



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

**Εξέταση των αντισταθμίσεων μεταξύ της
ανάπτυξης της καθαρής ηλεκτροπαραγωγής και
των απαιτήσεων σε όρους χρήσης γης:
Η περίπτωση της Ελλάδας**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Βεζυράκης Σπύρος

Επιβλέπων : Χάρης Δούκας,
Αν. Καθηγητής Ε.Μ.Π.
Υπεύθυνος : Διαμαντής Κουτσανδρέας
Υποψήφιος Διδάκτωρ Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Μάρτιος 2022



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

**Εξέταση των αντισταθμίσεων μεταξύ της
ανάπτυξης της καθαρής ηλεκτροπαραγωγής και
των απαιτήσεων σε όρους χρήσης γης:
Η περίπτωση της Ελλάδας**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Βεζυράκης Σπύρος

Επιβλέπων : Χάρης Δούκας,

Αν. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Υπεύθυνος : Διαμαντής Κουτσανδρέας

Υποψήφιος Διδάκτωρ Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 8η Μαρτίου 2022.

.....
Χάρης Δούκας
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Ιωάννης Ψαρράς
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Δημήτριος Ασκούνης
Αν. Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Μάρτιος 2022

.....
Σπύρος Βεζυράκης

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

Copyright © Σπύρος Βεζυράκης, 2022.

Με την 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

Η μετάβαση σε μία οικονομία με μηδενικό ισοζύγιο άνθρακα συνεπάγεται μεγάλες επενδύσεις σε ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ΑΠΕ) στα επόμενα χρόνια, μια τάση που έχει ήδη ξεκινήσει σε παγκόσμιο επίπεδο. Για αυτό το σκοπό είναι απαραίτητος είναι ο σχεδιασμός των κατάλληλων ενεργειακών πολιτικών. Η μοντελοποίηση ενεργειακών συστημάτων με χρήση μοντέλων ενεργειακού προγραμματισμού αποτελεί χρήσιμο εργαλείο στα χέρια των υπευθύνων για τη χάραξη αυτών των πολιτικών, καθώς προσφέρουν σημαντικές πληροφορίες για τον σχεδιασμό αυτών των πολιτικών και την αξιολόγηση της εφικτότητάς τους. Σημαντική παράλληλα είναι η συμβολή τους σε διαφορετικές πτυχές της κοινωνίας, παρέχοντας χρήσιμα δεδομένα πάνω στην πρόβλεψη χρήσης πόρων, τη μελλοντική πρόσβαση σε πηγές ενέργειας, και εν γένει τη βιώσιμη ανάπτυξη.

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η εξέταση των αντισταθμίσεων μεταξύ της ανάπτυξης της καθαρής ηλεκτροπαραγωγής και των απαιτήσεών τους σε όρους χρήσης γης. Αυτό πραγματοποιείται μέσα από επέκταση του κώδικα του εργαλείου μοντελοποίησης ενεργειακών συστημάτων OSeMOSYS, με σκοπό την δυνατότητα εφαρμογής προαιρετικών περιορισμών στην αύξησης χρήσης γης. Στη συνέχεια το νέο μοντέλο εφαρμόζεται στο ηλεκτροπαραγωγικό σύστημα της Ελλάδας και μελετάται η επίδραση διαφορετικών περιορισμών της χρήσης γης στο ενεργειακό μείγμα, τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα και το κόστος του συστήματος, με σκοπό την εύρεση των απαιτούμενων αντισταθμίσεων.

Λέξεις κλειδιά: Κλιματική αλλαγή, Ηλεκτροπαραγωγικά συστήματα, Μοντελοποίηση, OSeMOSYS, Χρήση γης

Abstract

The transition to a zero-carbon economy implies large investments in renewable energy sources (RES) in the coming years, a trend that has already started on a global scale. To this end, the design of appropriate energy policies is essential. Modelling of energy systems using energy planning models is a useful tool in the hands of policymakers in formulating these measures, as they provide important information for designing these policies and assessing their feasibility. At the same time, their contribution to various facets of societal issues is important, providing useful data on the forecasting of resource use, future access to energy sources, and sustainable development in general.

The purpose of this thesis is to examine the trade-offs between the development of clean power generation and their land-use requirements. This is accomplished through an amendment of the energy modelling tool OSeMOSYS, with the aim of enabling applying optional land-use constraints. The new model is then applied to the Greek power system and the impact of different land-use constraints on the energy mix, carbon emissions, and system costs is studied in order to identify the required trade-offs.

Keywords: Climate change, Electricity production systems, Modelling, OSeMOSYS, Land-use

Ευχαριστίες

Η παρούσα διπλωματική εκπονήθηκε κατά το ακαδημαϊκό έτος 2021-2022 στον τομέα Ηλεκτρικών Βιομηχανικών Διατάξεων και Συστημάτων Αποφάσεων της σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου (Ε.Μ.Π.), υπό την επίβλεψη του αναπληρωτή καθηγητή του Ε.Μ.Π., κ. Χάρη Δούκα, τον οποίο θα ήθελα να ευχαριστήσω για τη δυνατότητα να ασχοληθώ με ένα τόσο ενδιαφέρον θέμα. Ακόμα, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον υποψήφιο διδάκτορα Διαμαντή Κουτσανδρέα για τη διαρκή υποστήριξη και τις κατευθύνσεις που προσέφερε καθ' όλη τη διάρκεια της συγγραφής της εργασίας.

Τέλος, ολοκληρώνοντας πλέον τις σπουδές μου, χρωστάω ένα μεγάλο ευχαριστώ στην οικογένειά μου και τους φίλους μου που κατά τη διάρκεια όλων αυτών των χρόνων ήταν δίπλα μου και συνέβαλαν στη δημιουργία των πιο αξιομνημόνευτων εμπειριών. Ιδιαίτερη αναφορά πρέπει να γίνει στην Διώνη, την Αλίκη και το Δημήτρη, που συνέβαλαν με τη ματιά τους στην επιμέλεια της εργασίας. And the best is yet to come.

Περιεχόμενα

Ευρετήριο Εικόνων	14
Ευρετήριο Πινάκων	16
Κεφάλαιο 1. Εισαγωγή	17
1.1 Υπόβαθρο	17
1.2 Σκοπός της Εργασίας	18
1.3 Στόχος της Εργασίας	19
1.4 Δομή της Εργασίας	19
Κεφάλαιο 2. Μοντελοποίηση των ηλεκτροπαραγωγικών συστημάτων	22
2.1 Μοντέλα προγραμματισμού της ηλεκτροπαραγωγής	22
2.1.1 PRIMES	23
2.1.2 TIMES	23
2.1.3 PyPSA	24
2.1.4 Temoa	25
2.1.5 OSeMOSYS	26
2.1.5.1 Αρχές λειτουργίας του OSeMOSYS	26
2.1.5.2 Δομή του OSeMOSYS	28
2.1.5.3 Εφαρμογή του OSeMOSYS σε ηλεκτρικά συστήματα παραγωγής	28
2.1.5.4 Κοινότητα του OSeMOSYS	29
2.2 Σύγκριση Μοντέλων	30
Κεφάλαιο 3. Ανάπτυξη της καθαρής ηλεκτροπαραγωγής και χρήση γης	34
3.1 Η περίπτωση της Ελλάδας	34
3.2 Προκλήσεις	35
Κεφάλαιο 4. Ενσωμάτωση περιορισμών χρήσης γης σε μοντέλα προγραμματισμού της ηλεκτροπαραγωγής	38
4.1 Καθορισμός της Επίδρασης Χρήσης Γης στο OSeMOSYS	38
4.2 Ορισμός συναρτήσεων και μεταβλητών Επίδρασης Χρήσης Γης	39
4.3 Κώδικας υλοποίησης περιορισμών χρήσης γης σε MathProg για το OSeMOSYS	40
Κεφάλαιο 5. Εφαρμογή	42
5.1 Μοντέλο	42
5.2 Καθορισμός παραμέτρων χρήσης έκτασης γης	43
5.3 Σενάρια	45
Κεφάλαιο 6. Αποτελέσματα	48
6.1 Σενάριο αναφοράς	48
6.2. Εναλλακτικά μονοπάτια με περιορισμό στη χρήση γης	52

6.3 Διαφορετικές προσεγγίσεις	63
6.3.1 Μηδενική ΕΧΓ για υπεράκτια αιολικά	64
6.3.2 Μηδενισμός των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα το 2050	67
Κεφάλαιο 7. Συμπεράσματα και μελλοντικές προεκτάσεις	72
7.1 Συμπεράσματα	72
7.2. Μελλοντικές Προεκτάσεις	74
Βιβλιογραφία	76

Ευρετήριο Εικόνων

Εικόνα 2.1. Σχηματική ανάλυση του μοντέλου PRIMES	24
Εικόνα 2.2. Σχηματική ανάλυση του μοντέλου TIMES	25
Εικόνα 2.3. Υλοποίηση του PyPSA στην Ευρωπαϊκή ήπειρο (PyPSA-EU) με βελτιστοποίηση της ενεργειακής παραγωγής με στόχο τη μείωση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα κατά 95%, σε σχέση με το 1990	26
Εικόνα 2.4. Η αρχική δομή του OSeMOSYS: blocks & τα 3 επίπεδα περιγραφών	28
Εικόνα 2.5. Ενδεικτικό ενεργειακό σύστημα αναφοράς για το OSeMOSYS	30
Εικόνα 2.6. Κατηγοριοποίηση μοντέλων βάσει βαθμού διαθεσιμότητας	31
Εικόνα 2.7. Σύγκριση μοντέλων ως προς την χρονική κλίμακα (transformation path modelling) και την χρονική ακρίβεια της ανάλυσης (Time slices)	32
Εικόνα 3.1. Εξέλιξη της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στην Ελλάδα ανά τεχνολογία για την περίοδο 1990 - 2020	35
Εικόνα 6.1. Επίδραση χρήσης γης των τεχνολογιών του συστήματος για το σενάριο αναφοράς για την περίοδο 2021-2050	50
Εικόνα 6.2. Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας ανά τεχνολογία για το σενάριο αναφοράς για την περίοδο 2021-2050	51
Εικόνα 6.3. Ηλεκτρική ισχύς ενέργειας ανά τεχνολογία για το σενάριο αναφοράς για την περίοδο 2021-2050	51
Εικόνα 6.4. Επίδραση Χρήσης Γης των τεχνολογιών του συστήματος για τα υπό εξέταση σενάρια αύξησης γης κατά τα έτη 2021-2050: (α) Σενάριο περιορισμού αύξησης ΕΧΓ στο 5% ανά έτος (β) Σενάριο περιορισμού αύξησης ΕΧΓ στο 3% ανά έτος (γ) Σενάριο περιορισμού αύξησης ΕΧΓ στο 1% ανά έτος (δ) Σενάριο περιορισμού ΕΧΓ σε μηδενική αύξηση	53
Εικόνα 6.5. Συνολική Επίδραση Χρήσης Γης του συστήματος για τα σενάρια αύξησης γης κατά 0%, 1%, 3% και 5% ανά έτος και για το σενάριο αναφοράς, για το έτος 2050	54

- Εικόνα 6.6.** Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας των τεχνολογιών του συστήματος για τα υπό εξέταση σενάρια κατά τα έτη 2021-2050 (α) Σενάριο περιορισμού αύξησης ΕΧΓ στο 5% ανά έτος (β) Σενάριο περιορισμού αύξησης ΕΧΓ στο 3% ανά έτος (γ) Σενάριο περιορισμού αύξησης ΕΧΓ στο 1% ανά έτος (δ) Σενάριο περιορισμού ΕΧΓ σε μηδενική αύξηση **55**
- Εικόνα 6.7.** Εγκατεστημένη ισχύς των τεχνολογιών του συστήματος για τα υπό εξέταση σενάρια κατά τα έτη 2021-2050 (α) Σενάριο περιορισμού αύξησης ΕΧΓ στο 5% ανά έτος (β) Σενάριο περιορισμού αύξησης ΕΧΓ στο 3% ανά έτος (γ) Σενάριο περιορισμού αύξησης ΕΧΓ στο 1% ανά έτος (δ) Σενάριο περιορισμού ΕΧΓ σε μηδενική αύξηση **56**
- Εικόνα 6.8.** Ποσότητα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας ανά εγκατεστημένη τεχνολογία του συστήματος για τα σενάρια αύξησης γης κατά 0%, 1%, 3% και 5% ανά έτος και για το σενάριο αναφοράς, για το έτος 2050 **58**
- Εικόνα 6.9.** Συνολικές εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα για τα σενάρια αύξησης γης κατά 0%, 1%, 3% και 5% και για το σενάριο αναφοράς, αθροιστικά για τα έτη 2021-2050 **59**
- Εικόνα 6.10.** Εξέλιξη των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα για τα 5 υπό εξέταση σενάρια, για τα έτη 2021-2050 **60**
- Εικόνα 6.11.** Συνολικά κόστη του συστήματος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας για τα σενάρια αύξησης γης κατά 5%, 3%, 1% και 0% ανά έτος και για το σενάριο αναφοράς, αθροιστικά για τα έτη 2021-2050 **61**
- Εικόνα 6.12.** Εξέλιξη του σταθερού λειτουργικού κόστους του συστήματος για τα σενάρια αύξησης γης κατά 0% και 3% ανά έτος και για το σενάριο αναφοράς, για τα έτη 2021-2050 **62**
- Εικόνα 6.13.** Εξέλιξη του μεταβλητού λειτουργικού κόστους του συστήματος για τα σενάρια αύξησης γης κατά 0% και 3% ανά έτος και για το σενάριο αναφοράς, για τα έτη 2021-2050 **63**
- Εικόνα 6.14.** Εξέλιξη του κόστους κεφαλαίου του συστήματος για τα σενάρια αύξησης γης κατά 0% και 3% ανά έτος και για το σενάριο αναφοράς, για τα έτη 2021-2050 **63**
- Εικόνα 6.15.** Εξέλιξη του κόστους εκπομπών του συστήματος για τα σενάρια αύξησης γης κατά 3% και 0% ανά έτος και για το σενάριο αναφοράς, για τα έτη 2021-2050 **64**

Εικόνα 6.16. Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας ανά τεχνολογία για το σενάριο περιορισμού της αύξησης της ΕΧΓ κατά 3% ανά έτος, για την περίοδο 2021-2050, με μηδενική ΕΧΓ από τα υπεράκτια αιολικά πάρκα. **66**

Εικόνα 6.17. Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας ανά τεχνολογία για το σενάριο περιορισμού της αύξησης της ΕΧΓ κατά 3% ανά έτος, για την περίοδο 2021-2050, με μηδενική ΕΧΓ από τα υπεράκτια αιολικά πάρκα. **66**

Εικόνα 6.18. Ποσότητα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας ανά εγκατεστημένη τεχνολογία του συστήματος για τα σενάρια αύξησης γης κατά 1%, 3% ανά έτος και για το σενάριο αναφοράς, για το έτος 2050, με μηδενική ΕΧΓ από τα υπεράκτια αιολικά πάρκα. **67**

Εικόνα 6.19. Συνολικές εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα για τα σενάρια αύξησης γης κατά 1%, 3% και για το σενάριο αναφοράς, αθροιστικά για τα έτη 2021-2050, με μηδενική ΕΧΓ από τα υπεράκτια αιολικά πάρκα. **68**

Εικόνα 6.20. Συνολικά κόστη του συστήματος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας για τα σενάρια αύξησης γης κατά 1%, 3% ανά έτος και για το σενάριο αναφοράς, αθροιστικά για τα έτη 2021-2050, με μηδενική ΕΧΓ από τα υπεράκτια αιολικά Πάρκα. **68**

Εικόνα 6.21. Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας ανά τεχνολογία για το σενάριο αναφοράς για την περίοδο 2021-2050, με μηδενισμό των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα το 2050. **69**

Εικόνα 6.22. Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας ανά τεχνολογία για το σενάριο 3% για την περίοδο 2021-2050, με μηδενισμό των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα το 2050. **70**

Εικόνα 6.23. Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας ανά τεχνολογία για το σενάριο 1% για την περίοδο 2021-2050, με μηδενισμό των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα το 2050. **70**

Εικόνα 6.24. Ποσότητα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας ανά εγκατεστημένη τεχνολογία του συστήματος για τα σενάρια αύξησης γης κατά 1%, 3% ανά έτος και για το σενάριο αναφοράς, για το έτος 2050, με μηδενισμό των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα το 2050 **71**

Εικόνα 6.25. Συνολικές εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα για τα σενάρια αύξησης γης κατά 1%, 3% και για το σενάριο αναφοράς, αθροιστικά για τα έτη 2021-2050, με μηδενισμό των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα το 2050. **72**

Εικόνα 6.26. Συνολικά κόστη του συστήματος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας για τα σενάρια αύξησης γης κατά 1%, 3% ανά έτος και για το σενάριο αναφοράς, αθροιστικά για τα έτη 2021-2050, με μηδενισμό των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα το 2050.

73

Ευρετήριο Πινάκων

Πίνακας 5.1. Παρουσιάζονται οι παράμετροι ισχύος επίδρασης χρήσης γης (ΙΕΧΓ) που επιλέχθηκαν για κάθε τεχνολογία.	45
Πίνακας 5.2. Παρουσιάζονται οι παράμετροι ενέργειας επίδρασης χρήσης γης (ΕΕΧΓ) που επιλέχθηκαν για κάθε τεχνολογία.	46
Πίνακας 6.1. Ποσοστό ΕΧΓ, Παραγωγής και Ισχύος των ΑΠΕ ως προς τα αντίστοιχα συνολικά μεγέθη για το σενάριο αναφοράς	49
Πίνακας 6.2. Ποσοστό ΕΧΓ, Παραγωγής και Ισχύος των αιολικών πάρκων ως προς τα αντίστοιχα συνολικά μεγέθη για το σενάριο αναφοράς	50
Πίνακας 6.3. Ποσοστό αύξησης των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα ανά σενάριο σε σχέση με το σενάριο αναφοράς	59

Κεφάλαιο 1. Εισαγωγή

1.1 Υπόβαθρο

Αποτελεί αναντίρρητο γεγονός ότι η κλιματική αλλαγή είναι και θα συνεχίσει να είναι ένα από τα σημαντικά ζητήματα του αιώνα που διανύουμε. Εδώ και δεκαετίες έχει γίνει σαφής η σύνδεση μεταξύ των ανθρωπογενών εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα και λοιπών αερίων του θερμοκηπίου και της αύξησης της θερμοκρασίας του πλανήτη [1], τα τελευταία χρόνια όμως όλο και περισσότερα κράτη και φορείς παγκοσμίως έχουν αρχίσει να αναγνωρίζουν την κρισιμότητα της κατάστασης. Είναι λοιπόν απαραίτητη η μετάβαση από μια οικονομία που βασίζεται στην χρήση ορυκτών καυσίμων σε μία πράσινη οικονομία. Η Ευρωπαϊκή Ένωση, και κατ' επέκταση η Ελλάδα, έχει δεσμευτεί για την επίτευξη της κλιματικής ουδετερότητας, δηλαδή τη μηδενική συνολική εκπομπή αερίων του θερμοκηπίου μέχρι το 2050 [2].

Σύμφωνα με την τελευταία έκθεση της Διακυβερνητικής Επιτροπής για την Κλιματική Αλλαγή, η σοβαρότητα των φυσικών φαινομένων προβλέπεται να είναι αυξημένη ιδιαίτερα για την περιοχή της Μεσογείου. Ήδη κατά τη διάρκεια του εικοστού αιώνα παρατηρήθηκε αύξηση της θερμοκρασίας της περιοχής κατά 1,5 - 4 °C [3]. Η τάση αυτή φαίνεται ότι θα συνεχιστεί και στο μέλλον, καθώς σύμφωνα με έρευνα της Ευρωπαϊκής Τράπεζας Επενδύσεων προβλέπεται άνοδος της θερμοκρασίας από 2,2 έως 5,1 °C για την περίοδο 2080 - 2099 σε σχέση με στην περίοδο 1980 - 1999. [4] Σύμφωνα με την ίδια έρευνα αναμένεται μείωση των βροχοπτώσεων, αύξηση των περιόδων ξηρασίας και σημαντική άνοδος της στάθμης της θάλασσας στην περιοχή, η οποία μπορεί να φτάσει μέχρι και τα 35 cm έως το τέλος του αιώνα.

Τα παραπάνω δεδομένα αναδεικνύουν την κρισιμότητα της κατάστασης στην οποία βρίσκονται οι μεσογειακές χώρες, και κατ' επέκταση η Ελλάδα. Απαραίτητος λοιπόν είναι ο ορθός και έγκαιρος σχεδιασμός μέτρων τόσο για τον μετριασμό των επιπτώσεων που θα έχει η κλιματική αλλαγή, όσο και για την μετάβαση σε μια οικονομία μηδενικών εκπομπών.

Η μετάβαση στην κλιματική ουδετερότητα είναι ένα πολύπλοκο και πολυπαραγοντικό ζήτημα για όλα τα εμπλεκόμενα μέρη, με τον ενεργειακό τομέα να έχει βαρύνουσα σημασία. Ένα καίριο βήμα για την επίτευξη του συγκεκριμένου στόχου είναι η απανθρακοποίηση του ενεργειακού συστήματος, η αντικατάσταση δηλαδή παραδοσιακών τεχνολογιών (λιγνίτης, πετρέλαιο, φυσικό αέριο) με εναλλακτικές, πράσινες τεχνολογίες (υδροηλεκτρικά εργοστάσια, ηλιακά και αιολικά πάρκα). Αυτή η διαδικασία παρουσιάζει πολλές ευκαιρίες, αλλά και προκλήσεις.

