **(R4)**
- Ο βαθμός στον οποίο οι ανθρακωρύχοι θα είναι σε θέση να προσαρμοστούν **(R5)**
- Οι τιμές του φυσικού αερίου **(R6)**
- Οι διεθνείς σχέσεις **(R7)**
- Η στάση της Ευρωπαϊκής Ένωσης απέναντι στην κλιματική αλλαγή **(R8)**
- Οι διεθνείς τιμές του άνθρακα **(R9)**
- Το κόστος της εγχώριας εξόρυξης άνθρακα **(R10)**
- Τιμές στο Σύστημα Εμπορίας Δικαιωμάτων Εκπομπών Άνθρακα EU-ETS **(R11)**.

Αυτές οι αβεβαιότητες είναι σημαντικές για το πολωνικό ζήτημα και για τη διεθνή ακαδημαϊκή συζήτηση, σχετικά με τις συνέπειες της απαλλαγής από τον άνθρακα, γεγονός που αφορά και την Πολωνία. Αξίζει να διευκρινιστεί όμως, ότι ο κατάλογος που εξετάζεται στην παρούσα έκθεση είναι ελλιπής και απαιτεί περαιτέρω διερεύνηση. Ως προς την κατασκευή του FCM, οι συγγραφείς εξέτασαν τους διάφορους παράγοντες που συνέδεαν τις επιλεγμένες πολιτικές και τις αβεβαιότητες με τη μακροπρόθεσμη οικονομική ανάπτυξη, μέσω σχέσεων αιτίας-αποτελέσματος.

Στο παρακάτω σχήμα εκτός από τις αβεβαιότητες (Risks) και τις πολιτικές (Policies), απεικονίζονται όλοι οι άλλοι κόμβοι του συστήματος (System) που παρεμβάλλονται μεταξύ των αβεβαιοτήτων/κινδύνων και του τελικού στόχου (G), δηλαδή της μακροπρόθεσμης οικονομικής ανάπτυξης:

- ✓ Η ανάπτυξη των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας διακοπτόμενης λειτουργίας **(S1)**
- ✓ Η επαρκής χρηματοδότηση **(S2)**
- ✓ Η επιμονή στον άνθρακα **(S3)**

- ✓ Η ζήτηση για εγκαταστάσεις Α.Π.Ε (S4)
- ✓ Η ζήτηση για εγχώριες εγκαταστάσεις Α.Π.Ε (S5)
- ✓ Νέες πράσινες θέσεις εργασίας (S6)
- ✓ Παραδοσιακές θέσεις εργασίας (S7)
- ✓ Ζήτηση για φυσικό αέριο (S8)
- ✓ Ενεργειακή ασφάλεια/επάρκεια (S9)
- ✓ Κόστη ενεργειακού συστήματος (S10)
- ✓ Πρόσδος στην ικανότητα απορρόφησης από εξωτερικούς προμηθευτές (S11)
- ✓ Μακροπρόθεσμη μείωση των δαπανών εγκατάστασης των Α.Π.Ε (S12)
- ✓ Εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα και ρύπανση (S13)
- ✓ Εισαγωγές άνθρακα (S14)
- ✓ Διεθνής φήμη και χρηματοδότηση (S15)
- ✓ Ανταγωνισμός στην ηλεκτρική ενέργεια προερχόμενη από τον άνθρακα (S16)



Σχήμα 4.1 Το αποτέλεσμα του FCM του πολωνικού ζητήματος απαλλαγής από τον άνθρακα.

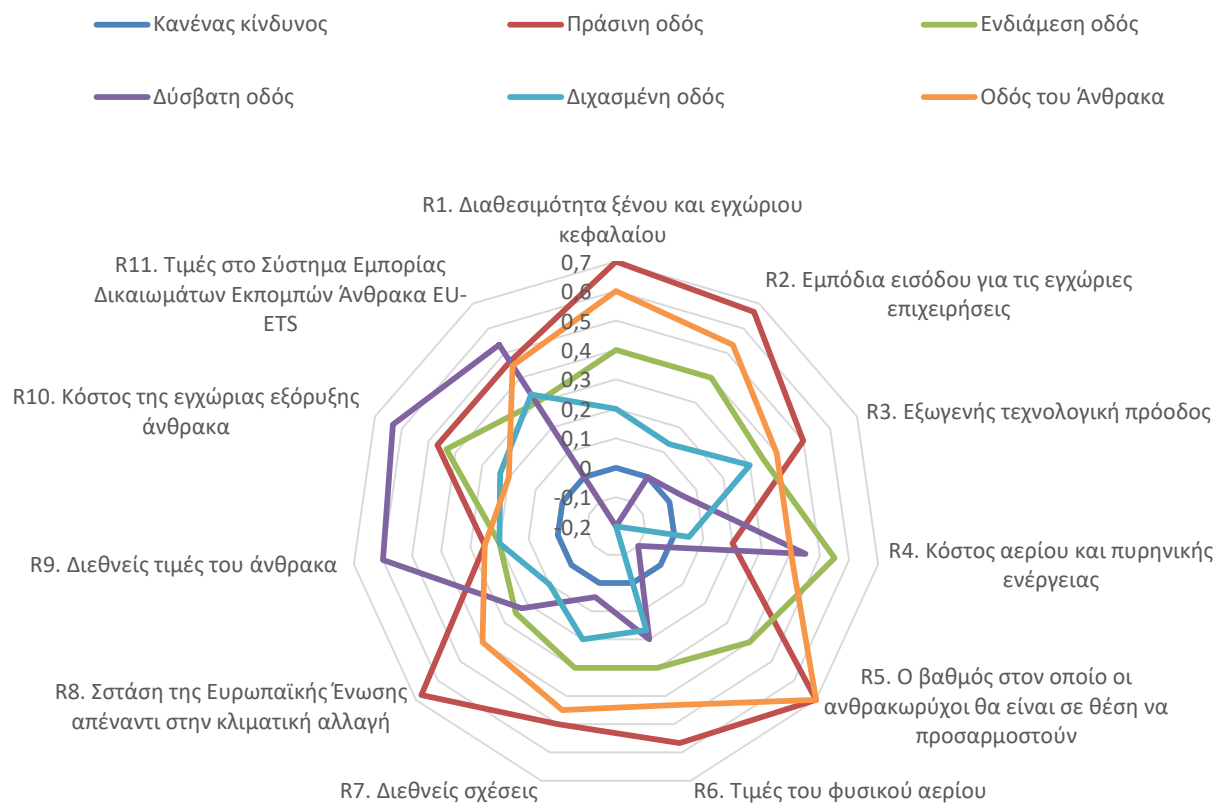
Στα ενδιαφερόμενα μέρη δόθηκε ένα ερωτηματολόγιο, στο οποίο κλήθηκαν να αξιολογήσουν το πρόσημο (θετική ή αρνητική επίδραση) και τη σημασία καθεμιάς από τις αναγνωρισμένες σχέσεις μεταξύ των αλληλοσυνδεδεμένων εννοιών του FCM. Η είσοδος τους ποσοτικοποιήθηκε στο διάστημα [-1, 1] και υπολογίστηκε ένα μέσο βάρος για ολόκληρη την ομάδα των ενδιαφερομένων για τον σχεδιασμό ενός παγκόσμιου FCM (Σχήμα 4.1).

Οι πολιτικές Α.Π.Ε απεικονίζονται με **σκούρο πράσινο**, οι πολιτικές άνθρακα με **σκούρο γκρι** χρώμα, οι αβεβαιότητες με **ανοιχτό μωβ**, ο τελικός στόχος με **ανοιχτό κυανό** και όλες οι άλλες έννοιες του συστήματος με λευκό. Επιπλέον, οι θετικές σχέσεις σχεδιάζονται με πράσινες γραμμές μεταβλητού πάχους, ανάλογα με το βάρος (που απεικονίζεται επίσης για κάθε σύνδεσμο), ενώ οι αρνητικές σχέσεις με κόκκινες διακεκομμένες γραμμές.

4.1.2 Προσομοιώσεις

Η προσομοίωση των δύο δράσεων πραγματοποιήθηκε με σκοπό να καταγραφεί η αλληλεπίδραση τους με πέντε διαφορετικά κοινωνικοοικονομικά σενάρια, τα οποία περιγράφουν προκλήσεις διαφορετικών επιπέδων της κλιματικής αλλαγής. Τα συγκεκριμένα σενάρια SSP (Shared Socioeconomic Pathways), αποτελούν εναλλακτικές διαδρομές κοινωνικοοικονομικής ανάπτυξης που περιγράφουν αξιόπιστα πιθανές, ρεαλιστικές τάσεις στην εξέλιξη της κοινωνίας και των οικοσυστημάτων κατά τον 21^ο αιώνα, σε παγκόσμιο και περιφερειακό επίπεδο. Τα SSP είναι ένα σύνολο πιθανών διαδρομών αναφοράς και δεν αποτελούν αυτόνομα κλιματικά σενάρια, αλλά ένα πρώτο βήμα προς την παραγωγή των πραγματικών ολοκληρωμένων σεναρίων. Ένα από τα σημαντικότερα ζητήματα στα οποία επικεντρώνεται το σύνολο αυτών των σεναρίων, είναι ο ακριβής προσδιορισμός της αβεβαιότητας που αφορά τον μετριασμό, την προσαρμογή και τις επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής. Για να προσδιοριστεί ο βαθμός της αβεβαιότητας, σχετικά με την επίτευξη των στόχων μετριασμού και προσαρμογής που θέτουν τα σενάρια, χρησιμοποιούνται εκτιμήσεις και περιγραφές των μελλοντικών κοινωνικοοικονομικών συνθηκών, που θα μπορούσαν να επηρεάσουν θετικά ή αρνητικά τις μελλοντικές κλιματικές εξελίξεις. Οι συνθήκες αυτές, περιγράφουν ένα ευρύ φάσμα πτυχών της κοινωνίας, (δημογραφικές, πολιτικές, τεχνολογικές, κ.τ.λ.) και αντικατοπτρίζουν την επιρροή της ανθρώπινης δραστηριότητας στο περιβάλλον.

Διαμόρφωση σεναρίων για το FCM



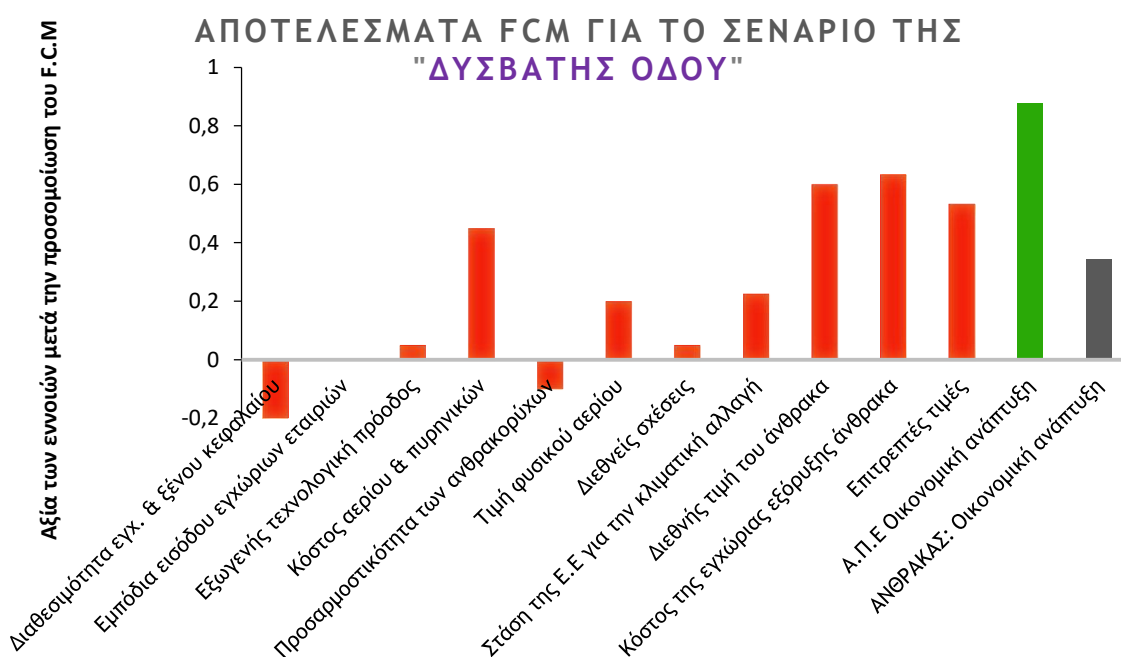
Σχήμα 4.2 Η συνολική διαμόρφωση των πέντε σεναρίων

Πιο συγκεκριμένα, για τις ανάγκες του δικού μας εργαστηρίου, επεξεργαστήκαμε την αλληλεπίδραση των δύο πολιτικών που συζητάμε με τα εξής πέντε σενάρια. Το πρώτο σενάριο, η "Πράσινη οδός" (Green Road), είναι ένα αισιόδοξο σενάριο με χαμηλές προκλήσεις συνολικά. Το δεύτερο σενάριο, η "Ενδιάμεση οδός" (Middle Road), περιγράφει έναν κόσμο με προκλήσεις μεσαίου επιπέδου για την αντιμετώπιση της κλιματικής αλλαγής. Το τρίτο σενάριο, η "Δύσβατη οδός" (Rocky Road), περιγράφει ένα απαισιόδοξο μέλλον, στο οποίο οι μετριασμοί και η προσαρμογή στην αλλαγή του κλίματος θεωρούνται δύσκολο να υλοποιηθούν. Το τέταρτο σενάριο, η "Διχασμένη οδός" (Divided Road), παρουσιάζει μεγάλη πρόκληση για την προσαρμογή, αλλά υποθέτει ότι ο μετριασμός είναι σχετικά ευκολότερος. Τέλος το πέμπτο σενάριο, η "Οδός από Άνθρακα", χαρακτηρίζεται από υψηλή πρόκληση σχετικά με το μετριασμό, αλλά αρκετά χαμηλή προσαρμογή (O'Neill, et al., 2017)

Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι, από την οπτική γωνία των ενδιαφερόμενων μερών, με την κατάλληλη διαχείριση και αξιοποίηση, οι πολιτικές στήριξης των Α.Π.Ε μπορούν να έχουν θετικό αντίκτυπο στην οικονομική ανάπτυξη και να αποβούν κερδοφόρες. Οι δίαυλοι μέσω των οποίων επιτυγχάνεται το αντίστοιχο θετικό αποτέλεσμα των πολιτικών στήριξης του άνθρακα φαίνεται

να είναι πιο αδύναμοι, σύμφωνα με το μοντέλο FCM, και για τα πέντε κοινωνικοοικονομικά σενάρια.