1.2 Σκοπός της Εργασίας

Η μετάβαση σε μία οικονομία με μηδενικό ισοζύγιο άνθρακα συνεπάγεται μεγάλες επενδύσεις σε ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ΑΠΕ) στα επόμενα χρόνια, μια τάση που έχει ήδη ξεκινήσει παγκοσμίως, αλλά και στην Ελλάδα. Οι συγκεκριμένες πηγές ενέργειας όμως, παρά τα πολλαπλά οφέλη που προσφέρουν, προϋποθέτουν τη χρήση πολύ μεγαλύτερων εκτάσεων γης για την παραγωγή της απαιτούμενης ποσότητας ηλεκτρικής ενέργειας σε σχέση με τις αντίστοιχες μη ανανεώσιμες πηγές. Το συγκεκριμένο χαρακτηριστικό μάλιστα συχνά δεν εξετάζεται σε βάθος ή και παραλείπεται τελείως όταν γίνονται αναλύσεις σε βάθος χρόνου για επενδύσεις σε ηλεκτροπαραγωγικά συστήματα. Καθώς λοιπόν τα μονοπάτια μετάβασης στην κλιματική ουδετερότητα της χώρας γίνονται όλο και πιο φιλόδοξα, οι αυξημένες απαιτήσεις σε χρήση γης θα αποτελούν σημαντική παράμετρο στην πραγμάτωσή τους.

Η γη όμως παραμένει περιορισμένος πόρος, με πολλές εναλλακτικές χρήσεις (καλλιέργειες, οικοδόμηση, εθνικοί δρυμοί κ.α.). Η χρήση της για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας μπορεί να έχει αρνητικές επιπτώσεις τόσο στο περιβάλλον (βιοποικιλότητα) [5,6], όσο και τους ανθρώπους (αισθητικά κριτήρια, πολιτιστική παράδοση) [7]. Οι παράγοντες αυτοί δημιουργούν συχνά αντιστάσεις από τις τοπικές κοινωνίες στη δημιουργία και την ανάπτυξη έργων ΑΠΕ, γεγονός που μπορεί να καθυστερήσει ή και να αποτρέψει πλήρως την αποπεράτωση τέτοιων έργων και κατά συνέπεια να εμποδίσει σε εθνικό και παγκόσμιο επίπεδο την προσπάθεια για προσαρμογή στην κλιματική αλλαγή [8,9].

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η εξέταση των αντισταθμίσεων μεταξύ της ανάπτυξης της καθαρής ηλεκτροπαραγωγής στην Ελλάδα (χρονικός ορίζοντας 2021-2050) και των απαιτήσεών τους σε όρους χρήσης γης. Για το σκοπό αυτό θα πραγματοποιηθεί με χρήση διαφορετικών ορίων στη συνολική αύξηση της επίδρασης χρήσης γης (ΕΧΓ) για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας ανά έτος, περιορίζοντας έτσι το σύστημα και εξετάζοντας τις επιπτώσεις των περιορισμών στο μείγμα ηλεκτροπαραγωγής. Η προσομοίωση του συστήματος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας της Ελλάδας πραγματοποιείται με χρήση του εργαλείου μοντελοποίησης ενεργειακών συστημάτων OSeMOSYS.

Στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας πραγματοποιείται επέκταση του κώδικα του OSeMOSYS ώστε να περιέχει ως νέα μεταβλητή την ΕΧΓ της κάθε τεχνολογίας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, συμπεριλαμβάνοντας τη γη που καταλαμβάνεται τόσο για την παραγωγή όσο και για την εξόρυξη του αντίστοιχου καυσίμου. Στη συνέχεια προστίθενται οι αναγκαίοι περιορισμοί ώστε να συμπεριλαμβάνεται η ΕΧΓ ως παράμετρος στην τελική βέλτιστη λύση του συστήματος. Μέσα από την παρουσίαση των αποτελεσμάτων σε γραφικές παραστάσεις, μελετάται η επίδραση εναλλακτικών σεναρίων περιορισμού της

χρήσης γης στο σύστημα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας της χώρας και αναλύεται η σχέση ανάμεσα στη χρήση γης και στο τελικό ενεργειακό μείγμα του συστήματος, καθώς και οι αντισταθμίσεις ανάμεσα στην ανάπτυξη καθαρής ηλεκτροπαραγωγής και τη χρήση γης στην Ελλάδα.

1.3 Στόχος της Εργασίας

Παρά την από κοινού αποδοχή της γης ως πολύτιμο και πεπερασμένο πόρο, πολύ συχνά μακροπρόθεσμες μελέτες συστημάτων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας δεν λαμβάνουν καθόλου υπόψη την επίδραση που έχουν οι νέες τεχνολογίες στη χρήση γης. Μέσω της μελέτης της επίδρασης που έχει ο περιορισμός της επίδρασης χρήσης γης των τεχνολογιών ηλεκτροπαραγωγής, η παρούσα εργασία στοχεύει στην υποστήριξη της διαδικασίας λήψης αποφάσεων χωρίς να παραβλέπεται ο σημαντικός αυτός παράγοντας. Μέσα από την επέκταση ενός ευρέως διαδεδομένου εργαλείου ηλεκτροπαραγωγικής μοντελοποίησης, αποσκοπεί στην προσθήκη μιας ακόμα σημαντικής παραμέτρου για έναν πιο ολοκληρωμένο ενεργειακό σχεδιασμό στο δρόμο προς την κλιματική ουδετερότητα.

1.4 Δομή της Εργασίας

Η παρούσα εργασία δομείται σε επτά κεφάλαια. Στο πρώτο και παρόν κεφάλαιο πραγματοποιείται μια σύντομη ανάλυση του πλαισίου μέσα στο οποίο πραγματοποιείται η εξέταση των ζητημάτων που ακολουθούν, καθώς επίσης περιγράφεται ο γενικότερος στόχος της εργασίας.

Στο δεύτερο κεφάλαιο αναλύεται η έννοια της μοντελοποίησης ενεργειακών συστημάτων. Γίνεται μια σύντομη παρουσίαση βασικών και διαδεδομένων εργαλείων μοντελοποίησης και πραγματοποιείται σύγκριση με τελικό σκοπό την επιλογή του βέλτιστου εργαλείου για την παρούσα εφαρμογή. Στη συνέχεια, παρουσιάζεται αναλυτικά το επιλεγμένο εργαλείο, με έμφαση στη δομή του και την εφαρμογή του σε ηλεκτροπαραγωγά συστήματα.

Στο τρίτο κεφάλαιο περιγράφεται η σύνδεση μεταξύ της ανάπτυξης καθαρής ηλεκτροπαραγωγής και την αυξημένη απαίτηση για χρήση γης, συμπεριλαμβανομένων και των αντιδράσεων των τοπικών κοινωνιών που προκύπτουν ως συνέπεια της ανάπτυξης τέτοιων έργων.

Το τέταρτο κεφάλαιο εστιάζει στην ενσωμάτωση των περιορισμών χρήσης γης σε μοντέλα ενεργειακού προγραμματισμού, παρουσιάζοντας λεπτομερώς την υλοποίηση στον κώδικα του OSeMOSYS.

Στο πέμπτο κεφάλαιο το τροποποιημένο μοντέλο εφαρμόζεται στο σύστημα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας της Ελλάδας. Παρουσιάζονται συνοπτικά οι βασικές λεπτομέρειες του ελληνικού μοντέλου και γίνεται καθορισμός των απαραίτητων παραμέτρων.

Στο έκτο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της εφαρμογής του μοντέλου. Έμφαση δίνεται στη σύγκριση των εναλλακτικών σεναρίων και την εμφάνιση κρίσιμων δεδομένων και γραφικών παραστάσεων με σκοπό την κατανόηση των αποτελεσμάτων.

Τέλος, στο έβδομο κεφάλαιο συνοψίζονται τα συμπεράσματα της εργασίας και αναφέρονται πιθανές προεκτάσεις για περαιτέρω έρευνα.

Κεφάλαιο 2. Μοντελοποίηση των ηλεκτροπαραγωγικών συστημάτων

2.1 Μοντέλα προγραμματισμού της ηλεκτροπαραγωγής

Για την επίτευξη της μετάβασης στην κλιματική ουδετερότητα απαιτείται, μεταξύ άλλων, η χάραξη των κατάλληλων ενεργειακών πολιτικών. Η μοντελοποίηση ενεργειακών συστημάτων με χρήση μοντέλων ενεργειακού προγραμματισμού αποτελεί χρήσιμο εργαλείο στα χέρια των υπευθύνων για τη χάραξη αυτών των πολιτικών, καθώς προσφέρουν σημαντικές πληροφορίες για τον σχεδιασμό αυτών των πολιτικών και την αξιολόγηση της εφικτότητάς τους. Σημαντική παράλληλα είναι η συμβολή τους σε διαφορετικές πτυχές της κοινωνίας, παρέχοντας χρήσιμα δεδομένα πάνω στην πρόβλεψη χρήσης πόρων, τη μελλοντική πρόσβαση σε πηγές ενέργειας, και εν γένει τη βιώσιμη ανάπτυξη.

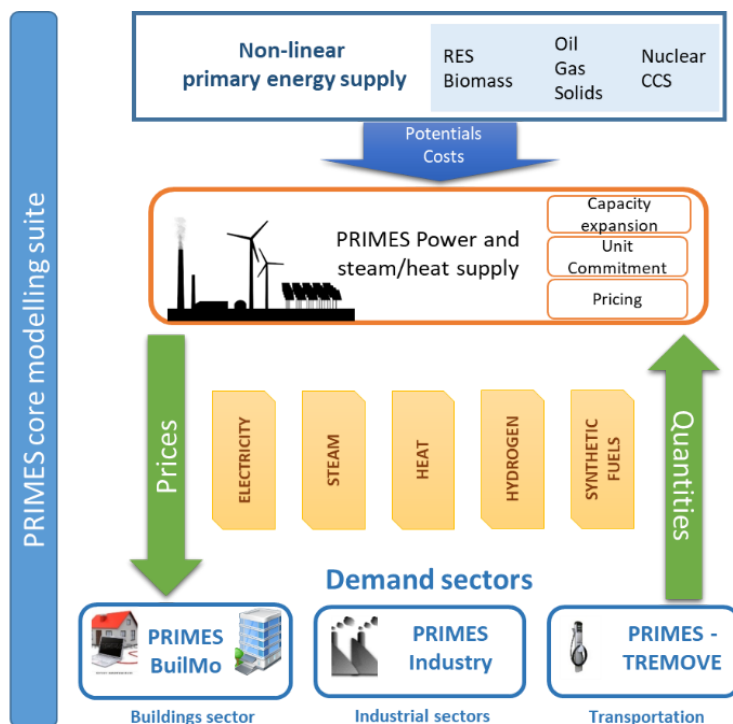
Απαραίτητη όμως είναι και η συνεργασία διαφορετικών μερών για την ανάπτυξη και την αξιοποίηση αυτών των εργαλείων. Μέσα από αυτή την ανάγκη έχει καθιερωθεί τα τελευταία χρόνια, τόσο στην Ευρωπαϊκή Ένωση (ΕΕ) όσο και σε διεθνές επίπεδο η πρακτική της ενεργειακής μοντελοποίησης μέσω μοντέλων ανοικτού κώδικα, τα οποία καθιστούν διαθέσιμο τον κώδικα των μοντέλων και τα δεδομένα που χρησιμοποιούν.

Σε αντίθεση με τα παραδοσιακά εργαλεία ιδιόκτητου λογισμικού που αναπτύσσονται για εμπορική χρήση, τα μοντέλα ανοικτού κώδικα είναι προσβάσιμα στο σύνολο της ερευνητικής κοινότητας, διευκολύνοντας τόσο την εφαρμογή τους, όσο και τη συνεχή τους βελτίωση. Παραδείγματα πρωτοβουλιών προς αυτήν την κατεύθυνση αποτελούν η πλατφόρμα Energy Modelling Platform for Europe (EMP-E) [10], η οποία επιτρέπει την ανταλλαγή ερευνητικών δεδομένων πάνω στη μοντελοποίηση ενεργειακών συστημάτων για την Ευρώπη, καθώς επίσης παρέχει δεδομένα για χρήση στα μοντέλα αυτά, αλλά και η πρωτοβουλία Open Energy Modelling Initiative [11], η οποία αποτελεί διαδικτυακό χώρο συνάντησης επιστημόνων και ερευνητών από όλο τον κόσμο και προωθεί τις πρακτικές των ανοιχτών μοντέλων ενεργειακής μοντελοποίησης και των ανοιχτών δεδομένων. Τέτοιες πρωτοβουλίες συμβάλλουν στον εκδημοκρατισμό της τεχνογνωσίας πάνω σε ένα αντικείμενο που προβλέπεται να αποκτήσει αυξημένη σημασία τα επόμενα χρόνια, ενώ παράλληλα βελτιώνουν την ποιότητα, την διαφάνεια και την αξιοπιστία των ενεργειακών μοντέλων.

Παρακάτω παρατίθενται μερικά από τα εργαλεία που χρησιμοποιούνται παγκοσμίως για την αποτύπωση των ενεργειακών και ηλεκτροπαραγωγικών συστημάτων, εστιάζοντας κυρίως σε εργαλεία ανοικτού κώδικα.

2.1.1 PRIMES

Το PRIMES (Price-Induced Market Equilibrium System) είναι ένα εργαλείο μοντελοποίησης ενεργειακών συστημάτων μεγάλης κλίμακας που παρέχει στον χρήστη λεπτομερείς προβλέψεις της ζήτησης ενέργειας, της προσφοράς, των τιμών και των επενδύσεων στο μέλλον, καλύπτοντας ολόκληρο το φάσμα του ενεργειακού συστήματος, συμπεριλαμβανομένων των εκπομπών, ενώ γεωγραφικά καλύπτει την ευρωπαϊκή ήπειρο [12,13]. Η οικογένεια μοντέλων PRIMES αναπτύχθηκε από το Εργαστήριο Υποδειγμάτων Οικονομίας - Ενέργειας - Περιβάλλοντος της Σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου [14], και έχει χρησιμοποιηθεί από το 1990 σε εκθέσεις της Ευρωπαϊκής Επιτροπής υποστηρίζοντας ευρωπαϊκές αλλά και εθνικές πολιτικές [15], αλλά και σε πολλά άλλα έργα που καλύπτουν γεωγραφικά ολόκληρη την Ευρώπη [16,17]. Στην εικόνα 2.1 φαίνεται μια σχηματική ανάλυση του PRIMES.

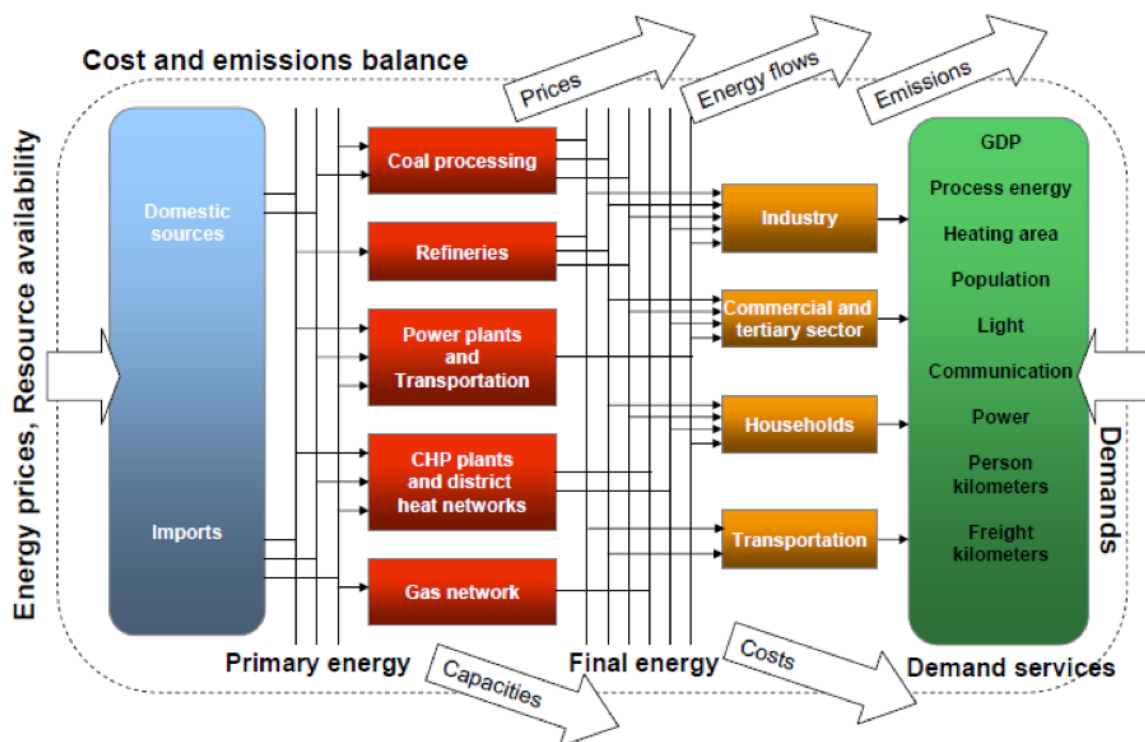


Εικόνα 2.1. Σχηματική ανάλυση του μοντέλου PRIMES [18]

2.1.2 TIMES

Το TIMES (The Integrated MARKAL-EFOM System) αναπτύχθηκε στο πλαίσιο της ανάπτυξης ενεργειακών σεναρίων για τη διεξαγωγή εμπειριστατωμένων ενεργειακών και περιβαλλοντικών αναλύσεων από την IEA-ETSAP [19], μια κοινοπραξία ερευνητών από κράτη μέλη του Παγκόσμιου Οργανισμού Ενέργειας, με σκοπό την ανάπτυξη εργαλείων ενεργειακής μοντελοποίησης για τα μέλη της. Στην ουσία

αποτελεί εξέλιξη του μοντέλου MARKAL, με το δύο μοντέλα να παρουσιάζουν πολλά κοινά χαρακτηριστικά. Χρησιμοποιείται για την διερεύνηση πιθανών ενεργειακών καταστάσεων συγκρίνοντας αντιπαραβαλλόμενα σενάρια, με τελικό σκοπό την ελαχιστοποίηση του κόστους του συστήματος δεδομένων των ορισμένων από τον χρήστη περιορισμών. Συνδυάζει δύο διαφορετικές, αλλά συμπληρωματικές, προσεγγίσεις για τη μοντελοποίηση ενέργειας: μια τεχνική μηχανική προσέγγιση και μια οικονομική προσέγγιση, όπως φαίνεται και στην εικόνα 2.2. Έχει χρησιμοποιηθεί σε μεγάλα ευρωπαϊκά έργα [20], ενώ σε συνδυασμό με το MARKAL, το TIMES έχει χρησιμοποιηθεί σε τουλάχιστον 177 ιδρύματα σε πάνω από 70 χώρες [21].

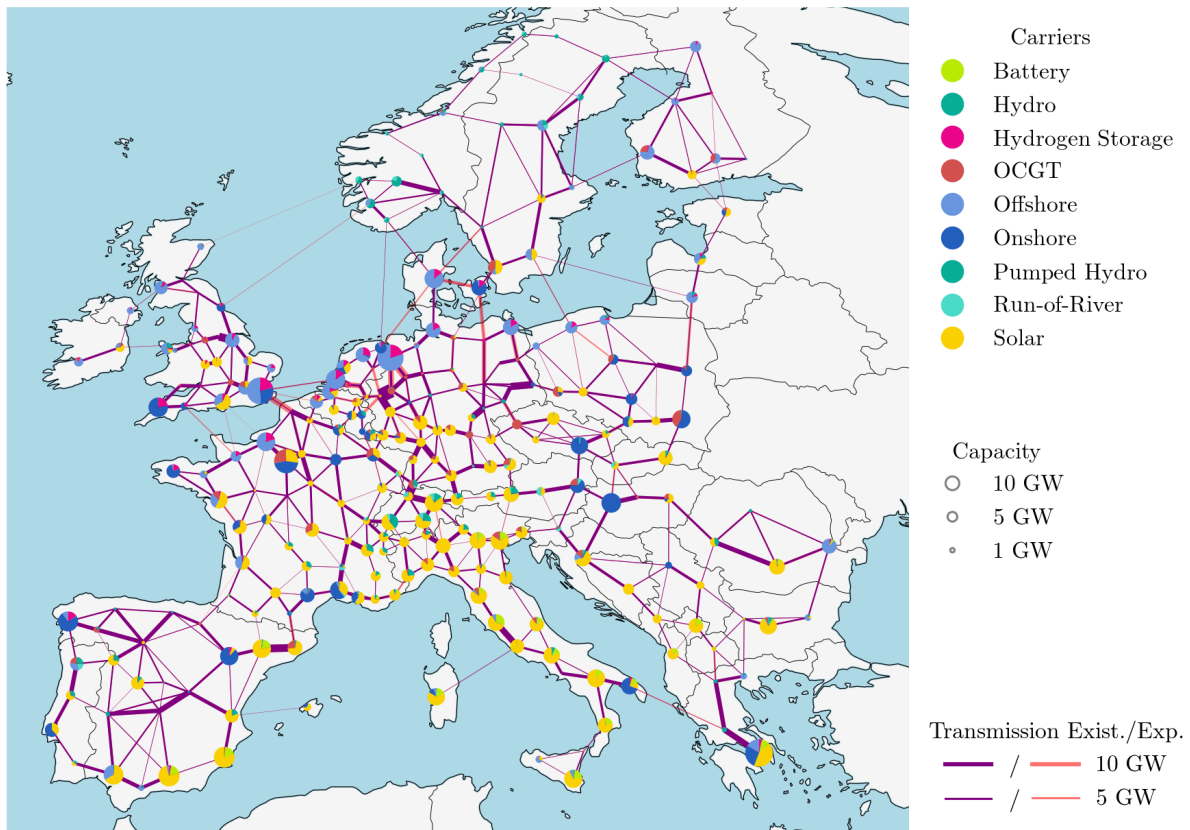


Εικόνα 2.2. Σχηματική ανάλυση του μοντέλου TIMES [22]

2.1.3 PyPSA

Το PyPSA (Python for Power System Analysis) είναι ένα εργαλείο για την προσομοίωση και βελτιστοποίηση συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας. Αναπτύχθηκε από το Ινστιτούτο τεχνολογίας της Καρλσρούης (KIT) και αποτελεί λογισμικό ανοιχτού κωδικού υλοποιημένο σε γλώσσα προγραμματισμού Python, με χρήση της βιβλιοθήκης Pyomo, και ο πηγαίος κώδικάς του μπορεί να βρεθεί στο αποθετήριο κώδικα GitHub [23]. Επιτρέπει τη δημιουργία πακέτων τα οποία μπορούν να εξεταστούν αυτόνομα ή να συνδυαστούν εύκολα μεταξύ τους για τη δημιουργία πολύπλοκων συστημάτων [24]. Έχει χρησιμοποιηθεί για τη μοντελοποίηση τόσο

ευρωπαϊκών [25] όσο και εθνικών [26] συστημάτων όπως φαίνεται και στην υλοποίηση του PyPSA-Eur στην εικόνα 2.3.