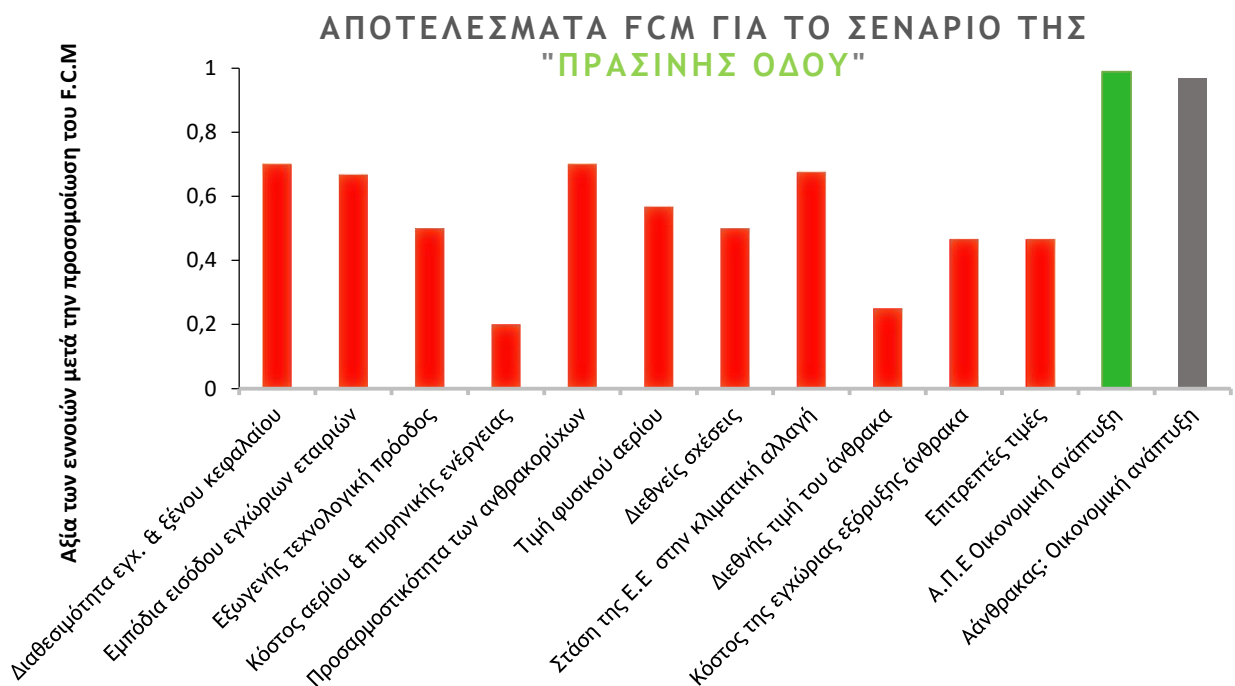
Ειδικότερα, από την προαναφερθείσα ανάλυση προκύπτει ότι, όσο πιο καταστροφικό καθίσταται το σενάριο από πλευράς προκλήσεων μετριασμού και προσαρμογής, τόσο δυσμενέστερη είναι η πορεία της πολιτικής που βασίζεται στον άνθρακα, σε σύγκριση με τη αυτή της πλήρους απαλλαγής των εκπομπών του. Στην πραγματικότητα, στη “Δύσβατη οδό” και στη “Διχασμένη οδό”, όπου αναμένονται σημαντικές προκλήσεις στην προσαρμογή του ενεργειακού συστήματος, φαίνεται να αυξάνεται το χάσμα μεταξύ των επιπτώσεων των δύο δράσεων στην μακροπρόθεσμη ανάπτυξη (Σχήμα 4.3 και Σχήμα 4.6). Αντιθέτως, τόσο στην “Πράσινη οδό” όσο και στην “Οδό από Άνθρακα”, σενάρια τα οποία συνεπάγονται χαμηλές προκλήσεις προσαρμογής όσον αφορά την οικονομική ανάπτυξη, οι δύο πολιτικές πλησιάζουν, αλλά με την πορεία των ΑΠΕ να υπερέχει ελαφρώς από αυτή του άνθρακα (Σχήμα 4.4).



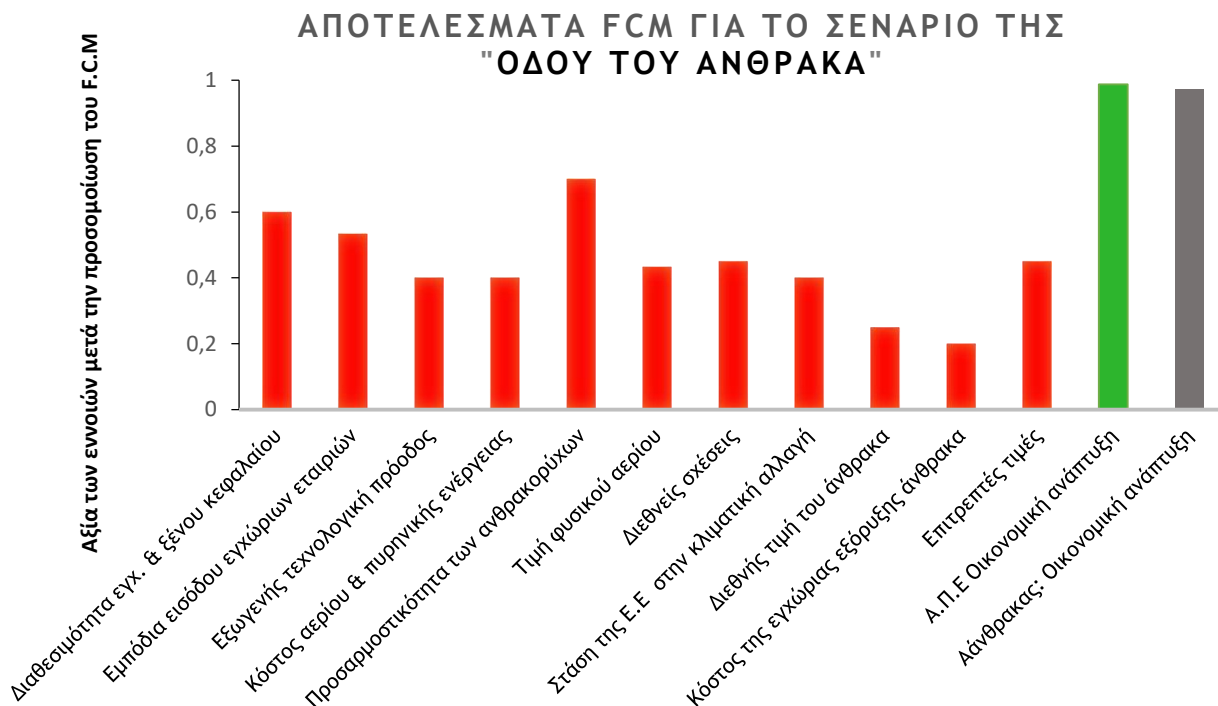
Σχήμα 4.3 Η αξία των αβεβαιοτήτων και τα αποτελέσματα του FCM για τη βασική γραμμή δράσης και την πλήρη απαλλαγή από τον άνθρακα στο κοινωνικοοικονομικό σενάριο της “Δύσβατης οδού”. Οι τιμές των δεικτών: Α.Π.Ε: Οικονομική ανάπτυξη και ΑΝΘΡΑΚΑΣ: Οικονομική ανάπτυξη, αντικατοπτρίζουν την επίδραση των δύο αυτών πολιτικών στήριξης στην οικονομία



Σχήμα 4.4 Η αξία των αβεβαιοτήτων και τα αποτελέσματα του FCM για τη βασική γραμμή δράσης και την πλήρη απαλλαγή από τον άνθρακα στο κοινωνικοοικονομικό σενάριο της "Διχασμένης οδού". Οι τιμές των δεικτών: Α.Π.Ε: Οικονομική ανάπτυξη και ΑΝΘΡΑΚΑΣ: Οικονομική ανάπτυξη, αντικατοπτρίζουν την επίδραση των δύο αυτών πολιτικών στήριξης στην οικονομία.



Σχήμα 4.5 Η αξία των αβεβαιοτήτων και τα αποτελέσματα του FCM για τη βασική γραμμή δράσης και την πλήρη απαλλαγή από τον άνθρακα στο κοινωνικοοικονομικό σενάριο της "Πράσινης οδού". Οι τιμές των δεικτών: Α.Π.Ε: Οικονομική ανάπτυξη και ΑΝΘΡΑΚΑΣ: Οικονομική ανάπτυξη, αντικατοπτρίζουν την επίδραση των δύο αυτών πολιτικών στήριξης στην οικονομία.



Σχήμα 4.6 Η αξία των αβεβαιοτήτων και τα αποτελέσματα του FCM για τη βασική γραμμή δράσης και την πλήρη απαλλαγή από τον άνθρακα στο κοινωνικοοικονομικό σενάριο της "Οδού του Άνθρακα". Οι τιμές των δεικτών: Α.Π.Ε: Οικονομική ανάπτυξη και ΑΝΘΡΑΚΑΣ: Οικονομική ανάπτυξη, αντικατοπτρίζουν την επίδραση των δύο αυτών πολιτικών στήριξης στην οικονομία.



Σχήμα 4.7 Η αξία των αβεβαιοτήτων και τα αποτελέσματα του FCM για τη βασική γραμμή δράσης και την πλήρη απαλλαγή από τον άνθρακα στο κοινωνικοοικονομικό σενάριο της "Ενδιάμεσης Οδού". Οι τιμές των δεικτών: Α.Π.Ε: Οικονομική ανάπτυξη και ΑΝΘΡΑΚΑΣ: Οικονομική ανάπτυξη, αντικατοπτρίζουν την επίδραση των δύο αυτών πολιτικών στήριξης στην οικονομία.

Επιπροσθέτως ένα σημαντικό συμπέρασμα στο οποίο καταλήξαμε μέσα από αυτήν την ανάλυση είναι ότι, μεταξύ των επτά πολιτικών στρατηγικών, μόνο η πολιτική στήριξης για τις επενδύσεις στην παραγωγή του άνθρακα φαίνεται να επηρεάζει πάντοτε αρνητικά την οικονομική ανάπτυξη. Όλες οι άλλες δράσεις, όταν αξιολογούνται μεμονωμένα, φαίνεται να έχουν θετικές επιπτώσεις στην εθνική οικονομική ανάπτυξη, στα περισσότερα σενάρια.

Η ανάλυση FCM αποκαλύπτει σημαντικούς διαύλους οι οποίοι μεταδίδουν τις επιπτώσεις των πολιτικών που υποστηρίζουν τις Α.Π.Ε ή τον άνθρακα στην μακροπρόθεσμη οικονομική ανάπτυξη. Δεδομένου ότι ορισμένα από αυτά τα κανάλια δεν εξετάζονται στα περισσότερα οικονομικά μοντέλα, οι προβλέψεις αυτών των μοντέλων μπορεί να είναι προκατειλημμένες. Οι προσομοιώσεις FCM δείχνουν ότι, αν ληφθούν υπόψη αυτά τα κανάλια, η πρόβλεψη ότι η δράση πλήρους απαλλαγής από τον άνθρακα σχετίζεται με μικρότερη ανάπτυξη, θα μπορούσε να αντιστραφεί.