Εικόνα 2.3. Υλοποίηση του PyPSA στην Ευρωπαϊκή ήπειρο (PyPSA-EUr) με βελτιστοποίηση της ενεργειακής παραγωγής με στόχο τη μείωση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα κατά 95%, σε σχέση με το 1990. [27]

2.1.4 Temoa

Το Temoa (Tools for Energy Model Optimization and Analysis) είναι ένα πλαίσιο ανοιχτού κώδικα για την ανάλυση ενεργειακών συστημάτων υλοποιημένο σε γλώσσα προγραμματισμού Python με χρήση της βιβλιοθήκης Pyomo [28]. Αναπτύχθηκε από το τμήμα πολιτικών μηχανικών του πολιτειακού πανεπιστημίου της Βόρειας Καρολίνας. Το Temoa ελαχιστοποιεί το κόστος του συστήματος βελτιστοποιώντας την ανάπτυξη και τη χρήση διαφορετικών ενεργειακών τεχνολογιών σε χρονικό ορίζοντα που καθορίζεται από τον χρήστη. Η δομή του είναι πολύ κοντινή με άλλα μοντέλα ενεργειακής μοντελοποίησης, όπως το OSeMOSYS και το Pyomo, αλλά έχει ως σκοπό να προσφέρει στον χρήστη την επιπλέον δυνατότητα για αναλύσεις

αβεβαιότητας, επιτρέποντας παράλληλα την επαναληψιμότητα των αποτελεσμάτων. Όπως πολλά άλλα μοντέλα, έχει επίσης επηρεαστεί από τα MARKAL/ TIMES, αλλά δεδομένης της φύσης του ως εργαλείο ανοιχτού κώδικα, ο κώδικάς του ελέγχεται και επεκτείνεται με συμβολές τρίτων στο αποθετήριο κώδικα Github [29].

2.1.5 OSeMOSYS

Το OSeMOSYS (the Open Source energy MOdelling SYStem) αποτελεί ένα μοντέλο ανοιχτού κώδικα για μακροπρόθεσμο ενεργειακό σχεδιασμό [30]. Σκοπός του συγκεκριμένου εργαλείου είναι η ανάπτυξη ενεργειακών πολιτικών σε εθνικό και περιφερειακό επίπεδο. Αυτό επιτυγχάνεται μέσα από τη δημιουργία σαφώς ορισμένων μοντέλων που αντιπροσωπεύουν ενεργειακά συστήματα σε περιοχές που έχουν οριστεί από τον χρήστη βάσει των δεδομένων που έχει χρησιμοποιήσει.

Η πρώτη έκδοχή του OSeMOSYS αναπτύχθηκε και παρουσιάστηκε το 2008 στο Διεθνές Συνέδριο Ενέργειας (International Energy Workshop) στο Παρίσι. Το OSeMOSYS αποτελεί αποτέλεσμα κοινών προσπαθειών πολλών ιδρυμάτων και είναι μέρος του συνόλου εργαλείων ανοιχτού κώδικα του OpTIMUS Community, μιας κοινότητας που βρίσκεται υπό την αιγίδα του Προγράμματος των Ηνωμένων Εθνών για την Ανάπτυξη.

Ένας από τους βασικούς σκοπούς του OSeMOSYS είναι να καταστήσει τη μοντελοποίηση ενεργειακών συστημάτων προσιτή σε μια πολύ ευρύτερη κοινότητα, συμπεριλαμβανομένων φοιτητών και ερευνητών στις αναπτυσσόμενες χώρες, οι οποίοι συχνά δεν διαθέτουν το χρόνο και τους οικονομικούς πόρους που απαιτούνται για τη χρήση μεγαλύτερων εμπορικών μοντέλων. Αυτό επιτυγχάνεται τόσο από τη φύση του εργαλείου, το οποίο είναι ανοιχτού κώδικα, όσο και από την ύπαρξη ενεργής κοινότητας για την υποστήριξη νέων χρηστών αλλά και την δυνατότητα επιλογής μεταξύ πολλών διεπαφών για τη χρήση του OSeMOSYS, βελτιώνοντας σημαντικά την εμπειρία ειδικά για αρχάριους ή μη εξοικειωμένους χρήστες.

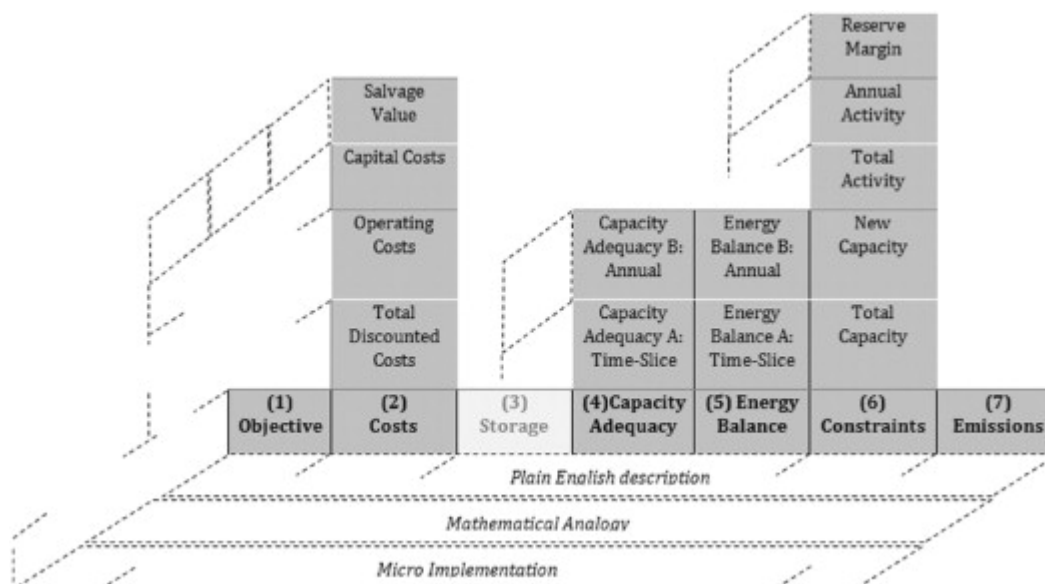
2.1.5.1 Αρχές λειτουργίας του OSeMOSYS

Η λειτουργία του OSeMOSYS βασίζεται στον γραμμικό προγραμματισμό και αποσκοπεί στην εύρεση του κατάλληλου ενεργειακού μείγματος το οποίο ελαχιστοποιεί το συνολικό κόστος του συστήματος και ταυτόχρονα ικανοποιεί τους εξωγενείς περιορισμούς που έχουν οριστεί από τον χρήστη. Τέτοιοι περιορισμοί μπορεί να είναι όρια στις συνολικές εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα του συστήματος, στο ποσοστό ανανεώσιμων πηγών ενέργειας που χρησιμοποιούνται, ή στη χρήση συγκεκριμένων τεχνολογιών.

Οι συναρτήσεις του OSeMOSYS ομαδοποιούνται σε τμήματα (blocks), με το κάθε τμήμα να αποτελεί ένα αυτόνομο σύνολο ισοτήτων (αναθέσεων τιμών) και ανισοτήτων, τα οποία μπορούν να προστεθούν και να αφαιρεθούν από τον χρήστη, χωρίς να επηρεάζεται η δομή του μοντέλου. Κάθε τέτοιο τμήμα έχει τρία επίπεδα περιγραφών:

- 1ο επίπεδο: Απλό κείμενο (“Plain English description”)
- 2ο επίπεδο: Μαθηματικές συναρτήσεις (“Mathematical Analogy”)
- 3ο επίπεδο: Τελικός κώδικας (“Micro Implementation”)

Τα παραπάνω τρία επίπεδα καθιστούν το OSeMOSYS ιδανικό εργαλείο για αρχική ενασχόληση με την μοντελοποίηση ενεργειακών συστημάτων, καθώς μπορεί εύκολα κανείς να αντιληφθεί τη λειτουργία του κάθε τμήματος, ήδη από την περιγραφή απλού κειμένου, χωρίς να χρειάζεται απαραίτητα να κατανοήσει πλήρως τις μαθηματικές συναρτήσεις ή τον, συχνά δυσνόητο σε αρχάριους χρήστες, κώδικα.



Εικόνα 2.4. Η αρχική δομή του OSeMOSYS: blocks & τα τρία επίπεδα περιγραφών [31]

Το OSeMOSYS είναι υλοποιημένο σε GNU MathProg, μια μαθηματική γλώσσα προγραμματισμού ανοιχτού κώδικα υψηλού επιπέδου όπου οι προγραμματιστικές συναρτήσεις μοιάζουν με τις αντίστοιχες αλγεβρικές. Στην πορεία υλοποιήθηκε και στις γλώσσες GAMS και Python, με σκοπό την ευκολότερη κατανόηση από μεγαλύτερο εύρος προγραμματιστών και επιστημόνων, κάνοντας ακόμα πιο εύκολη την πρώτη επαφή ενός ερευνητή με το εργαλείο. Αυτή τη στιγμή υποστηρίζονται και οι τρεις εκδοχές, με τη μεγαλύτερη υποστήριξη και ανάπτυξη επεκτάσεων βέβαια να επικεντρώνεται στην υλοποίηση σε MathProg.

2.1.5.2 Δομή του OSeMOSYS

Η πρώτη έκδοση του OSeMOSYS αναπτύχθηκε το 2008, ενώ από τότε συνεχίζει να εμπλουτίζεται με νέες λειτουργικότητες. Τα τμήματα που φαίνονται στο Σχήμα 2.6 αποτελούν εκείνα που υπήρχαν στον αρχικό κώδικα:

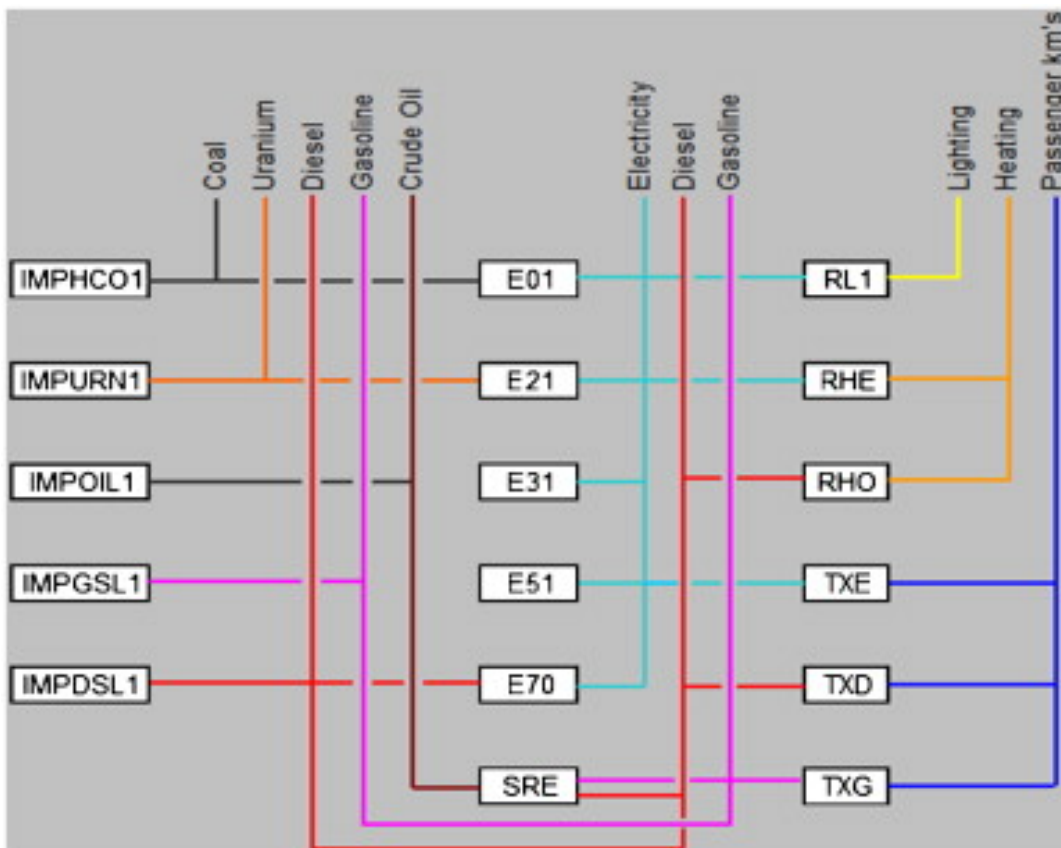
1. Στόχος (“Objective”): Η συνάρτηση-στόχος του συστήματος, κατά την οποία ελαχιστοποιείται το συνολικό κόστος πληρώντας τους περιορισμούς που έχουν οριστεί.
2. Κόστος (“Cost”): Τα κόστη του συστήματος, που περιλαμβάνουν τα αρχικά κεφάλαια, τα κόστη λειτουργίας των τεχνολογιών κ.α.
3. Αποθήκευση (“Storage”): Τα ισοζύγια αποθήκευσης ενέργειας και οι ανάλογοι περιορισμοί.
4. Επάρκεια ισχύος (“Capacity Adequacy”): Η επάρκεια ισχύος του συστήματος, όπου υπολογίζονται οι ενεργειακές απαιτήσεις για τις χρονικές περιόδους που έχουν οριστεί από τον χρήστη και διασφαλίζεται η επαρκόμενη δυναμικότητα για την κάλυψή τους.
5. Ισοζύγιο ενέργειας (“Energy Balance”): Διασφαλίζεται το ενεργειακό ισοζύγιο μεταξύ παραγωγής και κατανάλωσης κατά μήκος της ενεργειακής αλυσίδας.
6. Περιορισμοί (“Constraints”): Επιπλέον περιορισμοί που θέτει ο χρήστης (π. χ. στη χρήση συγκεκριμένων τεχνολογιών).
7. Εκπομπές (“Emissions”): Οι εκπομπές του συστήματος στον χρονικό ορίζοντα που έχει οριστεί, λαμβάνοντας υπόψη περιορισμούς και όρια που έχουν τεθεί από τον χρήστη.

Στη συνέχεια προστέθηκαν επιπλέον λειτουργικότητες, όπως η ενσωμάτωση έξυπνων δικτύων, η καλύτερη αναπαράσταση των μέσων αποθήκευσης ενέργειας κ.α. [32]

2.1.5.3 Εφαρμογή του OSeMOSYS σε ηλεκτρικά συστήματα παραγωγής

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω το OSeMOSYS προσπαθεί να βρει το βέλτιστο ενεργειακό μείγμα για να ικανοποιήσει τις απαιτήσεις που έχει ορίσει ο χρήστης. Βασικά δομικά στοιχεία κάθε μοντέλου στο OSeMOSYS είναι οι τεχνολογίες (technologies) και τα καύσιμα (fuels) που χρησιμοποιούνται στο σύστημα. Μία τεχνολογία ορίζεται από μια συνάρτηση μεταφοράς, μία είσοδο (πχ κάποιο καύσιμο ή ηλεκτρισμό) και μία έξοδο (πχ ηλεκτρισμό). Ένα καύσιμο αποτελείται από ένα δάνυσμα που χρησιμοποιείται ως είσοδος ή έξοδος μιας τεχνολογίας.

Ο παραπάνω ευέλικτος ορισμός των τεχνολογιών και των καυσίμων επιτρέπουν στο OSeMOSYS να χρησιμοποιείται για τη μοντελοποίηση πληθώρας διαφορετικών ενεργειακών συστημάτων. Οι τεχνολογίες μπορούν να αναπαριστούν από ένα εργοστάσιο φυσικού αερίου και ένα αιολικό πάρκο μέχρι έναν αγωγό μεταφοράς ενέργειας, ενώ τα καύσιμα αναπαριστούν από τον λιγνίτη και το φυσικό αέριο που χρειάζεται μια μονάδα για τη λειτουργία της μέχρι παράγωγα πετρελαίου και εξαγωγές ηλεκτρικής ενέργειας. Μερικές από τις δυνατές επιλογές τεχνολογιών και καυσίμων φαίνονται στο διάγραμμα της εικόνας 2.7, όπου φαίνεται ένα ενδεικτικό σύστημα αναφοράς στο OSeMOSYS. Αυτή η ευελιξία είναι που έχει επιτρέψει στο OSeMOSYS να χρησιμοποιηθεί σε τόσο μεγάλο εύρος εφαρμογών, ενώ σε συνδυασμό με την φύση του ως εργαλείο ανοιχτού κώδικα γίνεται δυνατή η συνεχής προσθήκη επεκτάσεων στο αρχικό μοντέλο και η δημιουργία πολλαπλών παραλλαγών.



Εικόνα 2.5. Ενδεικτικό ενεργειακό σύστημα αναφοράς για το OSeMOSYS [33]

2.1.5.4 Κοινότητα του OSeMOSYS

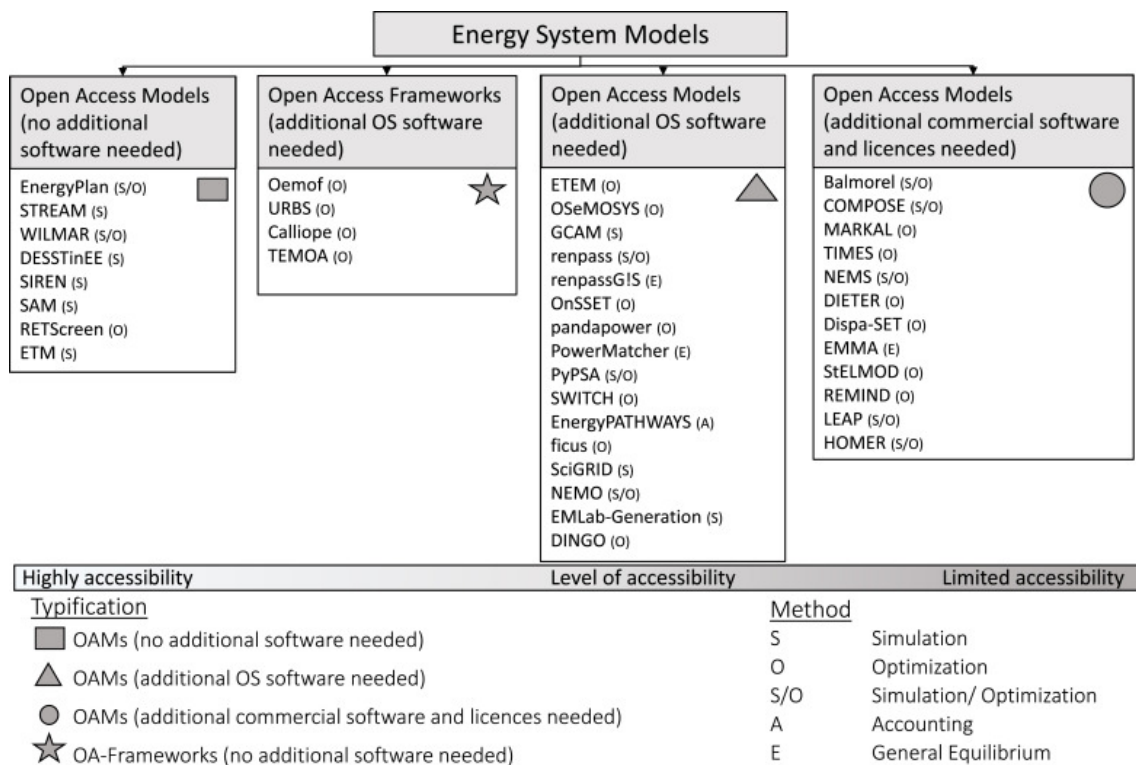
Το OSeMOSYS, ως εργαλείο ανοιχτού κώδικα με ευρεία αποδοχή από τους ερευνητές του χώρου και, όπως αναφέρθηκε παραπάνω, με εύκολη διαδικασία εκμάθησης, έχει δεχθεί πολλές τροποποιήσεις και προσθήκες. Η διαδικασία αυτή

διευκολύνεται και ενθαρρύνεται και από τους δημιουργούς του OSeMOSYS, ώστε να προτείνονται τροποποιήσεις ή επεκτάσεις του κώδικα. Οι προτάσεις αυτές εξετάζονται σε εξαμηνιαία βάση με σκοπό την τελική τους προσθήκη στο εργαλείο [34].

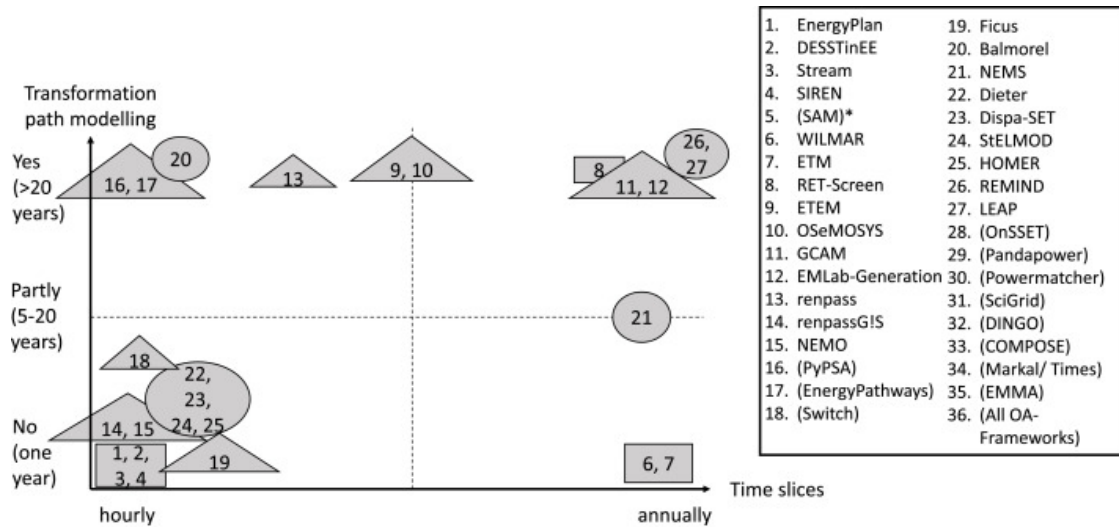
Ταυτόχρονα υποστηρίζεται ένα διαδικτυακό φόρουμ όπου οι χρήστες προτρέπονται να ζητούν υποστήριξη για τυχόν ζητήματα που αντιμετωπίζουν, ανταλλάσσοντας παράλληλα ιδέες και δεδομένα για διαφορετικές εφαρμογές.

2.2 Σύγκριση μοντέλων και επιλογή

Παραπάνω παρουσιάστηκαν συνοπτικά μερικά σημαντικά εργαλεία ενεργειακής μοντελοποίησης, η επιλογή των οποίων πραγματοποιήθηκε βάσει του εύρους της χρήσης τους από την ερευνητική κοινότητα αλλά και με προτεραιότητα παρουσίασης ανοιχτών και προσβάσιμων εργαλείων. Δεν δύναται να πραγματοποιηθεί αναλυτική παρουσίαση όλων των μοντέλων στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας. Για λόγους πληρότητας, όμως, παρουσιάζεται συνοπτική σύγκριση κάποιων βασικών χαρακτηριστικών πολλών διαφορετικών ανοιχτών εργαλείων μοντελοποίησης ενεργειακών συστημάτων.



Εικόνα 2.6. Κατηγοριοποίηση μοντέλων βάσει βαθμού διαθεσιμότητας [35]



Εικόνα 2.7. Σύγκριση μοντέλων ως προς τη χρονική κλίμακα (*transformation path modelling*) και τη χρονική ακρίβεια της ανάλυσης (*Time slices*) [36]

Με βάση και τις εικόνες 2.4 και 2.5, φαίνεται ότι τα μοντέλα που επιλέχθηκαν προς ανάλυση έχουν αρκετά κοινά χαρακτηριστικά. Ενδεικτικά, τα τρία πιο σύγχρονα εργαλεία που αναλύθηκαν, το PyPSA, το TEMOA και το OSeMOSYS μπορούν να χρησιμοποιηθούν χωρίς να είναι απαραίτητη η χρήση επιπλέον εμπορικού λογισμικού. Επίσης, όλα τα μοντέλα πληρούν τις βασικές επιθυμητές προδιαγραφές, καθώς έχουν μακροπρόθεσμο χρονικό ορίζοντα στον σχεδιασμό τους, απαραίτητο για την υλοποίηση της επιθυμητής εφαρμογής.

Μετά από τη σύντομη ανάλυση κάποιων από τα βασικά εργαλεία προγραμματισμού ηλεκτροπαραγωγικών συστημάτων, φαίνεται ότι υπάρχουν πολλές ομοιότητες ανάμεσα στα μοντέλα που εξετάστηκαν.

Παρακάτω ακολουθούν μερικά βασικά επιθυμητά χαρακτηριστικά του μοντέλου που θα επιλεγεί.

- Πρόγραμμα ανοιχτού κώδικα
- Ενεργή κοινότητα για την υποστήριξη των χρηστών και την επίλυση αποριών
- Γρήγορη και εύκολη εκμάθηση για νέους χρήστες
- Μακροπρόθεσμη κλίμακα σχεδιασμού (20+ χρόνια)
- Πληθώρα υλοποιημένων εφαρμογών
- Δυνατότητα μοντελοποίησης ολόκληρων ενεργειακών συστημάτων

Βάσει των παραπάνω, το OSeMOSYS επιλέχθηκε ως το κατάλληλο εργαλείο, καθώς συνδυάζει όλα τα απαραίτητα στοιχεία ώστε να γίνει η μοντελοποίηση του ηλεκτροπαραγωγού συστήματος της Ελλάδας.

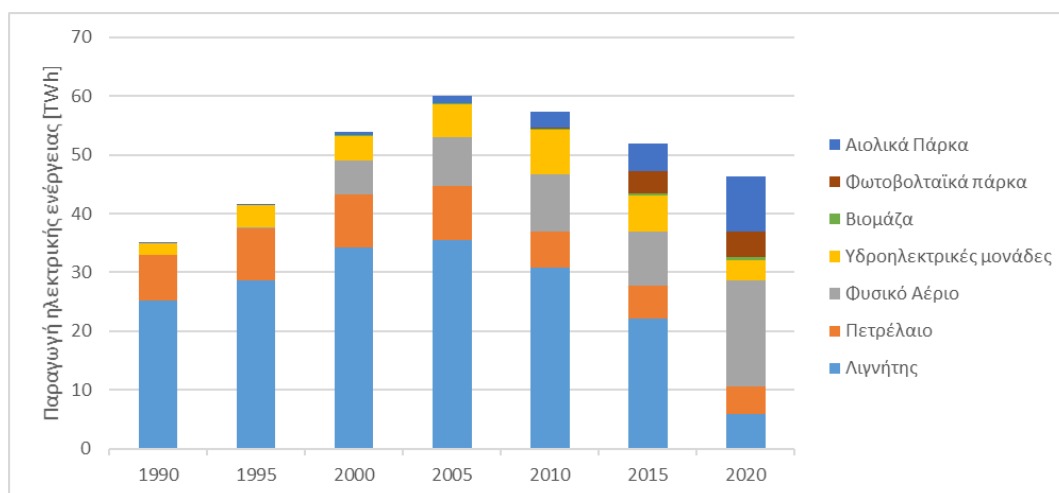
Επιπλέον, η φύση του OSeMOSYS επιτρέπει εύκολα τη δημιουργία και υλοποίηση επεκτάσεων, οι οποίες εντάσσονται στη συνέχεια στον πηγαίο κώδικα ώστε να προστίθενται νέες λειτουργικότητες στο σύστημα. Έτσι, μπορούν να ενταχθούν νέοι περιορισμοί στο σύστημα, οι οποίοι δεν προβλέπονται από το αρχικό μοντέλο.

Κεφάλαιο 3. Ανάπτυξη της καθαρής ηλεκτροπαραγωγής και χρήση γης

Για την επίτευξη της κλιματικής ουδετερότητας είναι απαραίτητη η σημαντική μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου. Μια σειρά από αποφάσεις έχουν ληφθεί σε παγκόσμιο, ευρωπαϊκό, αλλά και εθνικό επίπεδο προς αυτήν την κατεύθυνση, με πιο χαρακτηριστικές τη Στρατηγική της Ευρωπαϊκής Ένωσης για την Προσαρμογή στην Κλιματική Αλλαγή [37], την Ευρωπαϊκή Πράσινη Συμφωνία [38], αλλά και την Εθνική Στρατηγική για την Προσαρμογή στην Κλιματική Αλλαγή για την Ελλάδα [39]. Για να πραγματοποιηθεί αυτό, θα πρέπει να γίνει σταδιακή κατάργηση των παραδοσιακών, και ρυπογόνων, μορφών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, όπως ο λιγνίτης, το πετρέλαιο, και το φυσικό αέριο και να αντικατασταθούν στην πλειονότητά τους από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας.

3.1 Η περίπτωση της Ελλάδας

Η μετάβαση στην Ελλάδα έχει ήδη ξεκινήσει, με πρώτο καύσιμο του οποίου η χρήση μειώθηκε αισθητά τα τελευταία χρόνια να είναι ο λιγνίτης [40]. Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από λιγνίτη κορυφώθηκε το 2005 στις 35,5 TWh, αντιπροσωπεύοντας το 60% της συνολικής παραγωγής της χώρας, ενώ το 2020, μετά την κατακόρυφη μείωση την τελευταία δεκαετία, είχε περιοριστεί σε λιγότερες από τις 6 TWh, ποσοστό χαμηλότερο του 13% της εγχώριας παραγωγής.



Εικόνα 3.1. Εξέλιξη της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στην Ελλάδα ανά τεχνολογία για την περίοδο 1990 - 2020

Τη θέση του λιγνίτη, όπως φαίνεται και στο παραπάνω διάγραμμα, έχει καταλάβει το φυσικό αέριο ως προσωρινή μεταβατική λύση, με την προοπτική το μεγαλύτερο

μέρος της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας να γίνεται από ανανεώσιμες πηγές. Παράλληλα, ο εξηλεκτρισμός άλλων τομέων της οικονομίας οι οποίοι παραδοσιακά στηρίζονταν στα ορυκτά καύσιμα, όπως οι μετακινήσεις και η θέρμανση, προβλέπεται πως θα οδηγήσει σε ακόμα μεγαλύτερη ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας, τόσο σε παγκόσμιο, ευρωπαϊκό, και εθνικό επίπεδο.

Η παραπάνω μετάβαση από τις παραδοσιακές στις καθαρές μορφές παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας αναμένεται να φέρει σημαντική αύξηση στη χρήση γης, καθώς από τη φύση τους πολλές ΑΠΕ έχουν πολύ μικρότερη χωρική πυκνότητα σε σχέση με τις τεχνολογίες που καλούνται να αντικαταστήσουν. Είναι σημαντικό λοιπόν να συμπεριλαμβάνεται η επίδραση που έχουν οι τεχνολογίες στη χρήση γης όταν γίνονται μακροχρόνιοι σχεδιασμοί, καθώς αποτελεί αναπόσπαστο κομμάτι των επιπτώσεων που οι τεχνολογίες αυτές έχουν στο περιβάλλον.

Η ποσοτικοποίηση της χρήσης γης για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας είναι ένα ζήτημα που έχει συζητηθεί αρκετά, καθώς ο καθορισμός ενός καθολικού δείκτη μέτρησης είναι δύσκολος. Σε ένα γενικό πλαίσιο, μπορεί να γίνει με δύο τρόπους, είτε βάσει του άμεσου αποτυπώματος που έχουν οι εγκαταστάσεις παραγωγής είτε βάσει της συνολικής απαιτούμενης έκτασης που δεσμεύεται. Ως άμεσο αποτύπωμα θα θεωρούνταν, για παράδειγμα, στην περίπτωση ενός φωτοβολταϊκού πάρκου, ο χώρος που καταλαμβάνουν τα πάνελ, οι μετασχηματιστές, ο απαραίτητος μηχανολογικός εξοπλισμός, οι σχετικοί δρόμοι κλπ. Η συνολική έκταση είναι μεγαλύτερη και περιλαμβάνει όλη την επηρεαζόμενη έκταση από μια τεχνολογία, λαμβάνοντας υπόψη τυχόν απαραίτητες ενδιάμεσες αποστάσεις. Ενδεικτικά, το άμεσο αποτύπωμα ενός αιολικού πάρκου μπορεί να είναι ακόμα και 25 φορές μικρότερο από τη συνολική έκταση που δεσμεύεται για τη χρήση του. [41]

3.2 Προκλήσεις

Γίνεται λοιπόν σαφές πως οι επιπτώσεις που έχει η αυξανόμενη χρήση γης για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας στο περιβάλλον χρήζουν προσοχής και διερεύνησης. [42] Σε αντίθεση με τις παραδοσιακές μορφές ενέργειας, οι οποίες έχουν περιορισμένο αποτύπωμα στον χώρο που καταλαμβάνουν, οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας απαιτούν πολύ μεγαλύτερη έκταση για την εγκατάσταση και τη λειτουργία τους. [43,44] Πιο απλά, για την παραγωγή της ίδιας ποσότητας ενέργειας στο ίδιο χρονικό διάστημα από ένα φωτοβολταϊκό πάρκο ή ένα υδροηλεκτρικό εργοστάσιο, απαιτείται πολλαπλάσια έκταση σε σχέση με ένα λιγνιτικό εργοστάσιο.

Η φύση των ΑΠΕ ως λιγότερο “γεωγραφικά πυκνές” μορφές παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας εγείρει πολλαπλά ζητήματα, καθώς προκύπτει η ανάγκη για εύρεση νέων εκτάσεων γης για την ανάπτυξη των έργων αυτών. Οι τοποθεσίες που επιλέγονται

ως βέλτιστες για τέτοια έργα έχουν συχνά ιδιαιτερότητες και περιορισμούς. [45] Για παράδειγμα ένα αιολικό πάρκο θα πρέπει να κατασκευαστεί σε σημείο με ανέμους υψηλής έντασης, συχνά στις κορυφές βουνών, ενώ για ένα φωτοβολταϊκό πάρκο η τοποθεσία που θα επιλεγεί θα πρέπει να μην έχει μεγάλες υψομετρικές διαφορές.

Το αυξανόμενο εδαφικό αποτύπωμα της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας δημιουργεί ζητήματα αφενός περιβαλλοντικά, καθώς συχνά επηρεάζει βιοτόπους έχοντας καταστροφικές επιπτώσεις στη βιοποικιλότητα της περιοχής, αφετέρου έχει αρνητικές επιπτώσεις στις τοπικές κοινωνίες, καθώς υποβαθμίζει αισθητικά και πολιτιστικά την περιοχή. Συχνές είναι οι αντιδράσεις των τοπικών κοινωνιών οι οποίες βρίσκονται κοντά σε νέες εγκαταστάσεις παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας [46], ενώ τα επίπεδα αποδοχής τους διαφέρουν ανά περίπτωση, πολλές φορές ανάλογα από τα οφέλη που έχουν οι πολίτες από την ανάπτυξη των νέων τεχνολογιών (απασχόληση, επιδοτήσεις), αλλά και από τις επιπτώσεις που αυτές έχουν (απόσταση από οικισμούς, επίπεδα θορύβου, επίδραση σε βιότοπους).

Κεφάλαιο 4. Ενσωμάτωση περιορισμών χρήσης γης σε μοντέλα προγραμματισμού της ηλεκτροπαραγωγής

4.1 Καθορισμός της Επίδρασης Χρήσης Γης στο OSeMOSYS

Για τη διερεύνηση των επιπτώσεων της χρήσης γης για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και τη σχέση της με την ανάπτυξη καθαρών μορφών παραγωγής, αποφασίστηκε η εξέταση διαφορετικών σεναρίων, καθορισμένα ως προς τη σχέση του ηλεκτροπαραγωγικού συστήματος και την έκταση γης που καταλαμβάνει. Απαραίτητη ήταν η προσαρμογή του κώδικα του OSeMOSYS, ώστε να συμπεριλαμβάνει τις επιθυμητές παραμέτρους για την παραπάνω εφαρμογή. Όπως ήδη αναφέρθηκε, το OSeMOSYS είναι γραμμένο σε τρεις γλώσσες προγραμματισμού, τις MathProg, GAMS, και Python. Η υλοποίηση που περιγράφεται παρακάτω πραγματοποιήθηκε σε MathProg, καθώς, παρότι απαιτεί μεγαλύτερο χρόνο αρχικής εξοικείωσης σε σχέση με την Python, αποτελεί την έκδοση με τη μεγαλύτερη υποστήριξη, τόσο από άποψη τεκμηρίωσης όσο και από την πλευρά της κοινότητας του OSeMOSYS, και κατ' επέκταση την έκδοση με την μεγαλύτερη χρήση στην παγκόσμια κοινότητα μεταξύ προγραμματιστών, ερευνητών, και ακαδημαϊκών.

Πιο συγκεκριμένα, υλοποιείται μια επέκταση του κώδικα του OSeMOSYS στην οποία δημιουργείται ένας νέος περιορισμός στο σύστημα. Αρχικά, ορίζεται η Επίδραση Χρήσης Γης (EXΓ) ως η επιφάνεια γης που καταλαμβάνεται από υποδομές για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, καθώς και για την εξόρυξη καυσίμου, όπου αυτή είναι απαραίτητη. Στη συνέχεια, εφαρμόζεται περιορισμός στο σύστημα ώστε μην επιτρέπει την αύξηση της EXΓ πάνω από ένα ορισμένο όριο.

Στον δείκτη EXΓ περιλαμβάνεται και ο χώρος που δεσμεύεται ανάμεσα σε υποδομές παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, ενώ λοιπές υποδομές όπως οι γραμμές μεταφοράς και υποσταθμοί του δικτύου αγνοούνται. Βάσει της σύντομης ανάλυσης που προηγήθηκε σχετικά με τις μεθόδους υπολογισμού της Επίδρασης Χρήσης Γης στο κεφάλαιο 3.1, επιλέχθηκε ως EXΓ η συνολική έκταση που καταλαμβάνει μια τεχνολογία, συμπεριλαμβανομένης της γης που απαιτείται να δεσμευτεί ανάμεσα σε υποδομές. Ο συγκεκριμένος ορισμός δίνει μια ορθότερη αναπαράσταση για το συνολικό αποτύπωμα της κάθε τεχνολογίας που συμπεριλαμβάνεται στο υπό εξέταση σύστημα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.

4.2 Ορισμός συναρτήσεων και μεταβλητών Επίδρασης Χρήσης Γης

Έτσι, η συνολική EXΓ του συστήματος για ένα έτος ε ορίζεται ως:

$$EXG_T = \sum_T \sum_K (IEXG_T \times I_{T,\varepsilon} + EEXG_T \times \Pi_{T,K,\varepsilon}) \forall T, K$$

Όπου $IEXG_T$ είναι η παράμετρος Ισχύος (I) Επίδρασης Χρήσης Γης μιας τεχνολογίας T και προσδιορίζει τη γη που καταλαμβάνει μια τεχνολογία ανάλογα με το μέγεθος της ισχύος της $I_{T,\varepsilon}$ για το έτος ε . Αντίστοιχα, $EEXG_T$ είναι παράμετρος Ενέργειας (E) Επίδρασης Χρήσης Γης μιας τεχνολογίας T, όπου προσδιορίζει την έκταση γης που απαιτείται για την εξόρυξη καυσίμου για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και $\Pi_{T,K,\varepsilon}$ η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια από μια τεχνολογία T με χρήση καυσίμου K για το έτος ε .

Οι μεταβλητές I και Π είναι ήδη ορισμένες στα συστήματα που μοντελοποιεί το OSeMOSYS, ενώ οι παράμετροι IEXG και EEXG ορίζονται παρακάτω στους πίνακες 5.1 και 5.2.

Μετά τον ορισμό της EXG του συστήματος, μπορεί πλέον να καθοριστεί και ο επιθυμητός περιορισμός για τη συνολική χρήση επιφάνειας γης για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας ανά έτος. Ως τιμή βάσης θεωρούμε την EXG του συστήματος για το πρώτο έτος, χωρίς δηλαδή να έχει εφαρμοστεί κάποιος περιορισμός ($EXG_{\varepsilon=1}$). Για κάθε επόμενο έτος επιθυμούμε η EXG να μένει κάτω από ένα συγκεκριμένο όριο, που ορίζεται ως εξής:

$$EXG_{max,\varepsilon} = EXG_{\varepsilon_0} \times (1 - \pi)^{(\varepsilon - \varepsilon_0)}, \quad \varepsilon > \varepsilon_0$$

Όπου EXG_{ε_0} είναι η EXG για το πρώτο έτος (ε_0) και π το περιθώριο αύξησης για κάθε έτος που τίθεται στο σύστημα.