Στην επόμενη υποενότητα συζητάμε τα πιο σημαντικά αναδυόμενα κανάλια που παραλήφθηκαν στην ανάλυση μοντελοποίησης που παρουσιάσαμε στο **Κεφάλαιο 3**.

4.2 Οι κίνδυνοι που συνδέονται με τη δράση για την πλήρη απαλλαγή από τον άνθρακα

Η στήριξη για τις Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας και η ταχύτερη ανάπτυξη τους, θα οδηγήσει στη μείωση της ζήτησης του άνθρακα. Ως αποτέλεσμα, ο αριθμός των θέσεων εργασίας στον τομέα του άνθρακα θα μειωθεί. Τα κλασικά οικονομικά μοντέλα υποθέτουν ομαλή ροή στη μετάβαση του εργατικού δυναμικού μεταξύ των τομέων. Αντίθετα, πρόσφατα εμπειρικά στοιχεία δείχνουν ότι η μετάβαση των εργαζομένων μεταξύ των τομέων, μετά από μεγάλες διαρθρωτικές αλλαγές στο ενεργειακό σύστημα είναι αργή (Author, et al., 2016) & (Tyrowicz & Van der Velde, 2014)). Εάν οι εργαζόμενοι που εγκαταλείπουν τον ήδη υπάρχον τομέα, δεν μπορούν εύκολα να προσαρμοστούν και να εγκλιματιστούν στις απαιτήσεις άλλων τομέων, τότε θα εγκαταλείψουν την αγορά εργασίας, με αποτέλεσμα να μείνουν άνεργοι. Αυτό θα έχει κατ' επέκταση αρνητικές επιπτώσεις στην ανάπτυξη. Επιπλέον, η επιβάρυνση του κόστους μετάβασης, σε μια ομάδα εργαζομένων μπορεί να συνεπάγεται χαμηλότερη υποστήριξη για την ίδια τη μετάβαση (Mayer, 2018). Η ανάλυση FCM αποκαλύπτει ότι, κατά μέσο όρο, τα ενδιαφερόμενα μέρη πιστεύουν ότι η αυξημένη ζήτηση για Α.Π.Ε συνολικά, έχει μέτρια επίδραση στη ζήτηση για Α.Π.Ε που παρέχεται από εγχώριους παραγωγούς, γεγονός που με τη σειρά του ενισχύει αρκετά τη δημιουργία νέων θέσεων εργασίας. Από την άλλη πλευρά, η ανάπτυξη των ΑΠΕ θα έχει μέτρια

αρνητική επίδραση στην επιμονή στον άνθρακα και κατ' επέκταση στις παραδοσιακές θέσεις εργασίας, οι οποίες αποτελούν μέρος της οικονομικής ανάπτυξης, αν και αυτή η επίδραση θεωρείται πολύ ασθενής.

Η στήριξη των Α.Π.Ε σημαίνει αυτόματα αύξηση της ζήτησης τους. Αυτό δημιουργεί ζήτηση στους εγχώριους προμηθευτές τεχνολογιών Α.Π.Ε, γεγονός που οδηγεί σε νέες θέσεις εργασίας και ταχύτερη οικονομική ανάπτυξη. Ωστόσο, αυτή η αλυσιδωτή σχέση παραβιάζεται όταν οι εγχώριοι παραγωγοί αντιμετωπίζουν σημαντικά εμπόδια εισόδου στην αγορά τεχνολογίας Α.Π.Ε. Συγκεκριμένα οι εγχώριες εταιρείες ενδέχεται να αδυνατούν να ανταγωνιστούν με ξένες εταιρείες, λόγω των μακροπρόθεσμων επενδύσεων που πραγματοποίησαν οι ξένες εταιρείες τις προηγούμενες δεκαετίες. Παραδείγματα εμποδίων για τους εγχώριους παρόχους τεχνολογιών Α.Π.Ε μελετήθηκαν από τους Sawulski et al. (2018) Τα ενδιαφερόμενα μέρη ανέφεραν ότι, ενώ η ανάπτυξη των Α.Π.Ε έχει ισχυρό αντίκτυπο στη ζήτηση για εγκαταστάσεις Α.Π.Ε, κατά μέσο όρο, οι απαντήσεις τους δείχνουν ότι έχει μέτρια επίδραση στην ανάπτυξη των εγχώριων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Επιπλέον, τόνισαν ότι τα εμπόδια εισόδου έχουν μέτρια αρνητική επίπτωση στη ζήτηση για εγχώρια προϊόντα, γεγονός που υποδηλώνει ότι η επίδραση των πολιτικών Α.Π.Ε στην δημιουργία νέων θέσεων εργασίας μπορεί να είναι περιορισμένη.

Η άνοδος των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας απαιτεί μεγαλύτερα μερίδια φυσικού αερίου στο ενεργειακό μείγμα. Οι σταθμοί φυσικού αερίου, που χαρακτηρίζονται από σχετικά χαμηλό επενδυτικό κόστος, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παροχή ευελιξίας χαμηλού κόστους (Denholm & Margolis, 2007), σχετικά με την ενσωμάτωση της αιολικής και της ηλιακής ενέργειας στο ενεργειακό σύστημα. Οι τεχνολογίες καύσης αερίου είναι σήμερα πιο ανταγωνιστικές από οποιαδήποτε τεχνολογία αποθήκευσης ενέργειας (Elliott, 2016). Η Πολωνία ενδέχεται να είναι ευάλωτη σε πολιτικές και οικονομικές πιέσεις, καθώς το μεγαλύτερο μέρος του φυσικού αερίου που χρησιμοποιείται στην Πολωνία εισάγεται από τη Ρωσία, η οποία έχει χρησιμοποιήσει προηγουμένως τέτοια μόχλευση στις χώρες της Κεντρικής και Ανατολικής Ευρώπης. Η ελλιπής ασφάλεια του εφοδιασμού, συνεπάγεται περιορισμένη ενεργειακή επάρκεια και συνεπώς μειώνει την ανταγωνιστικότητα των πολωνικών επιχειρήσεων, οδηγώντας τη χώρα σε βραδύτερη οικονομική ανάπτυξη μακροπρόθεσμα. Τα ενδιαφερόμενα μέρη ανέφεραν επίσης, ότι η επίδραση της ανάπτυξης των Α.Π.Ε πάνω στη ζήτηση φυσικού αερίου είναι μικρή, όπως και ο αντίκτυπος του τελευταίου στην ενεργειακή ασφάλεια. Ωστόσο, όλοι επισήμαναν πως η ενεργειακή ασφάλεια είναι ζωτικής σημασίας για την εθνική ανάπτυξη.

Τέλος, η στήριξη για Α.Π.Ε πυροδοτεί τη ζήτηση για εγχώριες ανανεώσιμες τεχνολογίες. Οι δυνατότητες που δημιουργούν οι εγχώριοι παραγωγοί θα επιτρέψουν την αύξηση της

ικανότητας απορρόφησης των παγκόσμιων τεχνολογικών καινοτομιών. Η σημασία της δυνατότητας απορρόφησης αναγνωρίστηκε ενδεικτικά από τους (Goulder & Shneieder, 1999) και (Hanson, 2018). Με την απορρόφηση της τεχνολογικής προόδου από τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας θα μειωθεί ακόμη περισσότερο το κόστος των εγκαταστάσεων Α.Π.Ε και κατ'επέκταση το κόστος του ενεργειακού συστήματος, συμβάλλοντας με αυτόν τον τρόπο στην οικονομική ανάπτυξη. Ωστόσο, αυτή η αλυσίδα δεν έχει την ίδια βαρύτητα, εάν η τεχνολογική πρόοδος στη διεθνή κοινότητα είναι αργή.

4.3 Οι κίνδυνοι που συνδέονται με τη βασική γραμμή δράσης

Η υποστήριξη του τομέα του άνθρακα οδηγεί αναπόφευκτα σε βραδύτερη μείωση των εκπομπών του θερμοκηπίου, εάν οι σχετικές τεχνολογίες παραμείνουν ανεπαρκώς ανεπτυγμένες. Με τη συνεπή στάση της Ε.Ε όσον αφορά την κλιματική αλλαγή, η διαδικασία αυτή μπορεί να οδηγήσει σε σταδιακή αποξένωση της Πολωνίας, όπως τονίστηκε από έναν υπάλληλο του δημόσιου τομέα ο οποίος ερωτήθηκε από τους αρμόδιους. Αυτό το γεγονός μπορεί να επηρεάσει δυσμενώς την οικονομική ανάπτυξη, όπως για παράδειγμα, λόγω περιορισμένης πρόσβασης της χώρας σε διεθνή χρηματοδότηση. Τα ενδιαφερόμενα μέρη ανέφεραν ότι υπάρχει άρρηκτη σχέση μεταξύ του σεναρίου που είναι βασισμένο στον άνθρακα και των αερίων του θερμοκηπίου. Επιπλέον τόνισαν πως υφίσταται μια σημαντική, σχετικά αρνητική, σχέση μεταξύ των εκπομπών του θερμοκηπίου και της διεθνούς φήμης της Πολωνίας, η οποία με τη σειρά της έχει μέτρια επίπτωση στην οικονομική ανάπτυξη μακροπρόθεσμα.

Επιπλέον, εάν οι χώρες της διεθνούς κοινότητας εξακολουθούν να επενδύουν στην πρόοδο των τεχνολογιών των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας, τότε θα κερδίσουν πιθανώς τον αγώνα κατά των τεχνολογιών που αφορούν τον άνθρακα. Επομένως στο υποθετικό σενάριο που η Πολωνία συνεχίσει να επενδύει σε ενέργειες Έρευνας και Ανάπτυξης (R&D) για τις τεχνολογίες σχετικά με τον άνθρακα, υπάρχει κίνδυνος να σπαταληθούν τελικά οι πόροι αυτοί, καθώς λίγες χώρες θα χρησιμοποιήσουν τις τεχνολογίες άνθρακα στο μέλλον. Παρόμοιο αποτέλεσμα θα πραγματοποιηθεί εάν η τεχνολογία του φυσικού αερίου ή της πυρηνικής ενέργειας γίνει πιο ανταγωνιστική. Οι ενδιαφερόμενοι υποστήριξαν ότι οι επιδοτήσεις για Έρευνα και Ανάπτυξη (R&D) που σχετίζονται με τον άνθρακα μπορεί να έχουν σημαντικές θετικές επιπτώσεις στην ανταγωνιστικότητα του. Ανέφεραν επίσης ότι η τεχνολογική πρόοδος μπορεί να έχει τεράστιο αντίκτυπο στη μείωση του κόστους των εγκαταστάσεων Α.Π.Ε. Η μείωση του κόστους του ενεργειακού συστήματος επέρχεται και από τα δύο προαναφερθέντα αποτελέσματα. Μέχρι ένα ορισμένο χρονικό σημείο, αυτά τα δύο κανάλια θα μπορούσαν να λειτουργήσουν συγχρόνως. Ωστόσο, αν κάποια στιγμή οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας γίνουν αρκετά οικονομικές, ώστε να

εξαντληθούν πλήρως οι τεχνολογίες του άνθρακα, τότε η επίδραση της Έρευνας και Ανάπτυξης (R&D) για τον άνθρακα ,στη μείωση του κόστους του ενεργειακού συστήματος θα εξαφανιστεί.

Τέλος, η επιμονή στις τεχνολογίες άνθρακα θα οδηγήσει σε αύξηση της ζήτησης του άνθρακα στο μέλλον. Εάν το εγχώριο κόστος της εξόρυξης άνθρακα αυξηθεί ή οι διεθνείς τιμές του άνθρακα μειωθούν, οι εισαγωγές θα αυξηθούν. Επομένως οι εισαγωγές μακροπρόθεσμα, μπορεί να έχουν μέτρια, σύμφωνα με τα ενδιαφερόμενα μέρη, αρνητικές επιπτώσεις στην οικονομική ανάπτυξη. Ανέφεραν επίσης ότι η επιμονή στον άνθρακα θα έχει μέτρια θετική επίδραση στις εισαγωγές καυσίμων, η οποία μπορεί να αυξηθεί περαιτέρω λόγω των χαμηλότερων διεθνών τιμών του άνθρακα και της έλλειψης πολιτικών στήριξης του εγχώριου άνθρακα. Εν κατακλείδι οι υψηλότερες εισαγωγές θεωρείται ότι έχουν μέτρια αρνητική επίδραση στην οικονομική ανάπτυξη.