Εύκολα φαίνεται πως για κάθε έτος $\varepsilon > \varepsilon_0$ η μέγιστη EXG ορίζεται ως συνάρτηση της EXG του πρώτου έτους, χωρίς να χρειάζεται να υπολογιστεί κάθε φορά η EXG των προηγούμενων ετών. Αυτό επιτρέπει την πλήρη εκμετάλλευση της γραμμικής φύσης του OSeMOSYS, και να μειώνεται παράλληλα και η συνολική υπολογιστική πολυπλοκότητα.

4.3 Κώδικας υλοποίησης περιορισμών χρήσης γης σε MathProg για το OSeMOSYS

Παρακάτω ακολουθεί η υλοποίηση των παραπάνω σε MathProg:

```
s.t. LAI_LandAreaImpact {r in REGION, t in TECHNOLOGY, f in FUEL, y in YEAR}:  
TotalCapacityAnnual[r, t, y] * CapacityLandAreaImpactFactor[r, t]  
+ ProductionByTechnologyAnnual[r, t, f, y] * EnergyLandAreaImpactFactor[r, t]  
= LandAreaImpact[r, t, f, y];
```

```
s.t. LAI2_LandAreaImpact {r in REGION, y in YEAR}:  
sum{t in TECHNOLOGY, f in FUEL} LandAreaImpact[r, t, f, y]  
= SumLandAreaImpact[r, y];
```

```
s.t. LAI4_LandAreaImpact {r in REGION, y in YEAR}:  
StartValue[r] * ((1 + LandAreaImpactLimit[r])^(y - min{yy in YEAR} min(yy)))  
= LAIlimit[r, y];
```

Με τον παραπάνω τρόπο έχουν οριστεί τις βασικές μεταβλητές και παραμέτρους ώστε να ενσωματώνεται στο υπάρχον, καθολικό μοντέλο ενεργειακού προγραμματισμού η έννοια της Επίδρασης Χρήσης Γης.

Κεφάλαιο 5. Εφαρμογή

Όπως ήδη αναφέρθηκε, η Ελλάδα βασιζόταν για πολλές δεκαετίες ως επί το πλείστον σε παραδοσιακές μορφές ενέργειας για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, κυρίως τον λιγνίτη και το φυσικό αέριο. Όμως τα επόμενα χρόνια αναμένεται μεγάλη αύξηση τόσο της συνολικής παραγωγής της χώρας όσο και η ανάγκη ανάπτυξης νέων, “πράσινων” τεχνολογιών μηδενικών εκπομπών όπως οι ανεμογεννήτριες, ώστε να μπορέσει η χώρα να πετύχει τους κλιματικούς της στόχους. Παρά τα φιλόδοξα πλάνα της πολιτείας για την κατασκευή τέτοιων έργων και το θετικό αντίκτυπο που έχουν στην προστασία του περιβάλλοντος σε παγκόσμιο επίπεδο, πολύ συχνά παρατηρούνται αντιδράσεις από τις τοπικές κοινωνίες [47] λόγω του αντίκτυπου που έχουν στην βιοποικιλότητα, τον τουρισμό ή την αισθητική και πολιτιστική αξία της περιοχής.

5.1 Μοντέλο

Στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας χρησιμοποιείται το OSeMOSYS-Ελλάδας [48,49], το οποίο αποτυπώνει το ηλεκτροπαραγωγικό σύστημα της Ελλάδας κατά την περίοδο 2015-2050. Το μοντέλο έχει συμπεριλάβει ορισμένες τεchnοοικονομικές παραμέτρους καθώς και την τρέχουσα και τη μελλοντική δομή του ελληνικού τομέα ηλεκτρικής ενέργειας. Το μείγμα των τεχνολογιών ενέργειας που εξετάζονται περιλαμβάνει τόσο τις υφιστάμενες τεχνολογίες στον ελληνικό τομέα ηλεκτρικής ενέργειας όσο και εκείνες που αναμένεται να αναπτυχθούν στα επόμενα χρόνια και συνεπώς εισάγονται στα μοντελοποιημένα μονοπάτια.

Όσον αφορά τις τεchnοοικονομικές παραμέτρους που έχουν τεθεί στο μοντέλο και τις βασικές προβλέψεις σχετικά με την εξέλιξη του τομέα ηλεκτρικής ενέργειας της χώρας (π.χ. τελική ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας, τιμολόγηση άνθρακα κ.λπ.), χρησιμοποιούνται δεδομένα που αναφέρονται στην μακροπρόθεσμη κυβερνητική στρατηγική, καθώς και επιπλέον δεδομένα από έρευνες παγκόσμιας κλίμακας. Για την πρόβλεψη της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας αξιοποιήθηκε η βάση δεδομένων ENTSO-E.

Ακόμα, έχουν συμπεριληφθεί περιορισμοί όπως αυτοί ορίζονται από εθνικά και ευρωπαϊκά πλαίσια σε σχέση με τον περιορισμό χρήσης ορισμένων τεχνολογιών. Έτσι, η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από λιγνίτη σταματάει το 2025 και οι πετρελαϊκές μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας παύουν να λειτουργούν το 2030.

Οι τεχνολογίες που συμπεριλαμβάνονται στο μοντέλο είναι:

- Πετρελαϊκά εργοστάσια (συνδυασμένου κύκλου, εσωτερικής καύσης και ατμοστρόβιλου)
- Φυσικό αέριο (συνδυασμένου κύκλου, ανοιχτού κύκλου και εσωτερικής καύσης και ατμοστρόβιλου)
- Λιγνιτικά εργοστάσια
- Γεωθερμικές μονάδες
- Μονάδες βιομάζας
- Υδροηλεκτρικά εργοστάσια
- Συγκεντρωτικά ηλιακά συστήματα (“CSP”)
- Φωτοβολταϊκά πάρκα
- Φωτοβολταϊκά στέγης
- Χερσαία αιολικά πάρκα
- Υπεράκτια αιολικά πάρκα

5.2 Καθορισμός παραμέτρων χρήσης έκτασης γης

Για τον υπολογισμό της τελικής ΕΧΓ του συστήματος απαιτείται οι ορισμός δύο παραμέτρων, μιας για την έκταση που καταλαμβάνεται από την εγκατάσταση παραγωγής ρεύματος και μιας για την έκταση που καταλαμβάνεται από τη διαδικασία εξόρυξης της αναγκαίας πρώτης ύλης.

Για τον ορισμό των παραμέτρων ΙΕΧΓ και ΕΕΧΓ μελετήθηκε εκτενής βιβλιογραφία σχετικά με τη χρήση έκτασης γης για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Είναι σαφές ότι οι τιμές των παραμέτρων υπόκεινται σε πολλαπλές υποθέσεις, ειδικά στην περίπτωση του αποτυπώματος από την παραγωγή πρώτης ύλης για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας (ΕΕΧΓ), όπου ο υπολογισμός αντιπροσωπευτικής τιμής μπορεί να διαφέρει ανάλογα με την μεθοδολογία που επιλέγεται. Σε περιπτώσεις πιο σύγχρονων τεχνολογιών, η βιβλιογραφία είναι σαφώς περιορισμένη. Φυσικά είναι πιθανό να υπάρχουν μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με χρήση μιας από τις παρακάτω τεχνολογίες, με χρήση γης πολύ διαφορετική από την αναγραφόμενη. Οι αποκλίσεις αυτές είναι αναμενόμενες, καθώς η χρήση γης ανά τεχνολογία μπορεί να διαφέρει δραματικά ανάλογα με τον εξοπλισμό που χρησιμοποιείται σε μία μονάδα, την παλαιότητα και την αποδοτικότητά της. Οι παρακάτω παράμετροι όμως δεν παύουν να είναι ενδεικτικές της επίδρασης που έχει κάθε μία από τις τεχνολογίες στη χρήση γης.

Στον Πίνακα 5.1 φαίνονται οι τιμές της παραμέτρου Ισχύος Επίδρασης Χρήσης Γης, και στον Πίνακα 5.2 οι τιμές της παραμέτρου Ενέργειας Επίδρασης Χρήσης Γης για κάθε τεχνολογία, όπως αυτές επιλέχθηκαν.

Πίνακας 5.1.

Παρουσιάζονται οι παράμετροι ισχύος επίδρασης χρήσης γης (ΙΕΧΓ) που επιλέχθηκαν για κάθε τεχνολογία. [50]

Τεχνολογία	ΙΕΧΓ _τ (km ² /GW)
Πετρελαϊκό εργοστάσιο	1,8
Εργοστάσιο φυσικού αερίου	1,8
Λιγνιτικό εργοστάσιο	2
Γεωθερμική μονάδα	38,8
Μονάδα βιομάζας	2
Υδροηλεκτρικό εργοστάσιο	84,6
Συγκεντρωτικό ηλιακό σύστημα (CSP)	30
Φωτοβολταϊκό πάρκο	34,4
Φωτοβολταϊκά στέγης	0
Χερσαίο αιολικό πάρκο	368,3
Υπεράκτιο αιολικό πάρκο	368,3

Παρατηρώντας τις τιμές της παραμέτρου ΙΕΧΓ στον πίνακα, φαίνεται πως τα αιολικά πάρκα έχουν με διαφορά τη μεγαλύτερη τιμή, λόγω της φύσης της τοποθέτησης των ανεμογεννητριών στο χώρο. Η ΙΕΧΓ των αιολικών πάρκων είναι μία τάξη μεγέθους μεγαλύτερη από τις υπόλοιπες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (πλην της βιομάζας).

Οι παραδοσιακές μορφές ενέργειας έχουν παράμετρο με τη σειρά τους μια τάξη μεγέθους μικρότερη από αυτή των ΑΠΕ, όντας σχεδόν αμελητέες σε σχέση με τις υπόλοιπες.

Η απόκλιση που παρατηρείται ανάμεσα στα αιολικά και τις υπόλοιπες μορφές παραγωγής επιβεβαιώνει την πρότερη αναφορά στην μεγάλη διαφορά ενεργειακής πυκνότητας που έχουν οι συγκεκριμένες τεχνολογίες σε σχέση με τις παραδοσιακές μονάδες παραγωγής.

Άξιες αναφοράς είναι οι τιμές της ΙΕΓΧ των μονάδων βιομάζας, οι οποίες μοιράζονται πολλά κοινά με τα παραδοσιακά λιγνιτικά εργοστάσια και κατά συνέπεια μοιράζονται και κοινή τιμή της παραμέτρου. Ακόμα, η τιμή της παραμέτρου για τα φωτοβολταϊκά πάνελ που τοποθετούνται στις στέγες κτιρίων είναι μηδενική, καθώς θεωρείται πως δεν καταλαμβάνουν καθόλου επιπλέον χώρο που θα μπορούσε να αξιοποιηθεί διαφορετικά.

Πίνακας 5.2.

Παρουσιάζονται οι παράμετροι ενέργειας επίδρασης χρήσης γης (ΕΕΧΓ) που επιλέχθηκαν για κάθε τεχνολογία. [50]

Τεχνολογία	ΕΕΧΓ _τ (m ² /GWh)
Πετρελαϊκό εργοστάσιο	144
Εργοστάσιο φυσικού αερίου	144
Λιγνιτικό εργοστάσιο	124,2
Γεωθερμική μονάδα	0
Μονάδα βιομάζας	0
Υδροηλεκτρικό εργοστάσιο	0
Συγκεντρωτικό ηλιακό σύστημα (CSP)	0
Φωτοβολταϊκό πάρκο	0
Φωτοβολταϊκά στέγης	0
Χερσαίο αιολικό πάρκο	0
Υπεράκτιο αιολικό πάρκο	0

Όσον αφορά στις παραμέτρους ενέργειας, είναι ευνόητο πως μόνο οι παραδοσιακές μορφές ενέργειας συμπεριλαμβάνονται, καθώς όλες οι ΑΠΕ έχουν μηδενικές τιμές στην παράμετρο αυτή.

5.3 Σενάρια

Για τους σκοπούς της παρούσας εργασίας, μελετώνται εναλλακτικά μονοπάτια μείωσης των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα (σενάρια), όπου κάθε μονοπάτι αναπαριστά την εξέλιξη των τεχνολογιών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας ανά τα έτη. Αρχικά, το Σενάριο Αναφοράς αποτελεί το μονοπάτι χωρίς περιορισμούς στην Επίδραση Χρήσης Γης. Στην συνέχεια εξετάζονται 6 εναλλακτικά σενάρια όπου η συνολική ΕΧΓ του συστήματος περιορίζεται σε ποσοστό 5%, 4%, 3%, 2%, 1%, 0%

αύξησης ανά έτος. Όλες οι υπόλοιπες παραδοχές των σεναρίων αυτών είναι κοινές με το σενάριο αναφοράς.

Για την καλύτερη παρουσίαση των εναλλακτικών σεναρίων, παρακάτω παρουσιάζονται μόνο τα Σενάρια Αναφοράς, 5%, 3%, 1% και 0%, ως αντιπροσωπευτικά της ανάλυσης που πραγματοποιήθηκε.

Κεφάλαιο 6. Αποτελέσματα

Το OSeMOSYS-Ελλάδας έχει τη δυνατότητα χρονικού εύρους ανάλυσης στο διάστημα από το 2015 μέχρι το 2050. Η ανάλυση που πραγματοποιήθηκε επικεντρώθηκε σε μελλοντικό χρονικό διάστημα, ξεκινώντας δηλαδή από το 2021, μέχρι και το 2050, ώστε τα τελικά αποτελέσματα να είσαι όσο το δυνατόν πιο αντιπροσωπευτικά της πραγματικότητας. Τα ιστορικά δεδομένα που εισήχθησαν στο μοντέλο για την περίοδο 2015 - 2020 βοήθησαν στην αρχική βαθμονόμησή του.

Μελετήθηκαν τα διαφορετικά σενάρια που αναφέρονται παραπάνω, στα οποία επιβλήθηκε $EXG_{max,\varepsilon}$ για κάθε έτος ε , περιορίζοντας το περιθώριο αύξησης της συνολικής EXG του συστήματος κατά ποσοστό αύξησης π ανά έτος.

6.1 Σενάριο αναφοράς

Αρχικά, για την μελέτη του μοντέλου, αναλύθηκε ένα σενάριο χωρίς να έχει επιβληθεί κανένας περιορισμός, ώστε να εξαχθούν συμπεράσματα για τη συμπεριφορά του μοντέλου στη συνήθη λειτουργία του (σενάριο αναφοράς).

Στον παρακάτω πίνακα (6.1) φαίνεται η Επίδραση Χρήσης Γης, η Παραγωγή και η Ισχύς των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στο πρώτο και το τελευταίο έτος της μελέτης μας, ως ποσοστό επί του συνόλου των τεχνολογιών. Παρ' όλο που η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από ΑΠΕ για το πρώτο έτος (2021) αποτελεί μόνο το 32,3% του συνόλου, η επίδραση των συγκεκριμένων τεχνολογιών στη χρήση γης αποτελεί πάνω από το 98% του συνόλου. Η συγκεκριμένη διαφορά κάνει σαφή την τεράστια επίδραση που έχουν οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας στην χρήση γης. Στο ίδιο σενάριο, στο τελευταίο έτος (2050) οι ΑΠΕ έχουν φτάσει να αντιπροσωπεύουν το 87,4% της συνολικής παραγωγής και το 99,8% της EXG.

Πίνακας 6.1.

Ποσοστό EXG, Παραγωγής και Ισχύος των ΑΠΕ ως προς τα αντίστοιχα συνολικά μεγέθη για το σενάριο αναφοράς

Τεχνολογία	Έτος	Επίδραση Χρήσης Γής	Παραγωγή	Ισχύς
ΑΠΕ	2021	98,3%	32,3%	48,4%
ΑΠΕ	2050	99,8%	87,4%	82,5%

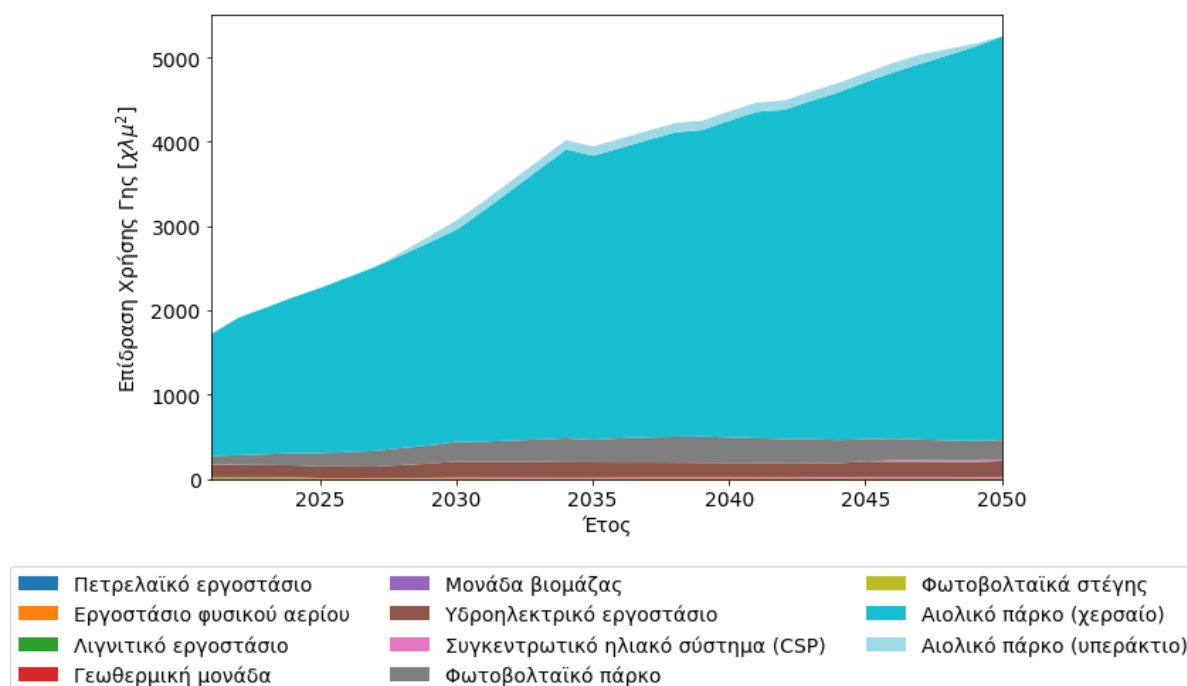
Πίνακας 6.2.

Ποσοστό ΕΧΓ, Παραγωγής και Ισχύος των αιολικών πάρκων ως προς τα αντίστοιχα συνολικά μεγέθη για το σενάριο αναφοράς

Τεχνολογία	Έτος	Επίδραση Χρήσης Γής	Παραγωγή	Ισχύς
Αιολικά	2021	83,8%	16,8%	21,9%
Αιολικά	2050	91%	39,6%	36,4%

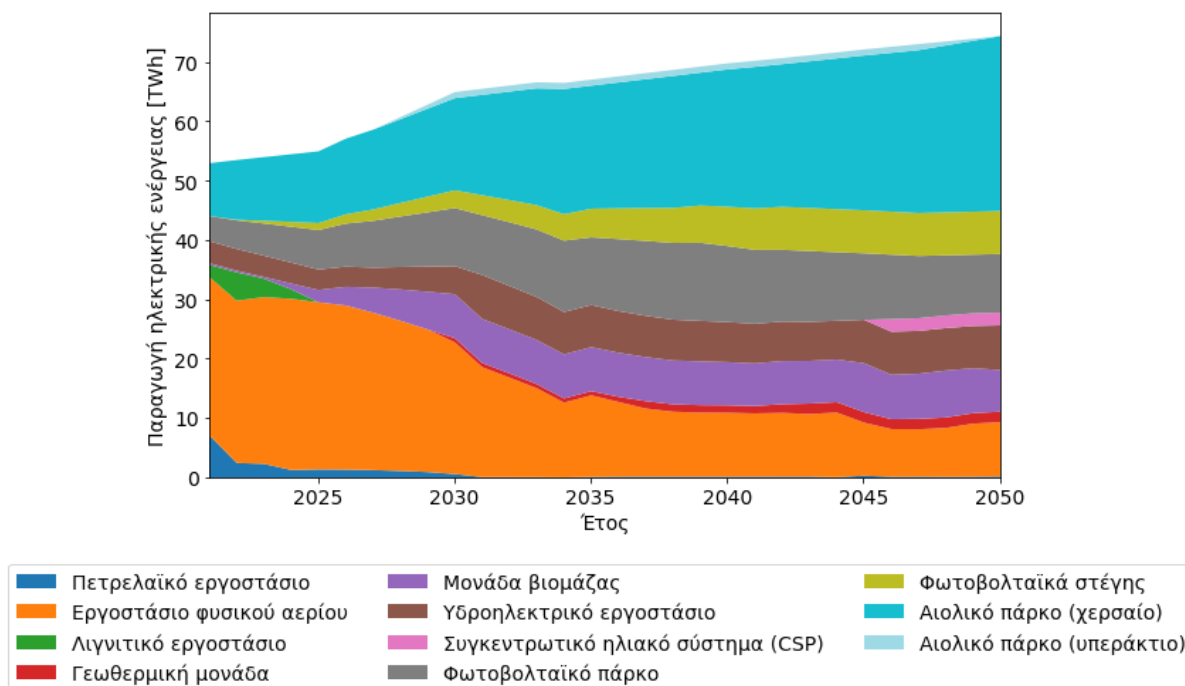
Πέρα από την μεγάλη επίδραση των ΑΠΕ, αξίζει να μελετηθεί και η επίπτωση των αιολικών μονάδων στη συνολική ΕΧΓ του συστήματος (Πίνακας 6.2). Πράγματι, ενώ για το 2021 τα αιολικά πάρκα παράγουν μόνο το 17% της ηλεκτρικής ενέργειας, καταλαμβάνουν ήδη σχεδόν το 84% του χώρου όλων των τεχνολογιών. Αντίστοιχη φαίνεται να είναι και η εξέλιξή τους ανά τα έτη, καθώς με σχεδόν 40% συμβολή στην ηλεκτροπαραγωγή το 2050 φτάνουν να καταλαμβάνουν το 91% της συνολικής έκτασης γης που δεσμεύεται για ηλεκτροπαραγωγή.