5 Ανάλυση αβεβαιότητας

Η προσέγγιση FCM υπό το πρίσμα των ενδιαφερόμενων μερών, που συζητήθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, αποδεικνύει ότι αρκετές αβεβαιότητες και κίνδυνοι, που παραβλέπονται στην τυποποιημένη οικονομική ανάλυση, μπορούν να επηρεάσουν σημαντικά την εξέλιξη του Α.Ε.Π για τις δύο δράσεις. Εδώ εξετάζουμε τις συνέπειες που έχουν ορισμένες από αυτές τις αβεβαιότητες, τροποποιώντας μέρος των παραδοχών που έγιναν στο **Κεφάλαιο 3**. Συγκεκριμένα, ερευνούμε τον τρόπο με τον οποίο αλλάζουν τα αποτελέσματα της κλασικής οικονομικής ανάλυσης με την εξέλιξη του κόστους της ανανεώσιμης ενέργειας διακοπτόμενης λειτουργίας, το επίπεδο των τιμών που επιβάλλεται από την Ε.Ε και την υποθετική διαθεσιμότητα της πυρηνικής τεχνολογίας. Αυτό μας επιτρέπει να διερευνήσουμε πώς μπορούν να εξελιχθούν οι δύο δράσεις υπό διαφορετικές συνθήκες. Επιπλέον, το φάσμα των αποτελεσμάτων δείχνει το επίπεδο της αβεβαιότητας που συνδέεται με τα αποτελέσματα της μοντελοποίησης και θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη κατά τη λήψη αποφάσεων.

5.1 Χαμηλές επιβληθείσες τιμές από την Ευρωπαϊκή Ένωση (ETS)

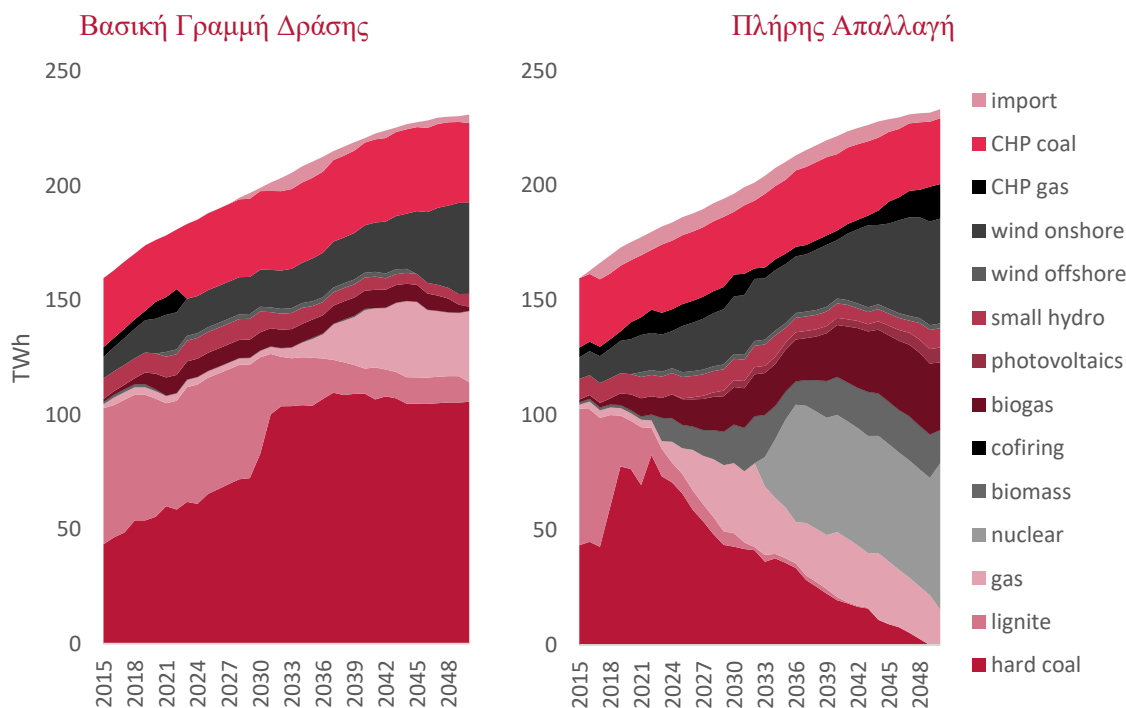
Εδώ εξετάζουμε τα αποτελέσματα των μοντέλων MOEM και MEMO δεδομένου ότι οι τιμές του συστήματος εμπορίας εκπομπών της Ε.Ε παραμένουν σε πολύ χαμηλό επίπεδο. Μετά την παραδοχή που λήφθηκε υπόψη στις προσομοιώσεις για το μονοπάτι της βασικής γραμμής δράσης στην ανάλυση (Klima, et al., 2015), υποθέτουμε ότι η τιμή άδειας για 1t CO₂ είναι 7€ το 2030 και αυξάνεται στην τάξη των 10€ το 2050 (σε σύγκριση με τις υποθέσεις των 30€ και των 80€ αντίστοιχα, που αναλύονται στο **Κεφάλαιο 3**).

Ενδιαφέρον παρουσιάζει το γεγονός ότι οι προσομοιώσεις μοντέλων MOEM υποδηλώνουν ότι, παρά τις χαμηλές τιμές του Συστήματος Εμπορίας Εκπομπών, το μερίδιο των αιολικών στο ενεργειακό μείγμα της βασικής γραμμής δράσης (χωρίς περιορισμούς εκπομπών) είναι πολύ κοντά στο αντίστοιχο μερίδιό τους στο σενάριο της πλήρους απαλλαγής. Αυτό το συμπέρασμα

συνεπάγεται ότι η τεχνολογία αιολικής ενέργειας θα καταστεί ανταγωνιστική ακόμη και ισχύουν χαμηλές τιμές από την Ε.Ε. Ωστόσο, η γρήγορη διάχυση αυτής της τεχνολογίας στο μονοπάτι της βασικής γραμμής δράσης δεν θα ξεκινήσει πριν από τη δεκαετία του 2040. Τα χερσαία αιολικά είναι η μόνη ανανεώσιμη πηγή με σημαντικό μερίδιο το 2050.

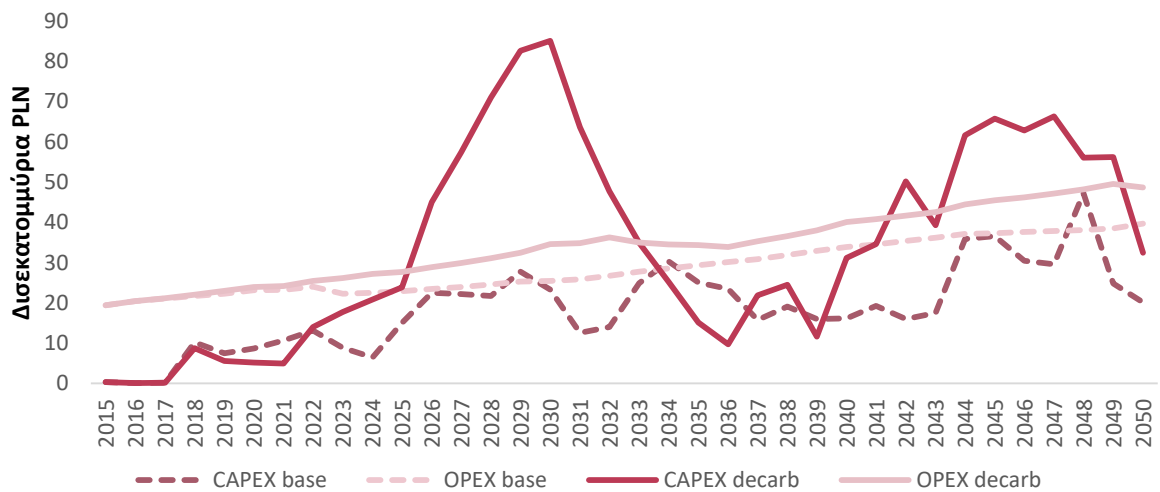
Μία αξιοσημείωτη αλλαγή στη βασική γραμμή δράσης είναι η σημαντική αύξηση της χρήσης του άνθρακα. Η αύξηση αυτή συνδέεται με την ολοκληρωτική έλλειψη της πυρηνικής ενέργειας, η οποία στο σενάριο υψηλών τιμών έχει υπολογιστεί ότι θα συμβάλλει στο ενεργειακό μείγμα τη δεκαετία του 2030.

Όπως ήταν αναμενόμενο, η δράση της πλήρους απαλλαγής από τις εκπομπές φαίνεται να είναι παρεμφερής στα δύο σενάρια επιπέδου τιμών του Συστήματος Εμπορίας Εκπομπών. Η αντικατάσταση των καυσίμων υψηλών εκπομπών απαιτείται από τους επιβληθέντες περιορισμούς των εκπομπών και οι τιμές των εκπομπών έχουν πολύ μικρό αντίκτυπο στη βέλτιστη λύση.



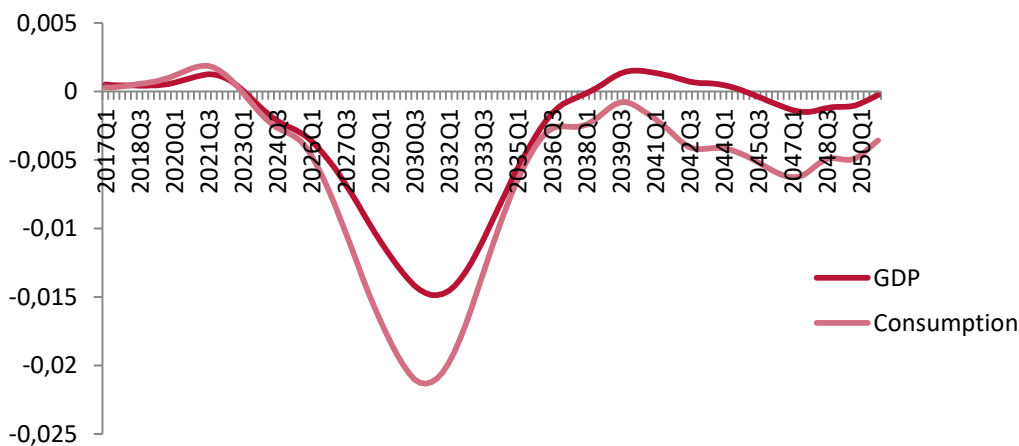
Σχήμα 5.1 Το βέλτιστο μείγμα ηλεκτρικής ενέργειας για τις δύο κλιματικές πολιτικές με την παραδοχή των χαμηλών τιμών που επιβάλλονται από την Ε.Ε.

Οι προσομοιώσεις που υποθέτουν χαμηλές τιμές ETS προβλέπουν μεγάλη διαφορά στο Αρχικό Κεφάλαιο (Α.Κ) που απαιτείται για την καθεμία από τις δύο οδούς, κυρίως λόγω της κατασκευής της χωρητικότητας που χρειάζεται η πυρηνική ισχύς και της μεγαλύτερης κλίμακας ανάπτυξης των Α.Π.Ε στην οδό της πλήρους απαλλαγής. Τα αποτελέσματα αυτά απεικονίζονται στο παρακάτω διάγραμμα:



Σχήμα 5.2 Το Αρχικό Κεφάλαιο (Α.Κ-CAPEX) και οι Λειτουργικές Δαπάνες (Λ.Δ-OPEX) για τη βασική γραμμή δράσης και την πλήρη απαλλαγή, δεδομένου των χαμηλών τιμών που επιβάλλει η Ε.Ε

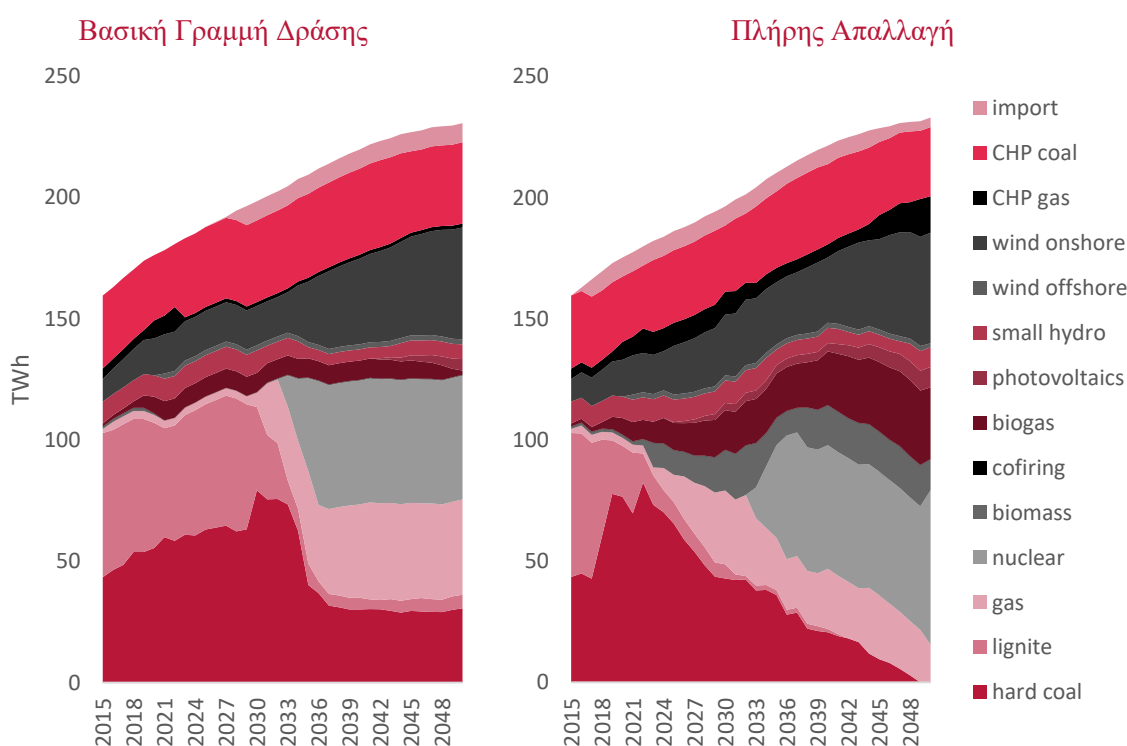
Η μεγάλη διαφορά στην απαιτούμενη επένδυση μεταξύ του σεναρίου της βασικής γραμμής δράσης και του σεναρίου της πλήρους επιλογής από τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα στα τέλη του 2020, μεταφράζεται σε σχετικά μεγάλες διαφορές όσον αφορά το Ακαθάριστο Εγχώριο Προϊόν (Α.Ε.Π) και την κατανάλωση μεταξύ των δύο πολιτικών. Το 2030, το Α.Ε.Π στο σενάριο της πλήρους απαλλαγής είναι κατά 1,5% χαμηλότερο από τη βασική γραμμή δράσης. Η διαφορά στην κατανάλωση είναι ακόμη πιο έντονη· το 2030, η κατανάλωση είναι 2% χαμηλότερη από ό,τι στο βασικό σενάριο. Η προσομοίωση δείχνει επίσης ότι αυτή η πτώση είναι προσωρινή και δεν υπάρχει αξιοσημείωτη διαφορά μεταξύ των δύο σεναρίων στη δεκαετία του 2040 και του 2050. Αυτό διαφαίνεται στο παρακάτω διάγραμμα:



Σχήμα 5.3 Η διαφορά στο Α.Ε.Π και στην κατανάλωση μεταξύ της βασικής γραμμής δράσης και της πλήρους απαλλαγής, δεδομένου των χαμηλών τιμών που επιβάλλει η Ε.Ε. Οι μονάδες στον κάθετο άξονα η εκφράζουν το επίπεδο του Α.Ε.Π στη βασική γραμμή δράσης.

5.2 Χαμηλά κόστη εγκατάστασης Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας

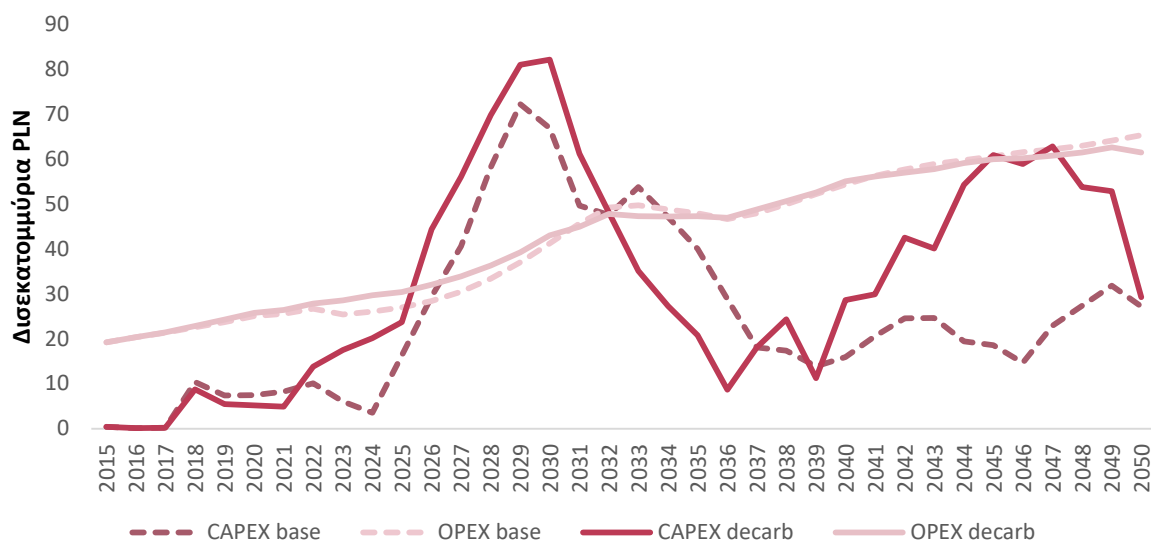
Για να εξετάσουμε την περίπτωση της ταχείας μείωσης του κόστους εγκατάστασης μεγάλων Α.Π.Ε διακοπτόμενης λειτουργίας (ηλιακή φωτοβολταϊκά, χερσαία και υπεράκτια αιολική ενέργεια), χρησιμοποιούμε τις χαμηλού κόστους προσομοιώσεις τροχιάς στο (Hand, et al., 2017)), οι οποίες υποθέτουν ότι μεταξύ του 2017 και του 2030, τα κόστη των φωτοβολταϊκών, της χερσαίας και της υπεράκτιας αιολικής ενέργειας μειώνονται από 43%, 21% και 40%, έναντι 24%, 7% και 31% της εκάστοτε τροχιάς που χρησιμοποιούνται στο **Κεφάλαιο 2**. Παραδόξως, μια μεγάλη μείωση του κόστους εγκατάστασης των Α.Π.Ε δεν αλλάζει σημαντικά τη σύνθεση του βέλτιστου μείγματος στη βασική γραμμή δράσης, διότι η ενέργεια που παράγεται από τα φωτοβολταϊκά εισάγεται στο μείγμα στα τέλη της δεκαετίας του 2040. Το μερίδιό της το 2050, ωστόσο, είναι αμελητέο. Παρομοίως, μπορούν να παρατηρηθούν ίχνη της υπεράκτιας αιολικής ενέργειας, αλλά σαφώς αυτή η τεχνολογία όπως διακρίνεται, δεν παίζει σημαντικό ρόλο.



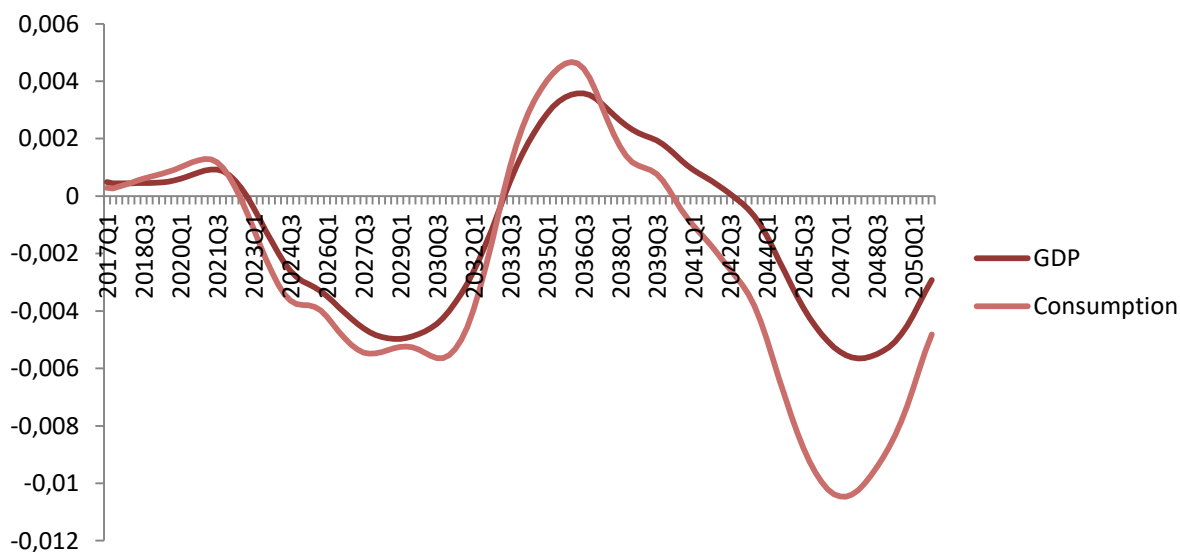
Σχήμα 5.4 Το βέλτιστο μείγμα ηλεκτρικής ενέργειας για τις 2 κλιματικές πολιτικές-βασική γραμμή δράσης (αριστερά) και πλήρης απαλλαγή από τις εκπομπές (δεξιά) με την παραδοχή του χαμηλού κόστους των Α.Π.Ε διακοπτόμενης λειτουργίας

Το χαμηλότερο κόστος εγκατάστασης των Α.Π.Ε μειώνει το Αρχικό Κεφάλαιο Α.Κ και στις δύο οδούς όπως θα δούμε στο παρακάτω διάγραμμα. Αναμένεται ότι αυτό το φαινόμενο θα είναι πιο ισχυρό στη δράση της πλήρους απαλλαγής, λόγω της μεγαλύτερης ανάπτυξης των Α.Π.Ε. Ως

εκ τούτου, η διαφορά μεταξύ Αρχικού Κεφαλαίου των δύο πολιτικών μειώνεται· το σωρευτικό κεφάλαιο μεταξύ 2017 και 2030 στο μονοπάτι της πλήρους απαλλαγής είναι μεγαλύτερο κατά 300 δισεκατομμύρια PLN, σε σύγκριση με το μονοπάτι της βασικής γραμμής δράσης, υπό την προϋπόθεση χαμηλού κόστους εγκατάστασης Α.Π.Ε σε σύγκριση με 330 δισεκατομμύρια PLN σύμφωνα με τις παραδοχές που έχουμε λάβει υπόψη μας στο **Κεφάλαιο 2**.



Σχήμα 5.5 Το Αρχικό Κεφάλαιο (Α.Κ-CAPEX) και οι Λειτουργικές Δαπάνες (Λ.Δ-OPEX) για τη βασική γραμμή δράσης και την πλήρη απαλλαγή, δεδομένου του χαμηλού κόστους των Α.Π.Ε διακοπτόμενης λειτουργίας

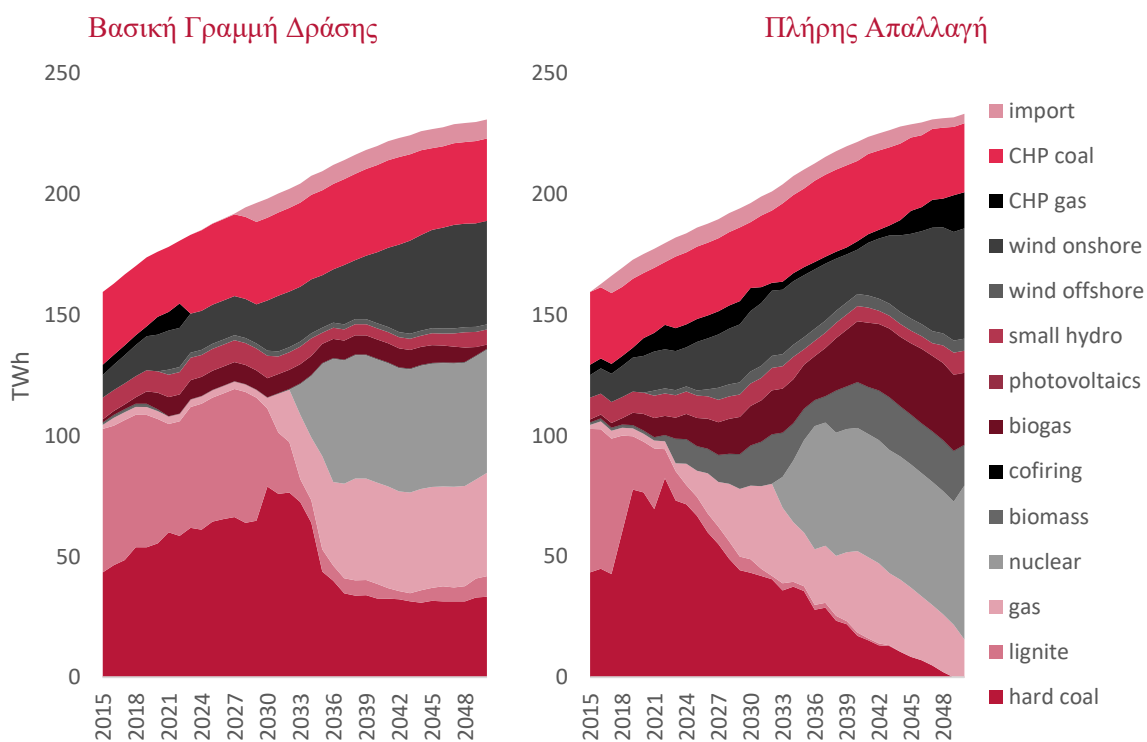


Σχήμα 5.6 Η διαφορά στο Α.Ε.Π και στην κατανάλωση μεταξύ της βασικής γραμμής δράσης και της πλήρους απαλλαγής, δεδομένου του χαμηλού κόστους των Α.Π.Ε διακοπτόμενης λειτουργίας. Οι μονάδες στον κάθετο άξονα γ εκφράζουν το επίπεδο του Α.Ε.Π στη βασική γραμμή δράσης.