Επίδραση Χρήσης Γης - Σενάριο Αναφοράς



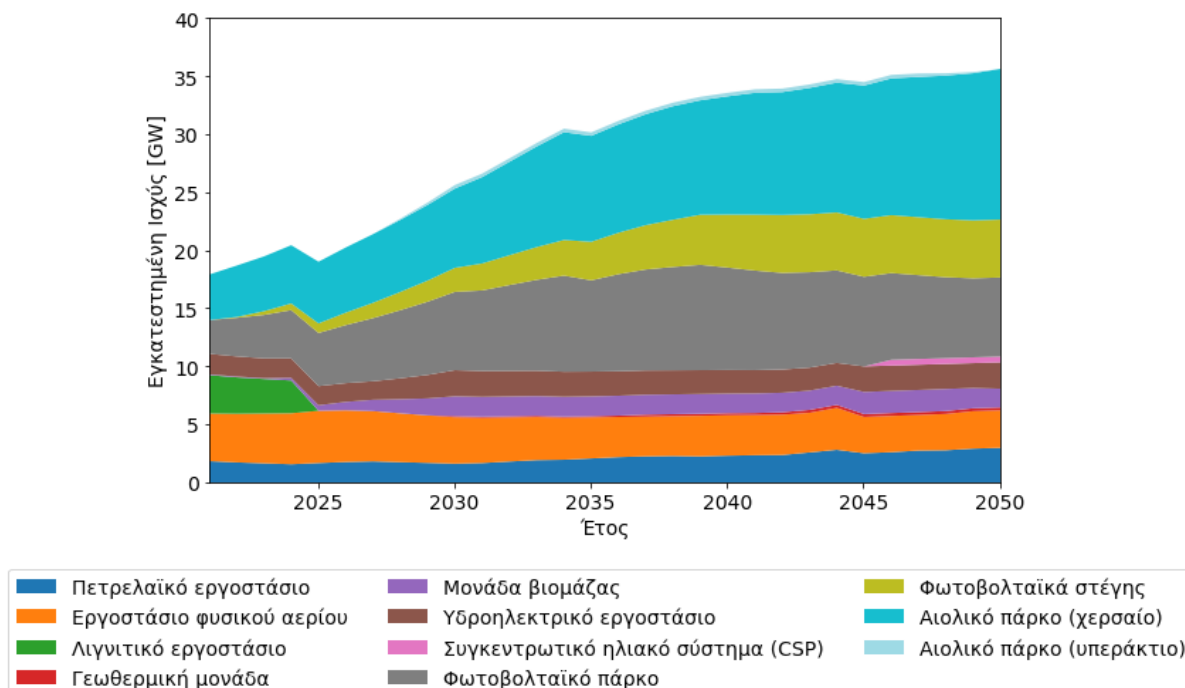
Εικόνα 6.1. Επίδρασης χρήσης γης των τεχνολογιών του συστήματος για το σενάριο αναφοράς για την περίοδο 2021-2050

Παραγωγή - Σενάριο Αναφοράς



Εικόνα 6.2. Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας ανά τεχνολογία για το σενάριο αναφοράς για την περίοδο 2021-2050

Ισχύς - Σενάριο Αναφοράς



Εικόνα 6.3. Ηλεκτρική ισχύς ενέργειας ανά τεχνολογία για το σενάριο αναφοράς για την περίοδο 2021-2050

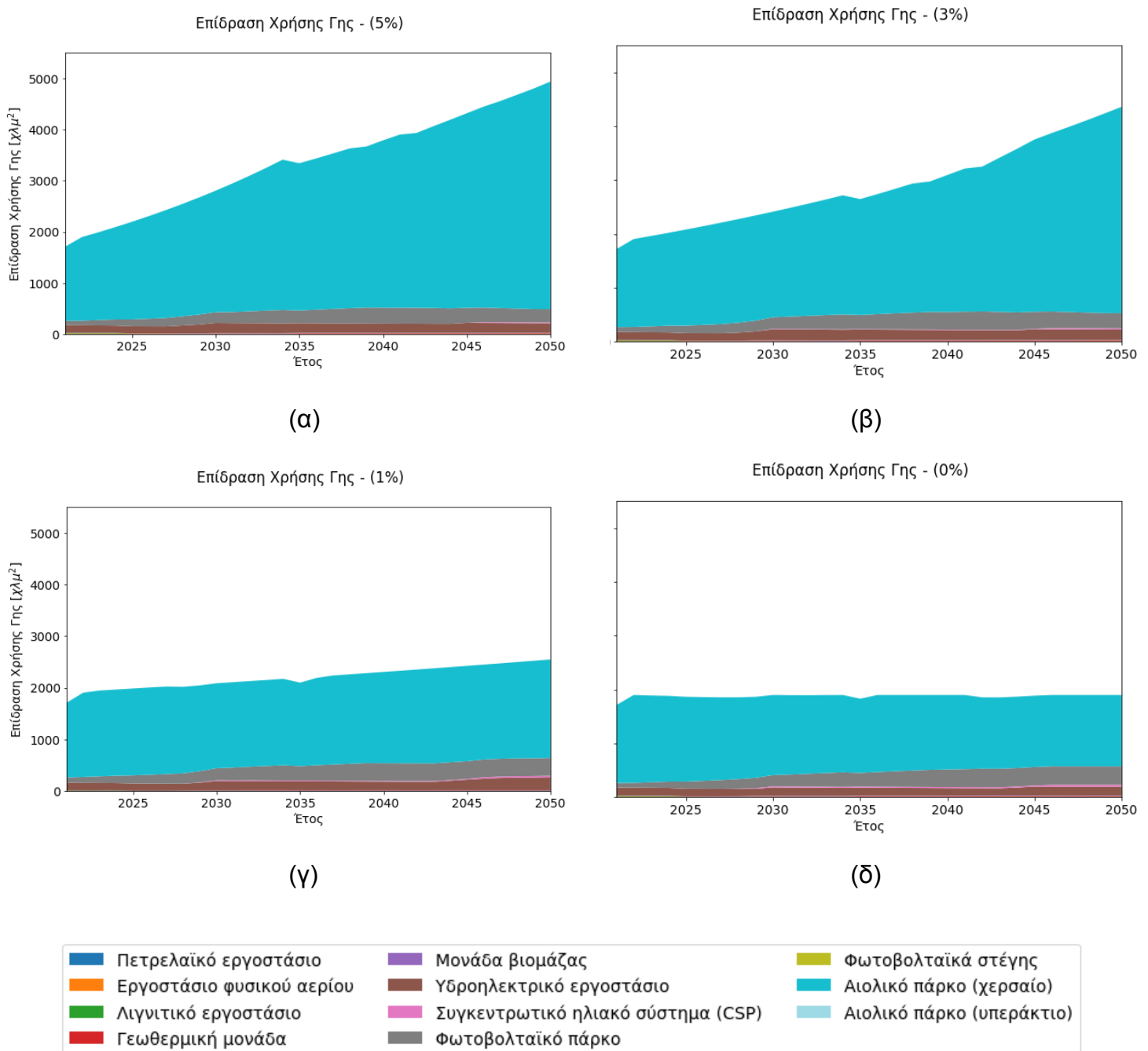
Στην εικόνα 6.1 παρουσιάζεται η εξέλιξη της ΕΧΓ χωρίς κανέναν περιορισμό για το σύστημα αναφοράς. Όπως και στους πίνακες 6.1 και 6.2, έτσι κι εδώ είναι ξεκάθαρο πως η συνολική ΕΧΓ απαρτίζεται σε συντριπτικό ποσοστό από ΑΠΕ, και κυρίως αιολικά πάρκα. Οι τεχνολογίες με επίσης σημαντική συνεισφορά στη συνολική ΕΧΓ είναι τα φωτοβολταϊκά πάρκα και τα υδροηλεκτρικά εργοστάσια.

Στις εικόνες 6.2 και 6.3 φαίνεται αντίστοιχα η εξέλιξη της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και της εγκατεστημένης ισχύος του συστήματος. Σύμφωνα με αυτό το σενάριο, σημαντική ανάπτυξη στην περίοδο 2021-2050 θα έχουν οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, με κύριες τα αιολικά και τα φωτοβολταϊκά πάρκα. Δευτερεύουσες πηγές καθαρής ενέργειας με σημαντική αύξηση στο υπό εξέταση χρονικό εύρος φαίνεται να είναι τόσο η βιομάζα όσο και οι υδροηλεκτρικές μονάδες. Αντίστοιχα, από το 2045 φαίνεται να ξεκινάει και ανάπτυξη νέων τεχνολογιών, όπως τα συγκεντρωτικά ηλιακά συστήματα (CSP). Ευθυγραμμισμένα με τους εθνικούς στόχους της προσαρμογής στην κλιματική αλλαγή, φαίνεται και ο μηδενισμός της παραγωγής ηλεκτρισμού από λιγνίτη το 2025, και από πετρέλαιο το 2030. Τέλος, η χρήση φυσικού αερίου για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας περιορίζεται, αλλά ένα σημαντικό μέρος της παραγωγής συνεχίζει να αντιπροσωπεύεται από αυτό.

Μια ακόμα σημαντική διαπίστωση που μπορεί να γίνει από τα παραπάνω διαγράμματα είναι πως, χωρίς κάποιο περιορισμό, η χρήση γης υπερδιπλασιάζεται στο διάστημα 2021-2050, καθοδηγούμενη από την αυξημένη χρήση αιολικών και δευτερευόντως των φωτοβολταϊκών μονάδων, από τα 1.800 km² στα 5.000 km² συνολικής έκτασης. Η αύξηση αυτή είναι πιο απότομη μέχρι το 2035, ενώ ο ρυθμός αύξησης ελαττώνεται ελαφρώς μετά το 2035 καθώς αντίστοιχα μετριάζει και ο ρυθμός ανάπτυξης νέων ΑΠΕ.

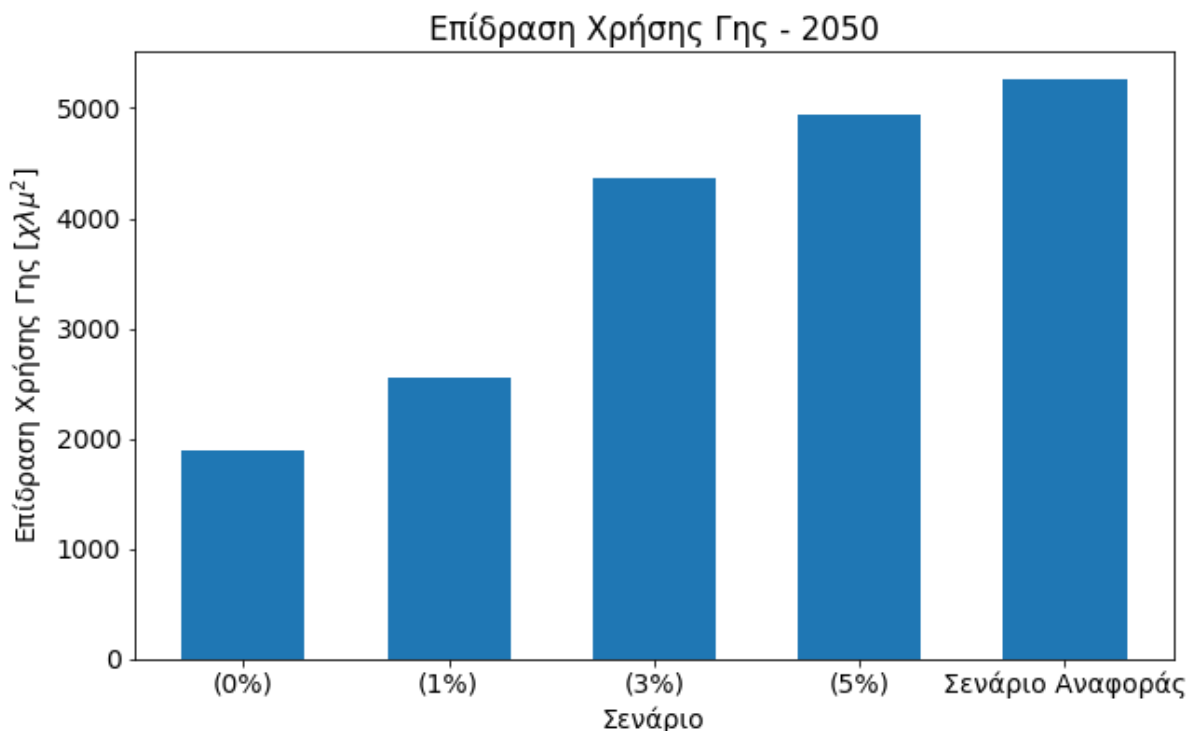
6.2. Εναλλακτικά μονοπάτια με περιορισμό στη χρήση γης

Για την μελέτη της επίδρασης που έχει στο μοντέλο η χρήση περιορισμών, παρουσιάζονται 4 μοντέλα στα οποία έχουν εφαρμοστεί όρια στον επιτρεπτό ρυθμό αύξησης της ΕΧΓ ανά έτος. Οι περιορισμοί κυμαίνονται από πιο χαλαρούς προς πιο αυστηρούς, ξεκινώντας από 5% επιτρεπτή αύξηση ανά έτος, και συνεχίζοντας με επιτρεπτές αυξήσεις 3%, 1% αλλά και μηδενική επιτρεπτή ετήσια αύξηση της ΕΧΓ (σενάριο 0%), όπου το μοντέλο δεν επιτρέπεται να ξεπεράσει σε κανένα σημείο την έκταση που καταλάμβανε στο πρώτο έτος.



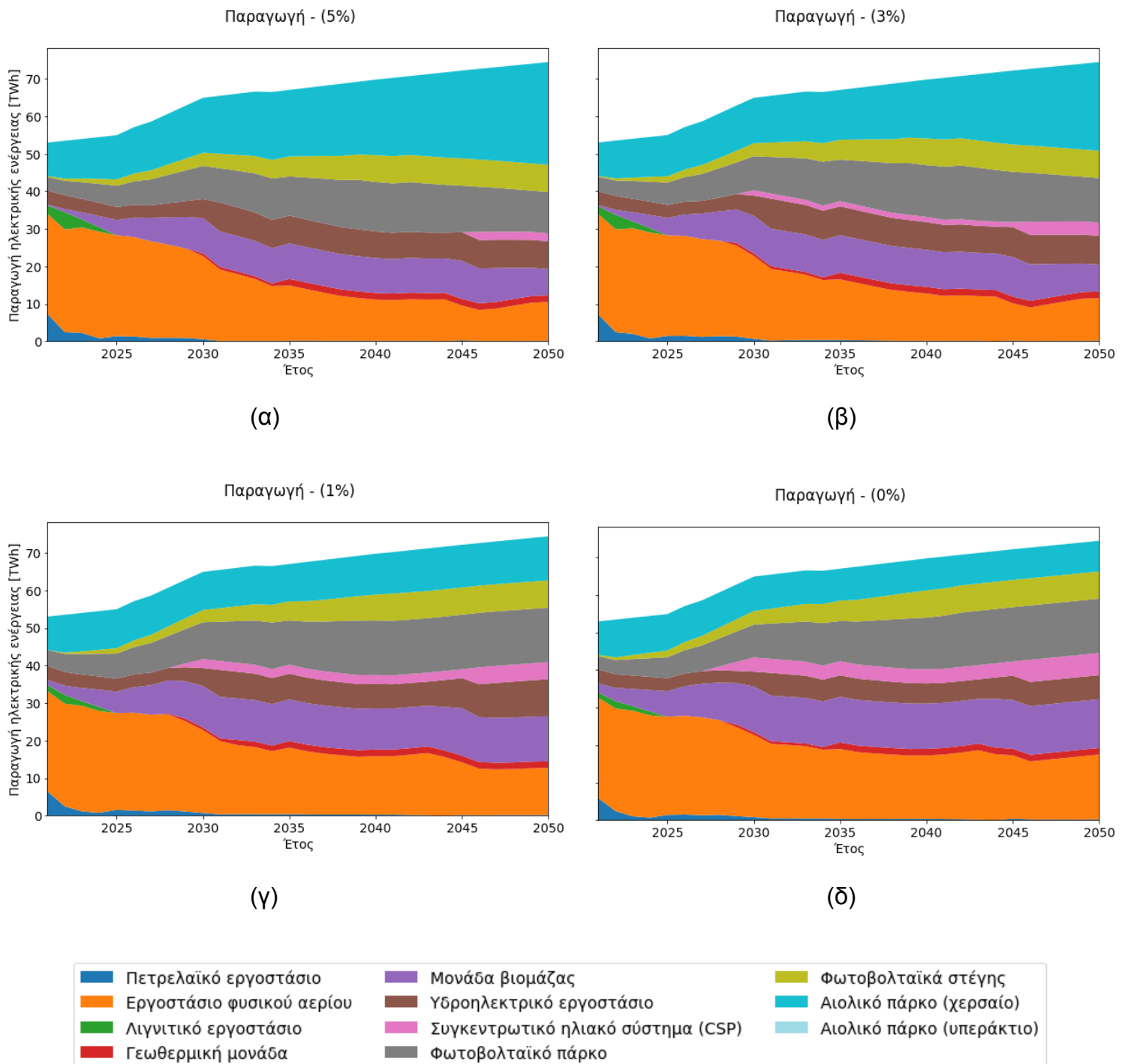
Εικόνα 6.4. Επίδραση Χρήσης Γης των τεχνολογιών του συστήματος για τα υπό εξέταση σενάρια αύξησης γης κατά τα έτη 2021-2050: (α) Σενάριο περιορισμού αύξησης ΕΧΓ στο 5% ανά έτος (β) Σενάριο περιορισμού αύξησης ΕΧΓ στο 3% ανά έτος (γ) Σενάριο περιορισμού αύξησης ΕΧΓ στο 1% ανά έτος (δ) Σενάριο περιορισμού ΕΧΓ σε μηδενική αύξηση

Στα διαγράμματα της εικόνας 6.4 εμφανίζονται οι διαφορετικές τιμές της ΕΧΓ ανάλογα με τον περιορισμό που τίθεται στο σύστημα. Ενδιαφέρον έχει πως σε μεγαλύτερο βαθμό περιορίζεται η ανάπτυξη των αιολικών πάρκων και κατ' επέκταση η χρήση γης που προκύπτει από αυτά, όσο μειώνεται το περιθώριο αύξησης, καθώς αποτελούν την τεχνολογία με το μακράν μεγαλύτερο αντίκτυπο στην επίδραση χρήσης γης. Η χρήση γης από τις υπόλοιπες τεχνολογίες φαίνεται να μένει σταθερή, ανεξαρτήτως σεναρίου, συγκριτικά τουλάχιστον με αυτήν των αιολικών. Στην εικόνα 6.5 φαίνεται ακόμα καλύτερα η συγκριτική εικόνα μεταξύ των πέντε σεναρίων αναφορικά με τη χρήση γης στο τελευταίο έτος του μοντέλου (2050).



Εικόνα 6.5. Συνολική Επίδραση Χρήσης Γης του συστήματος για τα σενάρια αύξησης γης κατά 0%, 1%, 3% και 5% ανά έτος και για το σενάριο αναφοράς, για το έτος 2050

Ακόμα καλύτερη εικόνα της εξέλιξης του μείγματος ηλεκτροπαραγωγής ανάλογα με το μονοπάτι μετάβασης δίνεται εξετάζοντας την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και την εγκατεστημένη ισχύ του συστήματος ανά τα έτη, για τα τέσσερα σενάρια περιορισμού της χρήσης γης (εικόνες 6.6 και 6.7).



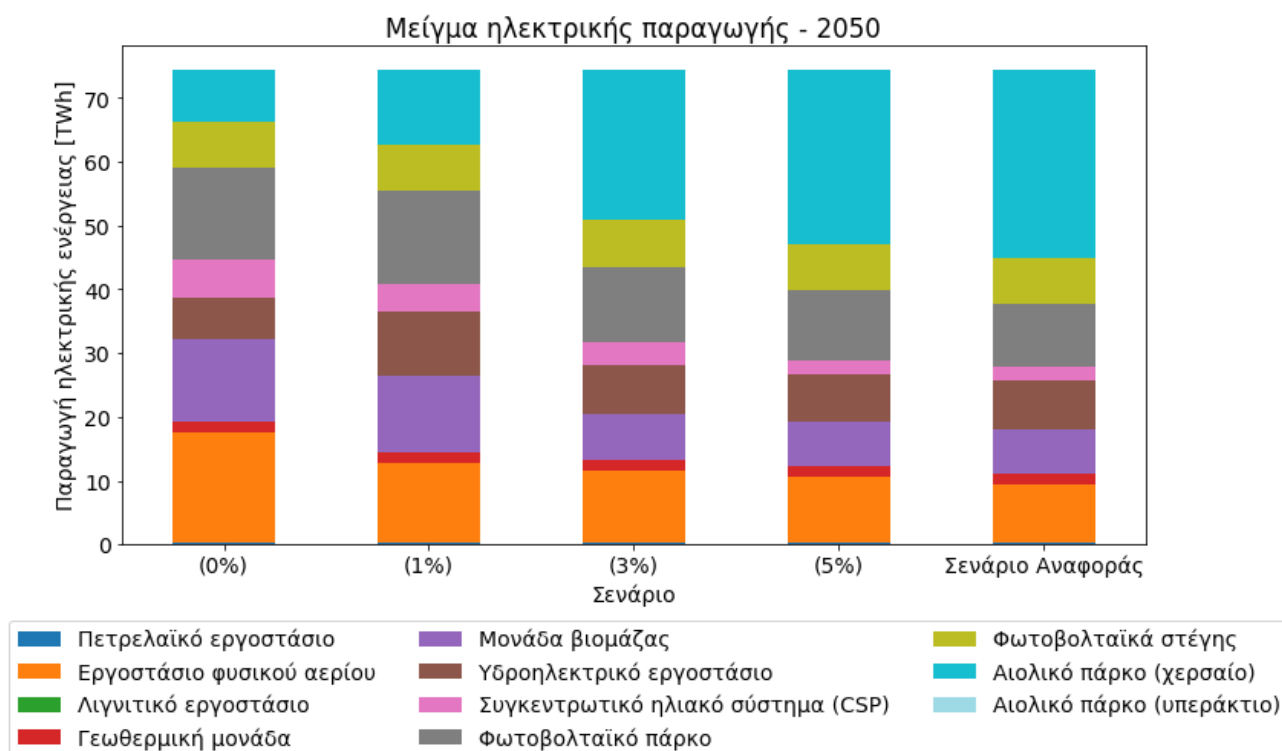
Εικόνα 6.6. Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας των τεχνολογιών του συστήματος για τα υπό εξέταση σενάρια κατά τα έτη 2021-2050 (α) Σενάριο περιορισμού αύξησης EXG στο 5% ανά έτος (β) Σενάριο περιορισμού αύξησης EXG στο 3% ανά έτος (γ) Σενάριο περιορισμού αύξησης EXG στο 1% ανά έτος (δ) Σενάριο περιορισμού EXG σε μηδενική αύξηση

Από την αρχική ανάλυση των εναλλακτικών μονοπατιών μπορούν να εξαχθούν μερικά σημαντικά συμπεράσματα:

Αρχικά, όσο πιο αυστηροί είναι οι περιορισμοί στην Επίδρασης Χρήσης Γης, τόσο μικρότερη είναι η ανάπτυξη των αιολικών πάρκων, καθώς αποτελούν μία από τις βασικές παραμέτρους για την αύξηση του δείκτη. Για την κάλυψη της παραγωγής που απουσιάζει αναπτύσσονται αφενός περισσότερο άλλες, νέες τεχνολογίες, όπως τα συγκεντρωτικά ηλιακά συστήματα, αφετέρου υπάρχουσες τεχνολογίες επεκτείνονται και αυξάνουν την παραγωγή τους, όπως οι μονάδες βιομάζας και τα φωτοβολταϊκά συστήματα. Αυτή η παρατήρηση δίνει μια ενδιαφέρουσα πρώτα εικόνα για τη συμπεριφορά των τεχνολογιών του μοντέλου στην εφαρμογή περιορισμών της χρήσης γης.

Πολύ μεγάλη σημασία έχει και η διαπίστωση πως το σύστημα, για να ανταπεξέλθει στους περιορισμούς που του επιβάλλονται, αφήνει μεγαλύτερο μέρος της παραγωγής να πραγματοποιείται από εργοστάσια φυσικού αερίου, παρά το υψηλό τους κόστος που αυτό εμπεριέχει ειδικά στα τελευταία χρόνια των σεναρίων, λόγω της αυξημένης τιμής των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα. Αυτό αποτελεί μια σημαντική πρώτη ένδειξη για τον τρόπο που επιλέγει το μοντέλο ώστε να αντισταθμίσει τους ολοένα και αυστηρότερους περιορισμούς, έχοντας πάντα σαν τελικό σκοπό την ελαχιστοποίηση του συνολικού κόστους. Ενδιαφέρον έχει και η μεγιστοποίηση της ισχύος, και της συνεπακόλουθης παραγωγής από τα φωτοβολταϊκά συστήματα στέγης, στα 5GW, σε όλα τα υπό εξέταση σενάρια .

Δεύτερον, η συμπεριφορά του μοντέλου όσον αφορά τα σημαντικά ορόσημα δεν αλλάζει: η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από λιγνίτη και πετρέλαιο παύουν το 2025 και το 2030 αντίστοιχα. Είναι σημαντικό όμως να τονιστεί ότι ειδικά η ανάπτυξη συγκεντρωτικών ηλιακών συστημάτων, ως νέα τεχνολογία του συστήματος, ξεκινάει πολύ νωρίτερα στα πιο “αυστηρά” μονοπάτια μετάβασης, ήδη από το 2030 σε σχέση με το 2045 στο σενάριο αναφοράς. Με τη σειρά της, αυτή η αλλαγή της συμπεριφοράς του μοντέλου αναδεικνύει την ανάγκη για εύρεση πιο χωρικά αποδοτικών μορφών παραγωγής καθαρής ενέργειας όταν επιβάλλονται πιο φιλόδοξοι περιορισμοί.



Εικόνα 6.8. Ποσότητα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας ανά εγκατεστημένη τεχνολογία του συστήματος για τα σενάρια αύξησης γης κατά 0%, 1%, 3% και 5% ανά έτος και για το σενάριο αναφοράς, για το έτος 2050

Οι παραπάνω διαπιστώσεις αποτυπώνονται ακόμα καλύτερα και στο διάγραμμα της εικόνας 6.8, όπου φαίνεται η τελική αναπαράσταση του ενεργειακού μείγματος της χώρας το 2050. Ενδεικτικά φαίνεται πως τα αιολικά πάρκα, από τα 4.790 km² που καταλαμβάνουν στο σενάριο αναφοράς, έχει περιοριστεί στα 1320 km² στο μονοπάτι με τη μηδενική αύξηση της χρήσης γης.

Τρίτον, παρατηρώντας την εξέλιξη της εγκατεστημένης ισχύος και της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας για τα διαφορετικά σενάρια, φαίνεται πως όσο πιο αυστηροί είναι οι περιορισμοί, τόσο μεγαλύτερο μέρος του συνολικού συστήματος καταλαμβάνεται μακροπρόθεσμα από ρυπογόνες τεχνολογίες αντί για ανανεώσιμες πηγές. Αντίθετα, σε μικρότερο χρονικό ορίζοντα τεχνολογίες όπως οι λιγνιτικές μονάδες περιορίζονται συντομότερα στα πιο αυστηρά σενάρια, ακολουθώντας έναν συνδυασμό πιέσεων που ασκούνται από τις υψηλές εκπομπές ρύπων και την επίδραση χρήσης γης τους. Συνολικά όμως φαίνεται πως, ως συνέπεια των αυστηρών περιορισμών στη χρήση γης, οι τελικές εκπομπές οδηγούνται σε άνοδο.

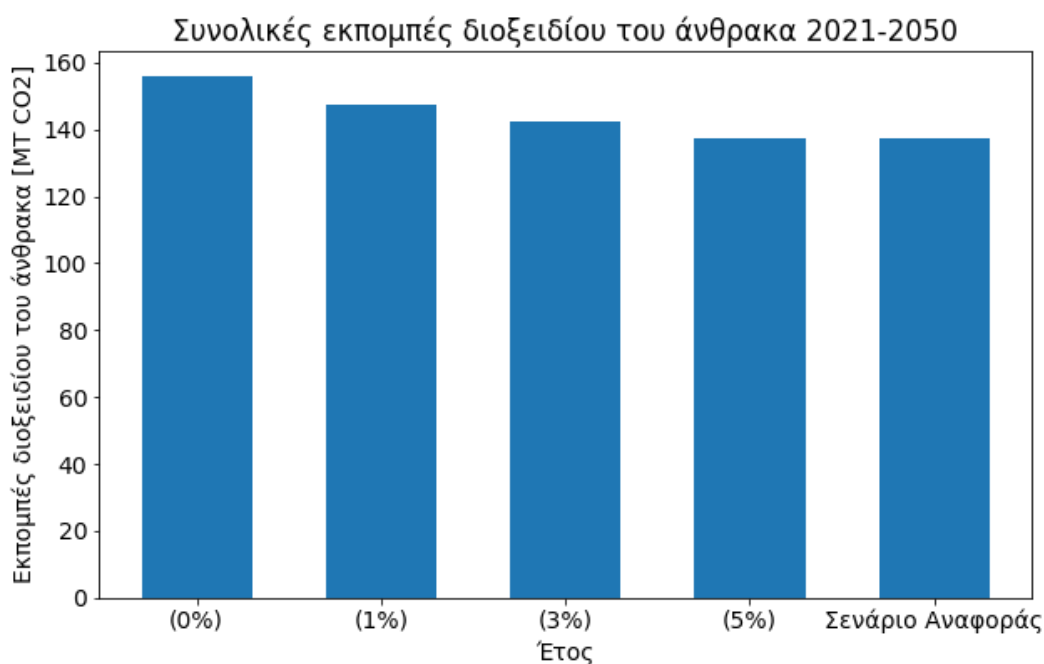
Αυτό γίνεται ακόμα πιο σαφές από το διάγραμμα στην εικόνα 6.9 και τον πίνακα 6.3. Οι συνολικές εκπομπές του Ελληνικού συστήματος ηλεκτροπαραγωγής αυξάνονται αισθητά όσο πιο αυστηρό γίνεται το πλαίσιο περιορισμού της αύξησης χρήσης γης. Η σχέση μεταξύ του ποσοστού επιτρεπτής αύξησης της ΕΧΓ και της ποσοστιαίας

αύξησης των εκπομπών δεν είναι γραμμική, καθώς η αλλαγή σεναρίου από αυτό του 1% σε αυτό της μηδενικής αύξησης της ΕΧΓ οδηγεί σε σχεδόν διπλάσιες περισσιες εκπομπές, με βάση πάντα το σενάριο αναφοράς.

Πίνακας 6.3.

Ποσοστό αύξησης των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα ανά σενάριο σε σχέση με το σενάριο αναφοράς

Σενάριο 0%	Σενάριο 1%	Σενάριο 3%	Σενάριο 5%
13%	7%	4%	0%



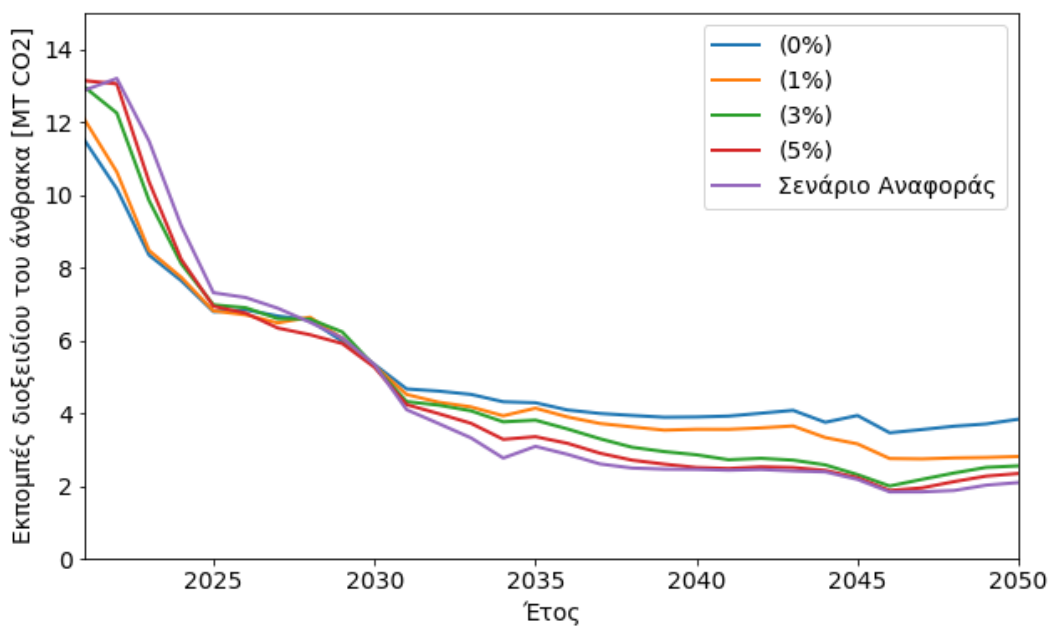
Εικόνα 6.9. Συνολικές εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα για τα σενάρια αύξησης γης κατά 0%, 1%, 3% και 5% και για το σενάριο αναφοράς, αθροιστικά για τα έτη 2021-2050

Όσον αφορά τις εκπομπές του συστήματος σε κάθε ένα από τα υπό εξέταση σενάρια, έχει ενδιαφέρον και η εξέταση την εξέλιξής τους μέσα στο διάστημα 2021-2050. Παρατηρώντας το διάγραμμα της εικόνας 6.10, φαίνεται πως, αντίθετα με αποτελέσματα που ενδεχομένως θα ανέμενε κανείς, αρχικά το σενάριο αναφοράς που δεν υπόκειται σε κανέναν περιορισμό έχει υψηλότερες εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα σε σχέση με τα υπόλοιπα σενάρια.

Αυτό συμβαίνει καθώς, όταν ξεκινάει η εφαρμογή των περιορισμών στα αντίστοιχα σενάρια, υπάρχει απότομη μείωση στην παραγωγή ενέργειας από λιγνιτικά και πετρελαϊκά εργοστάσια, όπως αναφέρθηκε ήδη παραπάνω. Μάλιστα όσο πιο αυστηρό είναι το σενάριο, τόσο πιο απότομη η μείωση παραγωγής από τις δύο αυτές τεχνολογίες. Βασική αιτία για τον περιορισμό της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από τις συγκεκριμένες τεχνολογίες είναι πως τα μοντέλα, στα πρώτα έτη, προτεραιοποιούν την μείωση παραγωγής από τεχνολογίες που συνδυάζουν υψηλές εκπομπές διοξειδίου και χαμηλή, αλλά όχι αμελητέα, ΕΧΓ.

Όμως με την πάροδο των ετών τα μοντέλα με τους αυστηρότερους περιορισμούς οδηγούνται σε υψηλότερες εκπομπές, μη μπορώντας να ανταπεξέλθουν στην πίεση που δημιουργεί η περιορισμένη ανάπτυξη αιολικών μονάδων. Έτσι, μετά το διάστημα 2030-2035, οι εκπομπές και τα σενάρια έχουν ευθέως ανάλογη σχέση, δηλαδή όσο πιο αυστηρό το σενάριο περιορισμού της χρήσης γης, τόσο υψηλότερες οι εκπομπές που έχει ετησίως το σύστημα.

Ετήσιες εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα ανά σενάριο



Εικόνα 6.10. Εξέλιξη των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα για τα 5 υπό εξέταση σενάρια, για τα έτη 2021-2050

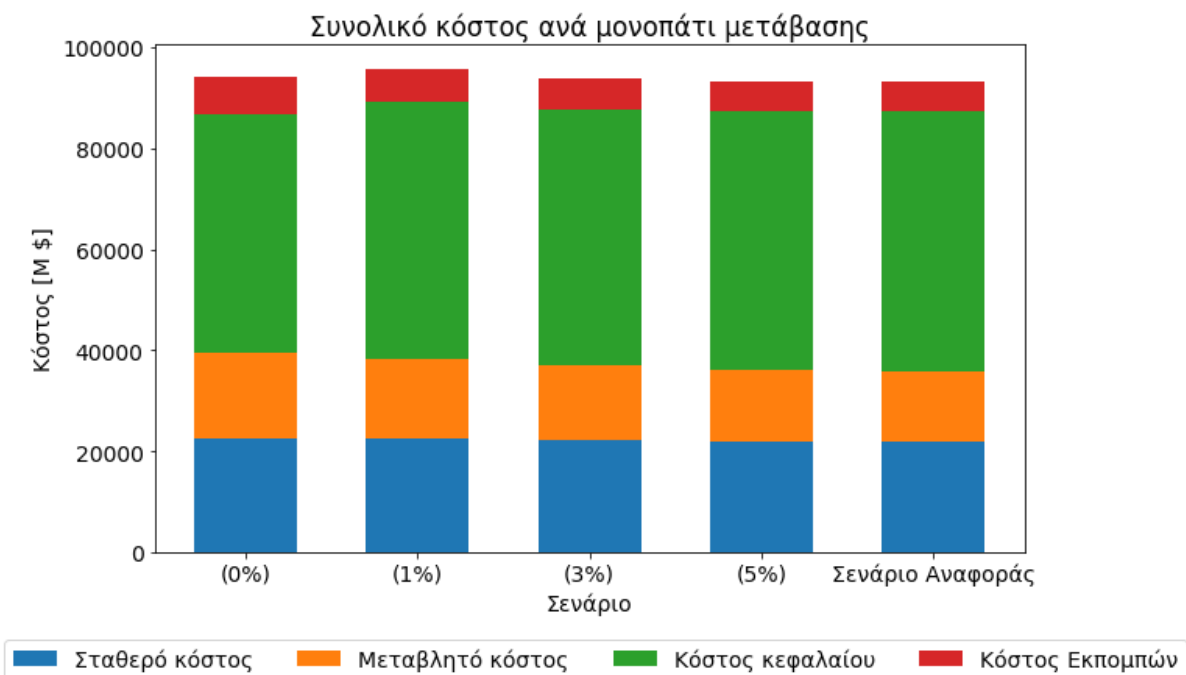
Τέλος, μια ακόμα σημαντική παράμετρος που πρέπει να ληφθεί υπόψιν στην ερμηνεία των αποτελεσμάτων του μοντέλου είναι αυτή του κόστους. Εξ άλλου τελικός σκοπός ενός μοντέλου του OSeMOSYS είναι η ελαχιστοποίηση του κόστους του συστήματος, δεδομένων των ορισμένων περιορισμών.

Τα κόστη σε ένα μοντέλο του OSeMOSYS χωρίζονται σε τρεις βασικές κατηγορίες: Το σταθερό λειτουργικό κόστος, που αντιπροσωπεύει τα κόστη για τη λειτουργία και τη συντήρηση εξοπλισμών και εγκαταστάσεων, το μεταβλητό λειτουργικό κόστος που αποτελεί τα κόστη για καύσιμα για τη λειτουργία των τεχνολογιών, και τα κόστη κεφαλαίου, τις επενδύσεις δηλαδή που γίνονται σε νέες τεχνολογίες. Πέραν των τριών αυτών βασικών μεγεθών, προστίθεται και το κόστος εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα, το οποίο αυξάνεται τόσο με την αύξηση των εκπομπών όσο και με την πάροδο των χρόνων, καθώς γίνεται ολοένα και αυστηρότερο το σχετικό πλαίσιο.

Για τα τέσσερα παραπάνω κόστη, μπορούν να παρατηρηθούν τα εξής:

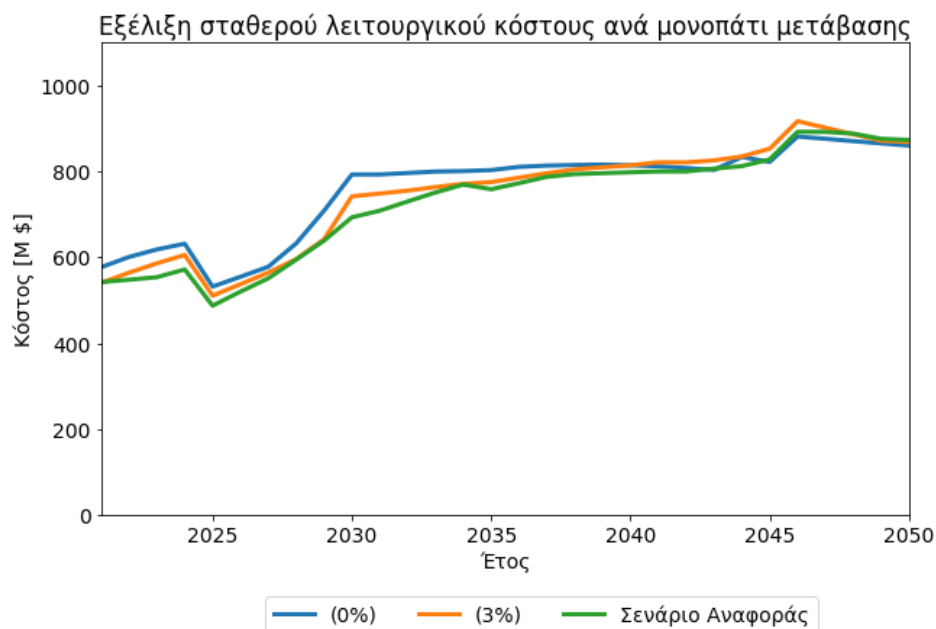
Το σταθερό λειτουργικό κόστος παραμένει ουσιαστικά το ίδιο ανεξάρτητα από το σενάριο που επιλέγουμε και τους περιορισμούς που επιβάλλονται στο μοντέλο, πιθανώς λόγω και της συνολικής τελικής παραγωγής ενέργειας, η οποία είναι ίση για όλα τα σενάρια. Το μεταβλητό λειτουργικό κόστος και το κόστος εκπομπών αυξάνεται όσο πιο αυστηροί γίνονται οι περιορισμοί χρήσης γης που επιβάλλονται στο σύστημα. Η αύξηση αυτή είναι αναμενόμενη, καθώς οδηγείται από τη σημαντικά αυξημένη χρήση φυσικού αερίου για την παραγωγή ενέργειας σε σχέση με τα λιγότερο αυστηρά σενάρια. Στον αντίποδα, τα κόστη επενδύσεων είναι μικρότερα όσο μικρότερη είναι η επιτρεπτή αύξηση της χρήσης γης, καθώς σε αυτά τα σενάρια αξιοποιούνται ήδη εγκατεστημένες τεχνολογίες, όπως οι μονάδες φυσικού αερίου, και έτσι περιορίζεται το κεφάλαιο που θα δαπανούνταν για την εγκατάσταση νέων μονάδων.