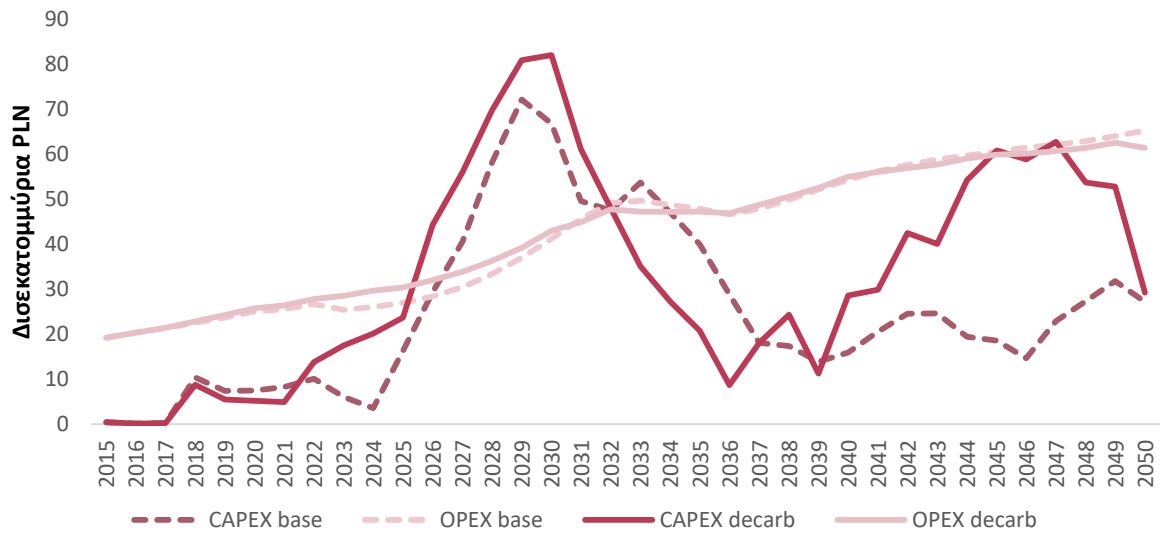
Το μοτίβου του Α.Ε.Π και της κατανάλωσης μοιάζει με το μοτίβο που παρατηρείται στο σενάριο που χρησιμοποιήθηκε στο **Κεφάλαιο 2**, εκτός από τη δεκαετία του 2030, όπου στην πορεία της πλήρους απαλλαγής δημιουργείται απώλεια, το μέγεθος όμως της οποίας είναι ασήμαντο. Η μεγαλύτερη απώλεια όσον αφορά το Α.Ε.Π και την κατανάλωση, πραγματοποιείται στα τέλη της δεκαετίας του '40. Το 2047 συγκεκριμένα, η κατανάλωση, ακολουθώντας την πολιτική της πλήρους απεξάρτησης από τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου είναι 1% χαμηλότερη από ό,τι στο μονοπάτι της βασικής γραμμής δράσης

5.3 Υψηλά κόστη εγκατάστασης Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας

Για λόγους πληρότητας, παραθέτουμε επίσης τα αποτελέσματα της ανάλυσης υπό την προϋπόθεση ότι το κόστος εγκατάστασης των Α.Π.Ε ακολουθεί την 'υψηλή' τροχιά του (Hand, et al., 2017)

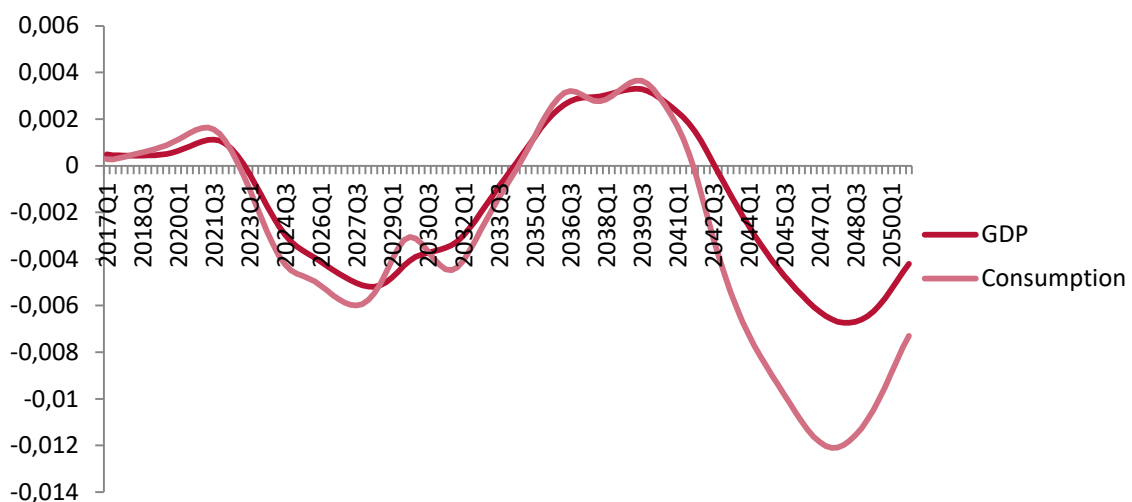


Σχήμα 5.7 Το βέλτιστο μείγμα ηλεκτρικής ενέργειας για τις 2 κλιματικές πολιτικές-βασική γραμμή δράσης (αριστερά) και πλήρης απαλλαγή από τις εκπομπές (δεξιά) με την παραδοχή του υψηλού κόστους των Α.Π.Ε διακοπτόμενης λειτουργίας



Σχήμα 5.8 Το Αρχικό Κεφάλαιο (Α.Κ-CAPEX) και οι Λειτουργικές Δαπάνες (Λ.Δ-OPEX) για τη βασική γραμμή δράσης και την πλήρη απαλλαγή, δεδομένου του υψηλού κόστους των Α.Π.Ε διακοπτόμενης λειτουργίας.

Τα αποτελέσματα για το Α.Ε.Π και την κατανάλωση στο σενάριο με το υψηλό κόστος των εγκαταστάσεων Α.Π.Ε δεν διαφέρουν σημαντικά από τα αντίστοιχα αποτελέσματα που προέκυψαν στο **Κεφάλαιο 2**. Η απώλεια που δημιουργείται στην κατανάλωση είναι ελαφρώς μεγαλύτερη (1,2% το 2047), επειδή τώρα η μεγάλη χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας είναι πιο δαπανηρή. Ωστόσο, το μέγεθος της απώλειας παραμένει μικρό, από μακροοικονομική άποψη.

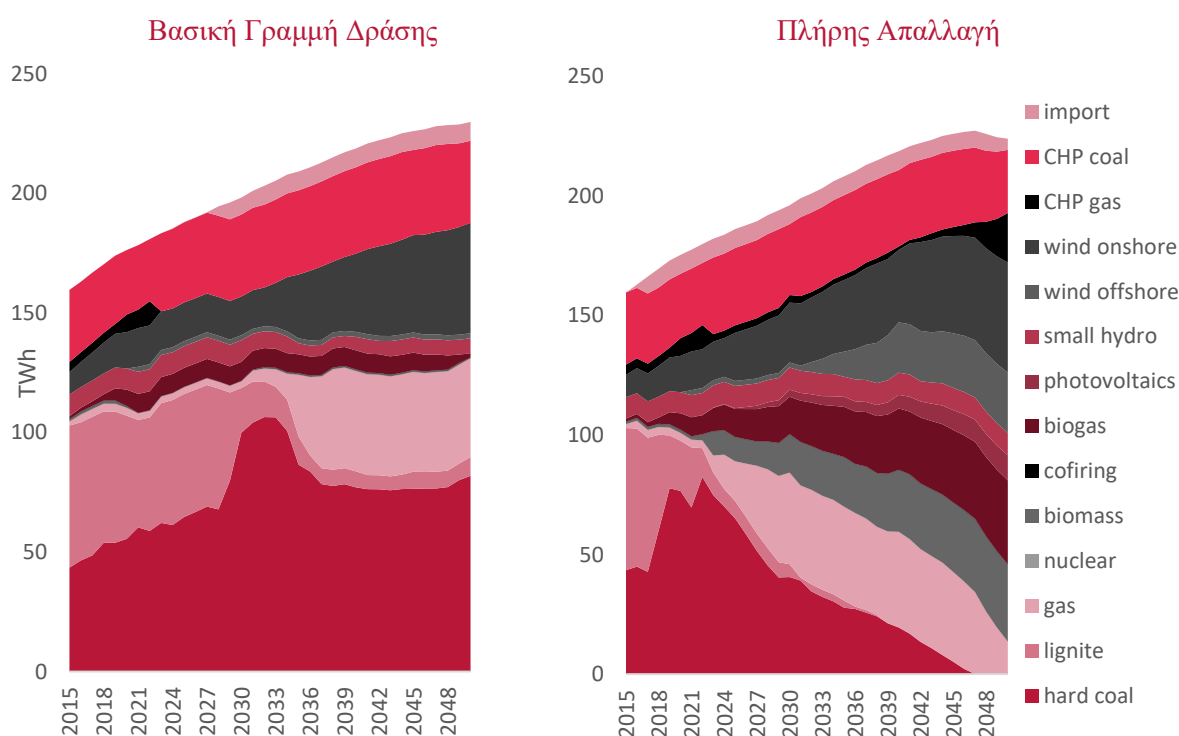


Σχήμα 5.9 Η διαφορά στο Α.Ε.Π και στην κατανάλωση μεταξύ της βασικής γραμμής δράσης και της πλήρους απαλλαγής, δεδομένου του υψηλού κόστους των Α.Π.Ε. διακοπτόμενης λειτουργίας. Οι μονάδες στον κάθετο άξονα γ εκφράζουν το επίπεδο του Α.Ε.Π στη βασική γραμμή δράσης.

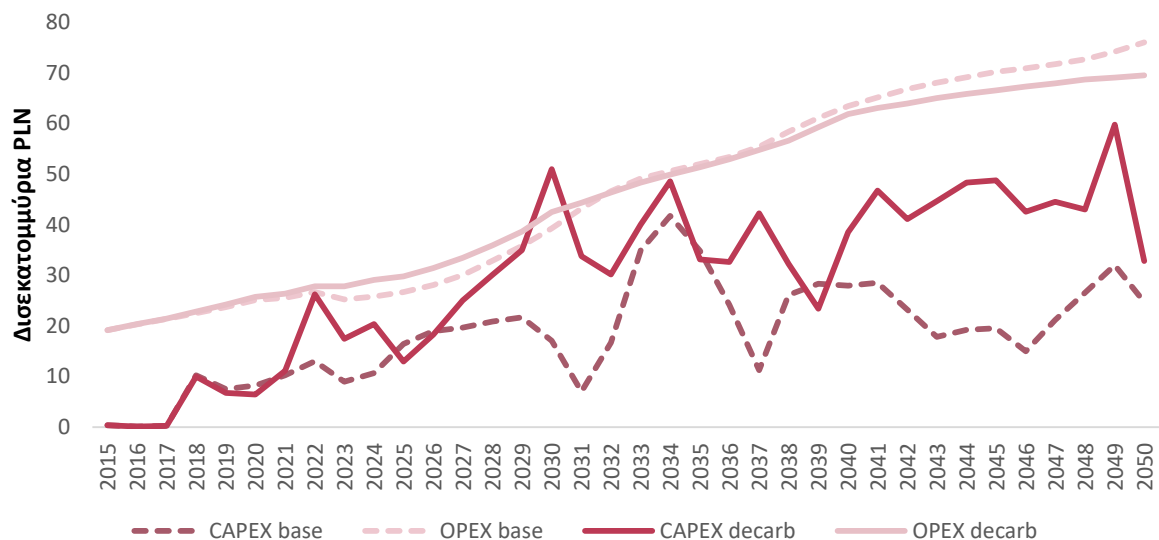
5.4 Χωρίς την πυρηνική ενέργεια

Μία τελευταία προσομοίωση της ανάλυσης που πραγματοποιούμε, διεξάγεται υπό το σενάριο της απουσίας της πυρηνική τεχνολογίας. Η υιοθέτηση αυτής της τεχνολογίας παραμένει αβέβαιη για δύο λόγους: αρχικά, μπορεί να παρεμποδιστεί από ομάδες οικολόγων και από αρμόδιους χάραξης πολιτικής σχετικά με συναφή ζητήματα ασφάλειας και δεύτερον, απαιτεί μεγάλης κλίμακας επιστράτευση κεφαλαίων σε σχετικά σύντομο χρονικό διάστημα, γεγονός που μπορεί να μην είναι εφικτό.

Η πρώτη σημαντική παρατήρηση από αυτή την ανάλυση, είναι ότι η πυρηνική ενέργεια μπορεί να αντικατασταθεί σε μεγάλο βαθμό ,από την υπεράκτια αιολική ενέργεια (καταλαμβάνει το 11% το 2050, ποσοστό μεγαλύτερο από την ηλιακή ενέργεια των φωτοβολταϊκών) στο μονοπάτι της πλήρους απαλλαγής. Η δεύτερη παρατήρηση είναι ότι η απουσία πυρηνικής ενέργειας στη δράση πλήρους απεξάρτησης από τις εκπομπές του θερμοκηπίου, μπορεί να οδηγήσει σε ελλείψεις ισχύος. Η προσομοίωση δείχνει μια μικρή έλλειψη 3% που εμφανίζεται στο δεύτερο μισό της δεκαετίας του 2040. Για να αποφευχθεί αυτό, είναι αναγκαία η μείωση στη ζήτηση.

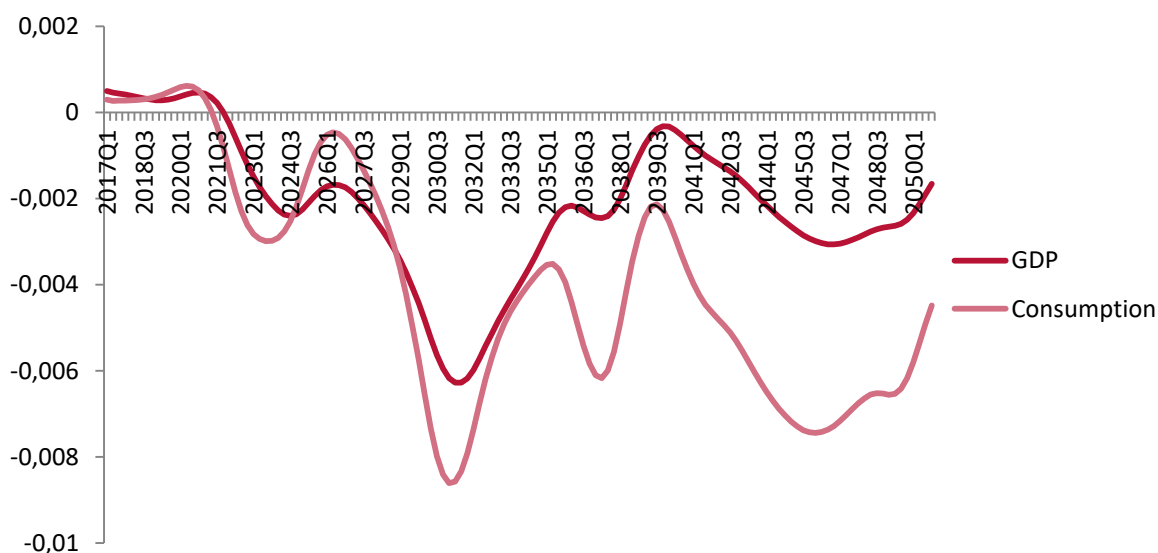


Σχήμα 5.10 Το βέλτιστο μείγμα ηλεκτρικής ενέργειας για τις 2 κλιματικές πολιτικές-βασική γραμμή δράσης (αριστερά) και πλήρης απαλλαγή από τις εκπομπές (δεξιά) ,υποθέτοντας ότι η πυρηνική ενέργεια δε είναι διαθέσιμη.



Σχήμα 5.11 Το Αρχικό Κεφάλαιο (Α.Κ-CAPEX) και οι Λειτουργικές Δαπάνες (Λ.Δ-OPEX) για τη βασική γραμμή δράσης και την πλήρη απαλλαγή, υποθέτοντας ότι η πυρηνική ενέργεια δεν είναι διαθέσιμη.

Η αυξημένη κατασκευή μονάδων παραγωγής φυσικού αερίου και Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας, στην πολιτική πλήρους απαλλαγής από τις εκπομπές, συνεπάγεται σε αυτό το σενάριο, μεγάλη ζήτηση για επενδύσεις, η οποία ξεκινάει στα τέλη του 2020 και διαρκεί μέχρι το τέλος της εξεταζόμενης περιόδου, όπως βλέπουμε στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 5.12). Αυτή η αναγκαιότητα επενδύσεων μεταφράζεται σε απώλειες στο Α.Ε.Π και στην κατανάλωση. Ωστόσο, όπως και στα άλλα σενάρια, αυτή η απώλεια είναι αμελητέα.



Σχήμα 5.12 Η διαφορά στο Α.Ε.Π και στην κατανάλωση μεταξύ της βασικής γραμμής δράσης και της πλήρους απαλλαγής, υποθέτοντας ότι η πυρηνική ενέργεια δεν είναι διαθέσιμη. Οι μονάδες στον κάθετο άξονα γ εκφράζουν το επίπεδο του Α.Ε.Π στη βασική γραμμή δράσης.

6 Συμπεράσματα

Εν κατακλείδι, συμπεραίνουμε αρχικά πως, η κλασική οικονομική ανάλυση παρέχει μια σημαντική και αναλυτική εικόνα των ευκαιριών και των προκλήσεων που αντιμετωπίζει η δράση της πλήρους απαλλαγής του ενεργειακού συστήματος από τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου, δεν είναι, ωστόσο, σε θέση να λάβει υπόψη όλες τις επιπτώσεις που θεωρούνται σημαντικές από τα ενδιαφερόμενα μέρη. Στη μελέτη που πραγματοποιήσαμε, παρουσιάζουμε πώς μπορεί να συμβάλει, αρχικά ένα μοντέλο βελτιστοποίησης «bottom-up», στη συνέχεια ένα μακροοικονομικό μοντέλο «top-down» και τέλος ένα μοντέλο Ασαφών Γνωστικών Χαρτών (FCM) με στηριζόμενο στα ενδιαφερόμενα μέρη, ώστε να παρέχει μια ολοκληρωμένη εικόνα των οικονομικών κινδύνων. Αυτή η ολοκληρωτική προσέγγιση συμβαδίζει με τα προτεινόμενα επιστημονικά παραδείγματα για τη στήριξη της χάραξης πολιτικών για το κλίμα (Doukas, et al., 2018). Το καινοτόμο χαρακτηριστικό αυτής της ανάλυσης είναι το γεγονός πως είναι η πρώτη μελέτη για τη χρήση αυτών των εργαλείων από κοινού, διότι κάθε ένα από αυτά τα είδη εργαλείων χρησιμοποιείται ευρέως στη βιβλιογραφία για την αξιολόγηση των πολιτικών για το κλίμα αλλά μεμονωμένα.

Επιπλέον, στην παρούσα διπλωματική, στοχεύουμε να υποστηρίξουμε μια συζήτηση για τη μετάβαση του πολωνικού τομέα ενέργειας, λόγω της κλιματικής αλλαγής. Η «bottom-up» ανάλυση προβλέπει ότι η οδός ελάχιστου κόστους, υπό τον περιορισμό της τριπλής μείωσης των εκπομπών, σημαίνει να ακολουθηθεί η δράση της πλήρους απαλλαγής από τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου, η οποία συνεπάγεται τη σταδιακή αντικατάσταση του άνθρακα με ένα μείγμα αιολικής ενέργειας, πυρηνικών, φυσικού αερίου, βιοαερίου και βιομάζας. Αντίθετα, εάν αγνοήσουμε τον περιορισμό των εκπομπών, το μονοπάτι με το χαμηλότερο κόστος συνεπάγεται μέτρια μείωση της κατανάλωσης άνθρακα, κυρίως μετά το 2030, που συμφωνεί με τη βασική γραμμή δράσης. Η μακροοικονομική ανάλυση αποδεικνύει ότι η τελευταία πορεία, όπου δεν

έχουμε περιορισμούς για τις εκπομπές, συνδέεται με υψηλότερο Α.Ε.Π και κατανάλωση από το προηγούμενο σενάριο της πλήρους απαλλαγής, ωστόσο η διαφορά είναι αμελητέα.

Επιπροσθέτως, δεσμεύουμε το δείγμα των ενδιαφερόμενων μερών που συμμετείχαν και χρησιμοποιούμε το FCM για να περιγράψουμε τις επιδράσεις που από την πλευρά των ενδιαφερομένων, αποτελούν σημαντικές συνιστώσες για την αξιολόγηση των δράσεων και τα οποία δεν λήφθηκαν υπόψη στο πρώτο βήμα της ανάλυσης μας. Οι προσομοιώσεις του FCM δείχνουν ότι οι πολιτικές που προωθούν την ανάπτυξη των Α.Π.Ε συνδέονται με μεγαλύτερα οικονομικά οφέλη από τις πολιτικές που διατηρούν το ήδη υπάρχον καθεστώς . Το αποτέλεσμα αυτό έρχεται σε αντίθεση με τα ευρήματα της τυποποιημένης οικονομικής ανάλυσης και επισημαίνει πως, μέσω των γνωστικών χαρτών, υφίστανται σημαντικοί δίαυλοι που αναδεικνύουν τα θετικά αποτελέσματα των πολιτικών απαλλαγής από τον άνθρακα, τα οποία παραβλέπονται στα τυποποιημένα μοντέλα.

Τέλος, οι προσομοιώσεις FCM και οι απαντήσεις των ενδιαφερομένων υπογραμμίζουν τις βασικές αβεβαιότητες που θα μπορούσαν ενδεχομένως να μεταβάλουν την αξιολόγηση κάθε δράσης: διαθεσιμότητα κεφαλαίου, εξωγενής τεχνολογική πρόοδος τεχνολογιών Α.Π.Ε, διεθνείς σχέσεις, κόστος και διαθεσιμότητα αερίου και πυρηνικής τεχνολογίας και τιμές που επιβάλλονται από την Ε.Ε. Ακόμη, αναλύοντας εις βάθος ορισμένες από αυτές τις αβεβαιότητες επαναλαμβάνοντας τα αποτελέσματα των μοντέλων μας με βάση τις εναλλακτικές υποθέσεις σχετικά με την «τροχιά» του κόστους των ΑΠΕ, των επιβληθέντων τιμών από την Ε.Ε και της διαθεσιμότητας της πυρηνικής τεχνολογίας. Μέσα από την προαναφερθείσα ανάλυση, διαπιστώνουμε ότι η μεγαλύτερη οικονομική ζημιά που συνδέεται με τη διαδικασία της πλήρους απαλλαγής των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου, παρατηρείται στο σενάριο των χαμηλών τιμών του της Ε.Ε. Ωστόσο, ακόμη και σε αυτό το σενάριο, η ζημιά δεν είναι σημαντική αφού το 2030 αποτελεί το 2% του Α.Ε.Π και είναι σχεδόν μηδενική το 2050.

Οι μελλοντικές προοπτικές της μελέτης μας περιλαμβάνουν την ποσοτικοποίηση των αβεβαιοτήτων FCM που βασίζονται σε σύνολα δεδομένων (π.χ. από τη βάση δεδομένων Κοινωνικοοικονομικών Σεναρίων), καθώς και την εξαντλητική αξιολόγηση της πληθώρας των διαύλων κινδύνου που προσδιορίζονται από τα ενδιαφερόμενα μέρη στις μακροοικονομικές αναλύσεις.

7 Βιβλιογραφία

Acemoglu, D., Aghion, P., Bursztyn, L. & Hemous, D., 2012. The environment and directed technical change. *American Economic Review*, 102(1), 131–166..

Akimoto, K. και συν., 2010. Estimates of GHG emission reduction potential by country, sector, and cost. *Energy Policy. Energy Economics*, pp. 38(7), 3384-3393.

Akimoto, K., Tomoda, T., Fujii, Y. & Yamaji, K., 2004. Assessment of global warming mitigation options with integrated assessment model DNE21.. *Energy Policy*, pp. 34, S346-358.

Author, H. D., Dorn, D. & Hanson, H. G., 2016. The china shock: Learning from labor-market adjustment to large changes in trade.. pp. 8, 205-240.

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

Bchir, H. M., Decreux, Y., Guerin, L. J. & Jean, S., 2002. The impact of EU enlargement on Member States: a CGE approach (Vol. 10). CEPII..

Bernardo, G. & D’Alessandro, S., 2016. Systems-dynamic analysis of employment and inequality impacts of low-carbon investments.. *Environmental Innovation and Societal Transitions*, pp. 21, 123-146.

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

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

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

Bukowski, M. & Kowal, P., 2010.). Large scale, multi-sector DSGE model as a climate policy assessment tool - Macroeconomic Mitigation Options (MEMO) model for Poland. IBS Working Papers 3, Instytut Badan Strukturalnych..

Bukowski, M. & Kowal, P., 2010. Large scale, multi-sector DSGE model as a climate policy assessment tool - Macroeconomic Mitigation Options (MEMO) model for Poland. IBS Working Papers 3, Instytut Badan Strukturalnych..

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

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

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

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

Capros, P. και συν., 2012. Model-based analysis of decarbonising the EU economy in the time horizon to 2050.. *Energy Strategy Reviews*, pp. 1(2), 76-84.

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

Denholm, P. & Margolis, R. M., 2007. Evaluating the limits of solar photovoltaics (PV) in traditional electric power systems.. *Energy policy*, pp. 35(5), 2852-2861.

Edmonds, J., Pitcher, H. & Sands, R., 2004. Second generation model 2004: an overview. *Special Issue on Endogenous*, 30. pp. 425-448.

Elliott, D., 2016. A balancing act for renewables. *Nature Energy*, 1..

Fujino, J. και συν., 2006. Multi-gas mitigation analysis on stabilization scenarios using AIM global model. *The Energy Journal*, 343-353..

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

Goettle, R. J. και συν., 2007. IGEM, an inter-temporal general equilibrium model of the US economy with emphasis on growth, energy and the environment. Prepared for the US Environmental Protection Agency (EPA), Office of Atmospheric Programs, Climate Change Division. *EPA Contract EP-W-05-035*.

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

- Goulder, H. L. & Shneieder, H. S., 1999. Induced technological change and the attractiveness of CO2 abatement policies.. *Resource and energy economics*, pp. 21(3-4), 211-253.
- Groumpos, P. P., 2010. Fuzzy cognitive maps: basic theories and their application to complex systems. In *Fuzzy cognitive maps* (pp. 1-22).. *Springer, Berlin, Heidelberg*.
- Hainoun, A., Aldin, S. M. & Almoustafa, S., 2010. Formulating an optimal long-term energy supply strategy for Syria using MESSAGE model.. *Energy policy*, pp. 38(4), 1701-1714.
- Hand, M. et al., 2017. Annual Technology Baseline (ATB): Cost and Performance Data for Electricity Generation Technologies(No. 71). National Renewable Energy Laboratory-Data (NREL-DATA), Golden, CO(United States).
- Hand, M. και συν., 2017. Annual Technology Baseline (ATB): Cost and Performance Data for Electricity Generation Technologies.
- Hedenus, F., Azar, C. & Lindgren, K., 2006. Induced technological change in a limited foresight optimization model.. *The Energy Journal*, pp. 109-122.
- Jakeman, G. & Fisher, S. B., 2006. Benefits of multi-gas mitigation: An application of the Global Trade and Environment Model (GTEM).. *The Energy Journal*, pp. 323-342.
- Kainuma, M., Matsuoka, Y. & Morita, T., 1999. Analysis of post-Kyoto scenarios: The Asian-Pacific integrated model. *The Energy Journal*, 207-220..
- Kampelmann, S., Kaethler, M. & Hill, V. A., 2017. Curating complexity: An artful approach for real-world system transitions. *Environmental Innovation and Societal Transitions*..
- Kemfert, C., 2001. Economy-energy-climate interaction: the model wiagem..
- Kemfert, C., 2005. Induced technological change in a multi-regional, multi-sectoral, integrated assessment model (WIAGEM): Impact assessment of climate policy strategies.. *Ecological economics*, pp. 54(2), 293-305.
- Kemfert, C., Truong, P. T. & Bruckner, T., 2006. Economic Impact Assessment of Climate Change—A Multi-gas Investigation with WIAGEM-GTAPEL-ICM.. *The Energy Journal*, pp. 441-460.
- Kemfert, C. & Truong, T., 2007. Impact assessment of emissions stabilization scenarios with and without induced technological change.. *Energy Policy*, pp. 35 (11), 5337-5345.
- Kesicki, F. & Yanagisawa, A., 2015. Modelling the potential for industrial energy efficiency in IEA's World Energy Outlook.. *Energy Efficiency*, pp. 8(1), 155-169.
- Kitous, A., Criqui, P., Bellevrat, E. & Chateau, B., 2010. Transformation patterns of the worldwide energy system-scenarios for the century with the POLES model.. *The Energy Journal*, pp. 49-82.
- Kiula, O., 2018. Decarbonisation perspectives for the Polish economy.. *Energy Policy*, pp. 118, 69-76.

Klima, G. et al., 2015. Model Optymalnego Miksu Energetycznego dla Polski do roku 2060. Wersja 3.0". Departament Analiz Strategicznych, Kancelaria Prezesa Rady Ministrów, Warsaw, 2 February 2015..

Kosko, B., 1986. Fuzzy cognitive maps. *International journal of man-machine studies*, pp. 24(1), 65-75.

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

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

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

Lapillonne, B., 1980. Long term perspectives of the US energy demand: application of the MEDEE 2 model to the US.. *Energy*, pp. 5(3), 231-257.

Lejour, A., Veenendaal, P. & Verweij, G. & V. L. N., 2006. WorldScan; a model for international economic policy analysis (No. 111). CPB Netherlands Bureau for Economic Policy Analysis..

Mallampalli, V. R. και συν., 2016. Methods for translating narrative scenarios into quantitative assessments of land use change.. *Environmental Modelling & Software*., pp. 82, 7-20.

Masui, T., 2005. Policy Evaluations under Environmental Constraints Using a Computable General Equilibrium Model.. *European Journal of Operational 166(3)*, pp. 843-855.

Masui, T., Rana, A. & Matsuoka, Y., 2003. AIM/material model. In *Climate Policy Assessment* (pp. 177-196). Springer Japan..

Mattsson, N. & Wene, O. C., 1997. Assessing new energy technologies using an energy system model with endogenized experience curves.. *International Journey of energy research*, pp. 21(4), 385-393.

Mayer, A., 2018. A just transition for coal miners? Accountability frames, community economic identity, and just transition policy support among local policy actors. *Environmental Innovation and Societal Transitions*..

McKibbin, J. W., Lee, W. J. & Cheong, I., 2004. A dynamic analysis of the Korea–Japan free trade area: simulations with the G-cubed Asia–Pacific model..

McKibbin, J. W. & Wilcoxon, J. P., 1999. The theoretical and empirical structure of the G-Cubed model.. *Economic modelling*, pp. 16 (1), 463-477.

Mima, S. & Criqui, P., 2009. Assessment of the impacts under future climate change on the energy systems with the POLES model. In *International energy workshop*..

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

- Nicoletti, G. & Oliveira-Martins, J., 1993. Global effects of the European carbon tax. In *The European Carbon Tax: An Economic Assessment* (pp. 15-48).. *Springer Netherlands*.
- Nikas, A. & Doukas, H., 2016. Developing robust climate policies: a fuzzy cognitive map approach. In *Robustness Analysis in Decision Aiding, Optimization, and Analytics* (pp. 239-263). Springer, Cham..
- Nikas, A. και συν., 2017. Managing stakeholder knowledge for the evaluation of innovation systems in the face of climate change.. *Journal of Knowledge Management*, pp. 21(5),1013-1034.
- Nikas, A., Doukas, H. & Papandreou, A., 2018a. A Detailed Overview and Consistent Classification of Climate-Economy Models. In *Understanding Risks and Uncertainties in Energy and Climate Policy: Multidisciplinary Methods and Tools towards a Low Carbon Society*.. *Springer Berlin Germany*.
- Nikas, A., Doukas, H., van der Gaast, W. & Szendrei, K., 2018b. Expert views on low-carbon transition strategies for the Dutch solar sector: A delay-based fuzzy cognitive mapping approach. *IFAC-PapersOnLine*..
- Nikas, A., Ntanos, E. & Doukas, H., 2018c. A semi-quantitative modelling application for assessing energy efficiency strategies. *Applied Soft Computing*..
- Nilsson, C., 1999. A Unilateral Versus a Multilateral Carbon Dioxide Tax-A Numerical Analysis with the European Model GEM-E3 (No. 66)..
- O'zesmi, U. & O'zesmi, L. S., 2004. O' zesmi, U., O' zesmi, S.L.: Ecological models based on people's knowledge: a multi-step fuzzy cognitive mapping approach. *Ecol. Model.* 176(1). pp. 43-64.
- O'Neill, B. C. και συν., 2017. The roads ahead: narratives for shared socioeconomic pathways describing world futures in the 21st century.. *Global Environmental Change*, pp. 42, 169-180.
- Olazabal, M. & Pascual, U., 2016. Use of fuzzy cognitive maps to study urban resilience and transformation.. *Environmental Innovation and Societal Transitions*, pp. 18, 18-40.
- Paltsev, S. και συν., 2005. The MIT emissions prediction and policy analysis (EPPA) model: version 4. MIT Joint Program on the Science and Policy of Global Change..
- Pant, M. H., 2007. GTEM draft: global trade and environmental model.. *Australian Bureau of Agricultural and Resource Economics*..
- Parrado, R. & De Cian, E., 2014. Technology spillovers embodied in international trade: Intertemporal, regional and sectoral effects in a global CGE framework.. *Energy Economics*, pp. 41, 76-89.
- Plinkie, E., Haasis, D. H., Rentz, O. & Sivroglu, M., 1990. Analysis of energy and environmental problems in Turkey by using a decision support model.. *Ambio*, pp. 75-81.
- Rafaj, A. & Kypreos, S., 2007. Internalisation of external cost in the power generation sector: Analysis with Global Multi-regional MARKAL model.. *Energy Policy*, pp. 35(2), 828-843.

- S., V. και συν., 2018. Distributed Real-Time Simulation and its Applications to Wind Energy Research. *IEEE International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems (PMAPS)*.
- Schumacher, K. & Sands, D. R., 2006. Innovative energy technologies and climate policy in Germany.. *Energy Policy*, pp. 34(18), 3929-3941.
- Seebregts, J. A., Goldstein, A. G. & Smekens, K., 2002. Energy/environmental modeling with the MARKAL family of models. In *Operations research proceedings 2001* (pp. 75-82).. *Springer Berlin Heidelberg*.
- Seebregts, J. A., Kram, T., Schaeffer, J. G. & Bos, A., 2000. Endogenous learning and technology clustering: analysis with MARKAL model of the Western European energy system.. *International Journal of Global Energy Issues*, pp. 14(1-4), 289-319.
- Sullivan, P., Krey, V. & Riahi, K., 2013. Impacts of considering electric sector variability and reliability in the MESSAGE model.. *Energy Strategy Reviews*, pp. 1(3), 157-163.
- Tyrowicz, J. & Van der Velde, L., 2014. Can We Really Explain Worker Flow in Transition Economies. Faculty of Economic Sciences, University of Warsaw: Warszawa, Poland..
- Van de Mensbrugge, D., 2005. Linkage technical reference document. Development Prospects Group, The World Bank..
- Van der Voort, E., 1982. The EFOM 12C energy supply model within the EC modelling system.. *Omega*, pp. 10(5), 507-523.
- Van Regemorter, D., 2005. Computable General equilibrium model for studying economy-energy-environment interactions for Europe and the world..
- Van Vliet, M., Kok, K. & Veldkamp, T., 2010. Linking stakeholders and modellers in scenario studies: The use of Fuzzy Cognitive Maps as a communication and learning tool.. *Futures*, pp. 42(1), 1-40.
- Vergini, E. & Groumpos, P., 2017. New concerns on fuzzy cognitive maps equation and sigmoid function. In *Control and Automation (MED), 2017 25th Mediterranean Conference on* (pp. 1113-1118). IEEE..
- Viguier, L. L., Babiker, H. M. & Reilly, M. J., 2003. The costs of the Kyoto Protocol in the European Union.. *Energy Policy*, pp. 31 (5), 459-481.
- Walmsley, L. T., Dimaranan, V. B. & McDougall, A. R., 2006. A baseline scenario for the dynamic GTAP model. *Dynamic Modeling and Applications for Global Economic Analysis*, 136..
- Wing., S. I., 2011. Computable general equilibrium models for the analysis of economy–environment interactions.. In *Research tools in natural resource and environmental economics*, 255.

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

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

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

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

Τσαγκαράκη, Α., 2018. Βιβλιογραφική Ανασκόπηση των Μοντέλων Κλίματος- Οικονομίας για την υποστήριξη της διαμόρφωσης κλιματικής πολιτικής.