Έτσι, όπως φαίνεται και στην εικόνα 6.11, το συνολικό κόστος για κάθε σενάριο δεν παρουσιάζει ιδιαίτερες αποκλίσεις, αλλά αντίθετα παραμένει σχετικά σταθερό.

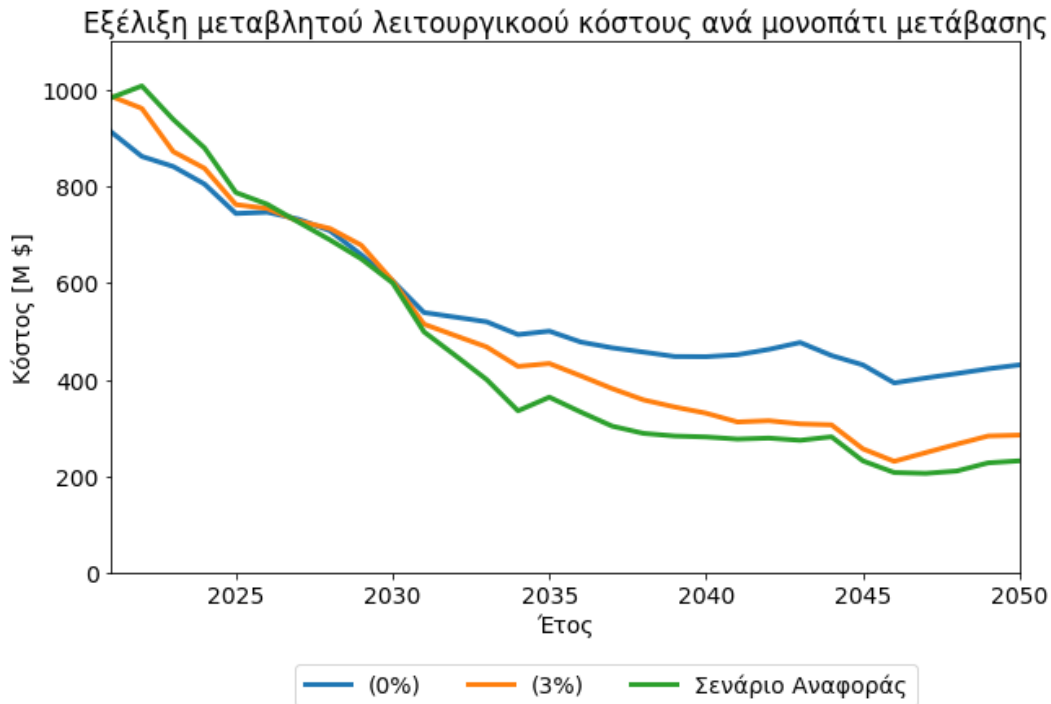


Εικόνα 6.11. Συνολικά κόστη του συστήματος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας για τα σενάρια αύξησης γης κατά 5%, 3%, 1% και 0% ανά έτος και για το σενάριο αναφοράς, αθροιστικά για τα έτη 2021-2050

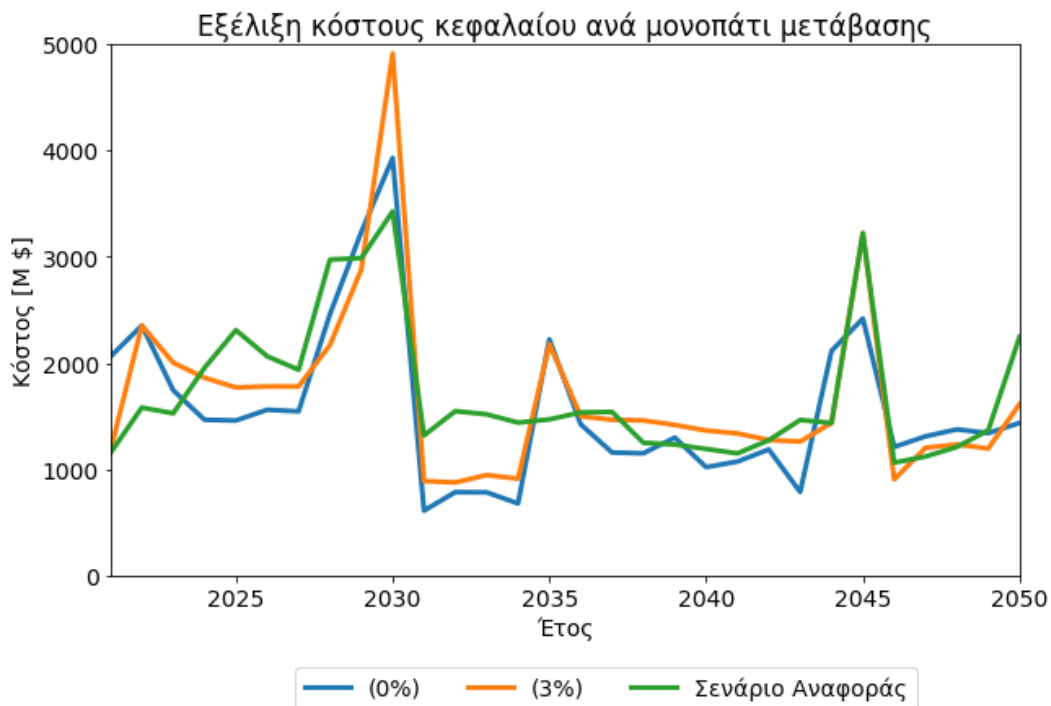
Στις εικόνες 6.12 έως 6.15 φαίνεται η εξέλιξη του σταθερού κόστους, του μεταβλητού κόστους, του κόστους κεφαλαίου και του κόστους εκπομπών για κάποια ενδεικτικά σενάρια (0%, 3% και σενάριο αναφοράς).



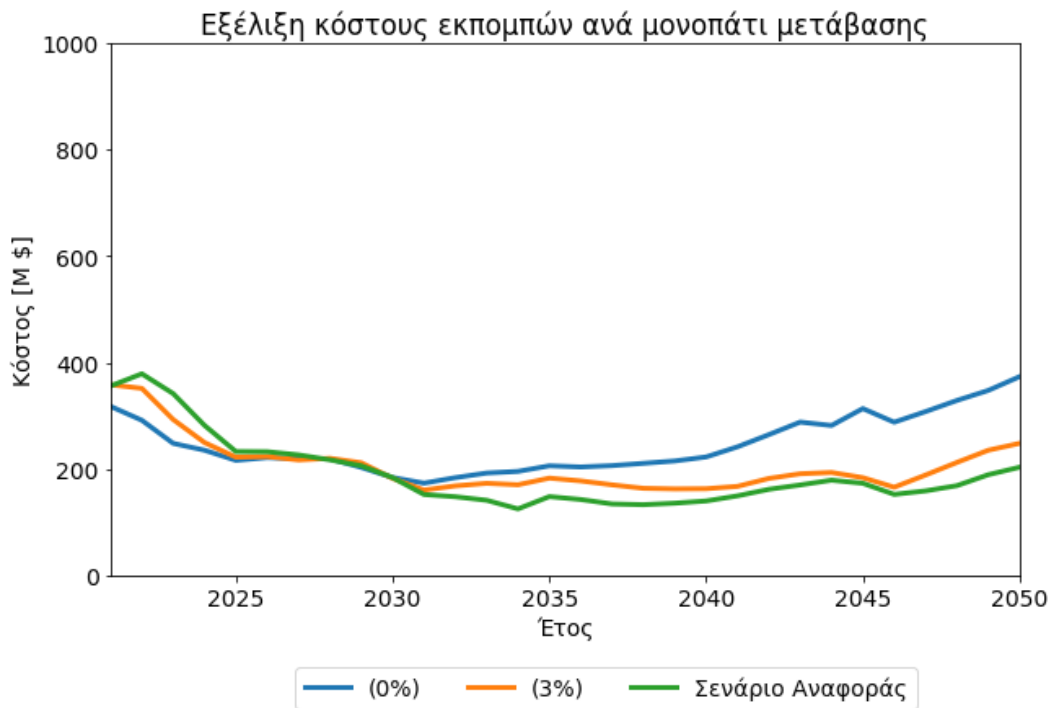
Εικόνα 6.12. Εξέλιξη του σταθερού λειτουργικού κόστους του συστήματος για τα σενάρια αύξησης γης κατά 0% και 3% ανά έτος και για το σενάριο αναφοράς, για τα έτη 2021-2050.



Εικόνα 6.13. Εξέλιξη του μεταβλητού λειτουργικού κόστους του συστήματος για τα σενάρια αύξησης γης κατά 0% και 3% ανά έτος και για το σενάριο αναφοράς, για τα έτη 2021-2050.



Εικόνα 6.14. Εξέλιξη του κόστους κεφαλαίου του συστήματος για τα σενάρια αύξησης γης κατά 0% και 3% ανά έτος και για το σενάριο αναφοράς, για τα έτη 2021-2050.



Εικόνα 6.15. Εξέλιξη του κόστους εκπομπών του συστήματος για τα σενάρια αύξησης γης κατά 3% και 0% ανά έτος και για το σενάριο αναφοράς, για τα έτη 2021-2050.

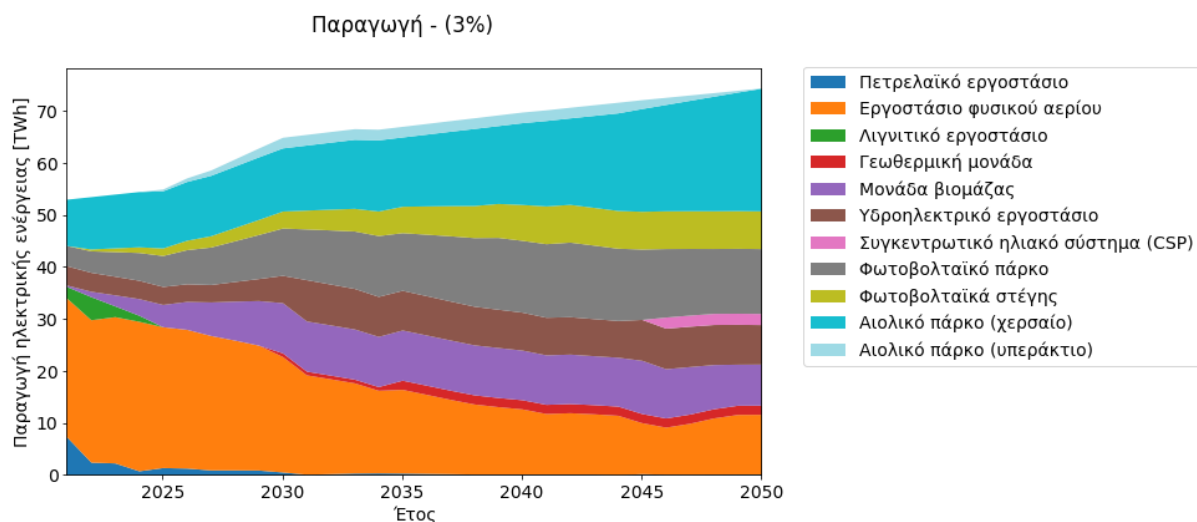
6.3 Διαφορετικές προσεγγίσεις

Για την εξαγωγή των παραπάνω αποτελεσμάτων χρησιμοποιήθηκαν πολλαπλές παραδοχές, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω. Γι' αυτό το έχει αξία η μελέτη των ίδιων σεναρίων τροποποιώντας κάποιες παραμέτρους ώστε να μπορούν να εξαχθούν πληρέστερα συμπεράσματα. Οι παράμετροι που θα αλλάξουν είναι δύο: αρχικά η επίδραση χρήσης γης των υπερράκτιων αιολικών πάρκων θα μηδενιστεί και στη συνέχεια θα τεθεί στόχος μηδενικών εκπομπών του συστήματος για το 2050.

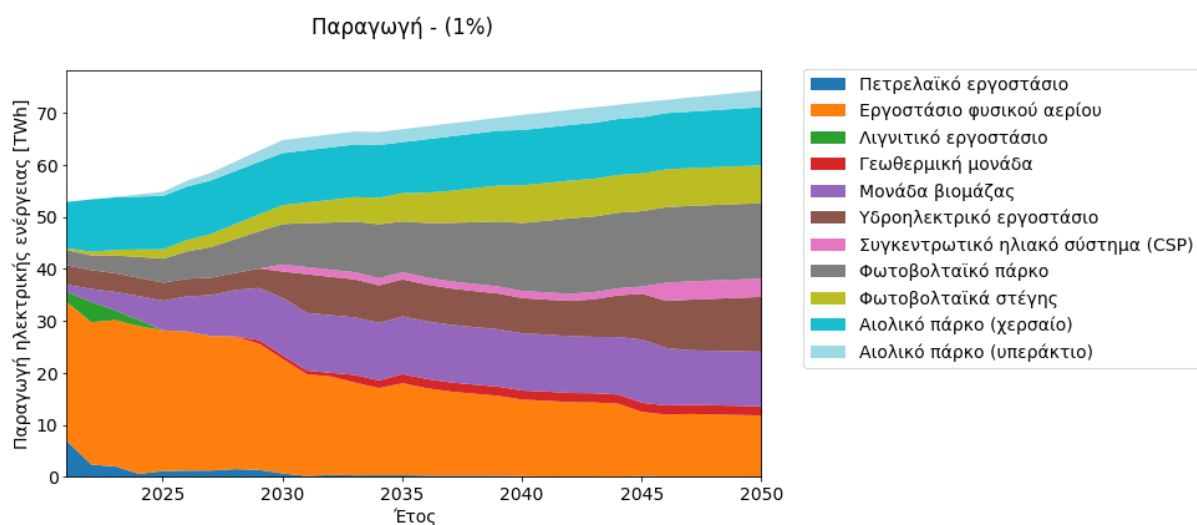
6.3.1 Μηδενική ΕΧΓ για υπερράκτια αιολικά

Στα αρχικά σενάρια που αναλύθηκαν η παράμετρος χρήσης γης για αιολικά πάρκα είχε οριστεί ως κοινή ανάμεσα στα χερσαία και τα υπερράκτια. Η ΕΧΓ των υπερράκτιων αιολικών πάρκων μπορεί να έχει πολλές ερμηνείες, ανάλογα με την προσέγγιση που χρησιμοποιείται. Στην παρούσα εργασία έγινε η παραδοχή πως η επίδραση που έχουν τόσο τα χερσαία όσο και τα υπερράκτια αιολικά πάρκα στη γη που καταλαμβάνουν είναι αντίστοιχα μεγάλη, καθώς επηρεάζουν στον ίδιο βαθμό τομείς όπως η βιοποικιλότητα της περιοχής, ενώ παράλληλα και στις δύο μορφές δεσμεύεται αντίστοιχη έκταση γης. Από την άλλη, πρέπει να αναφερθεί πως η εκτάσεις που καταλαμβάνονται για έργα στη στεριά θα μπορούσαν συχνά να έχουν εναλλακτικές χρήσης, όπως η ανέγερση άλλων υποδομών, πράγμα που δεν ισχύει για τις αντίστοιχες θαλάσσιες εκτάσεις.

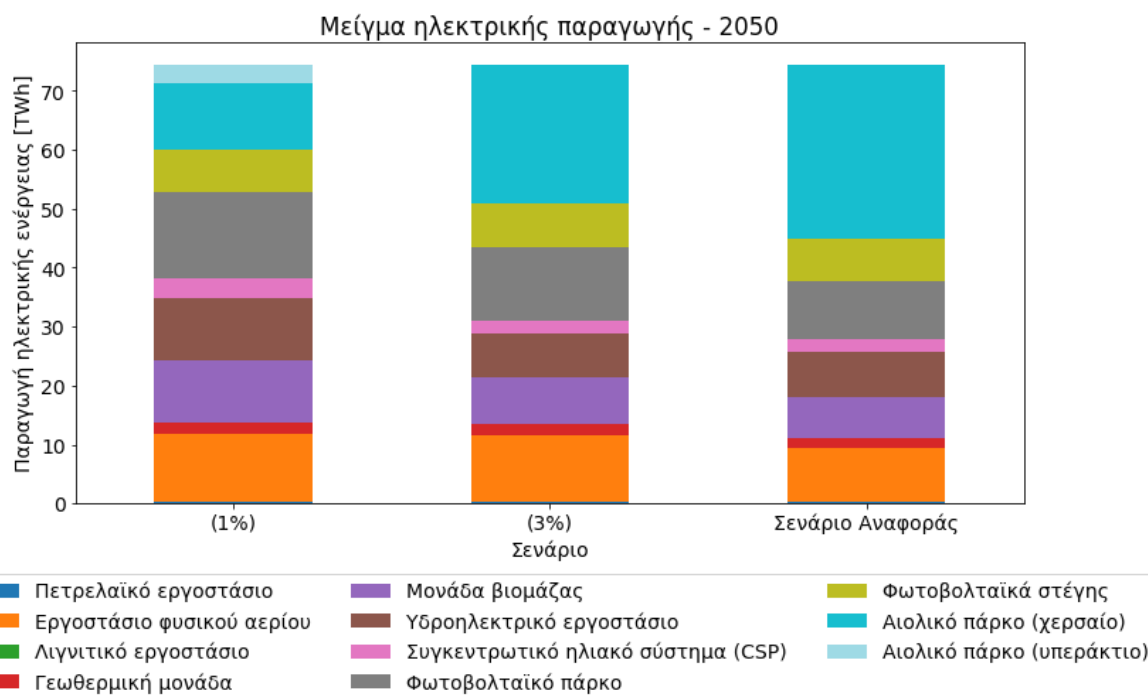
Για του παραπάνω λόγους επιλέχθηκε να γίνει εκ νέου η παραπάνω μελέτη, με μόνη διαφορά πως η παράμετρος ΙΕΧΓ έχει μηδενική τιμή για τα υπερράκτια αιολικά πάρκα. Στα διαγράμματα των εικόνων 6.16, 6.17 και 6.18 φαίνεται πως, λόγω της μηδενικής συνεισφοράς τους στη συνολική ΕΧΓ, όσο πιο φιλόδοξο γίνεται το σενάριο τόσο μεγαλύτερη συνεισφορά έχουν τα υπερράκτια αιολικά, συγκρινόμενα και με το σενάριο αναφοράς (εικόνα 6.2)



Εικόνα 6.16. Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας ανά τεχνολογία για το σενάριο περιορισμού της αύξησης της ΕΧΓ κατά 3% ανά έτος, για την περίοδο 2021-2050, με μηδενική ΕΧΓ από τα υπεράκτια αιολικά πάρκα.

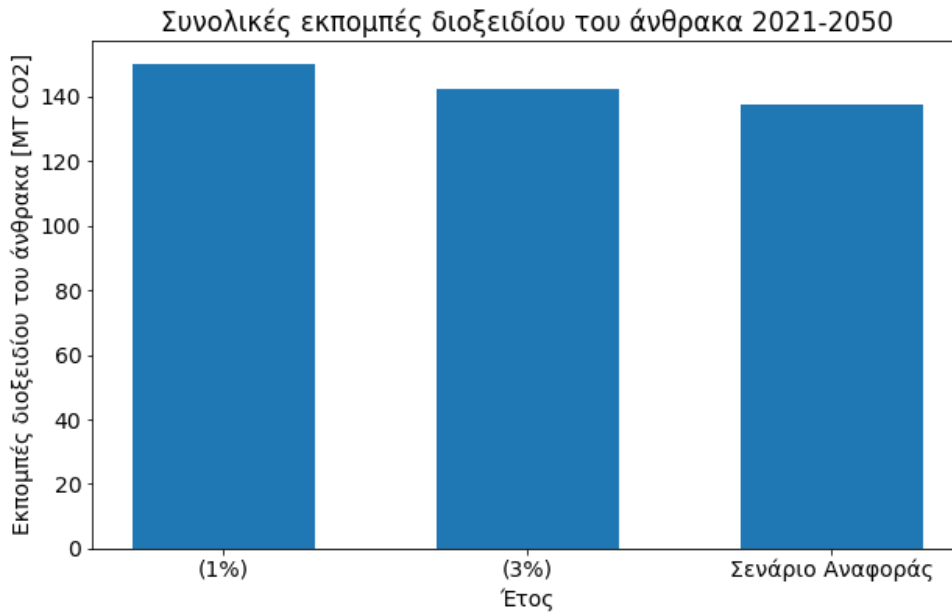


Εικόνα 6.17. Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας ανά τεχνολογία για το σενάριο περιορισμού της αύξησης της ΕΧΓ κατά 3% ανά έτος, για την περίοδο 2021-2050, με μηδενική ΕΧΓ από τα υπεράκτια αιολικά πάρκα.

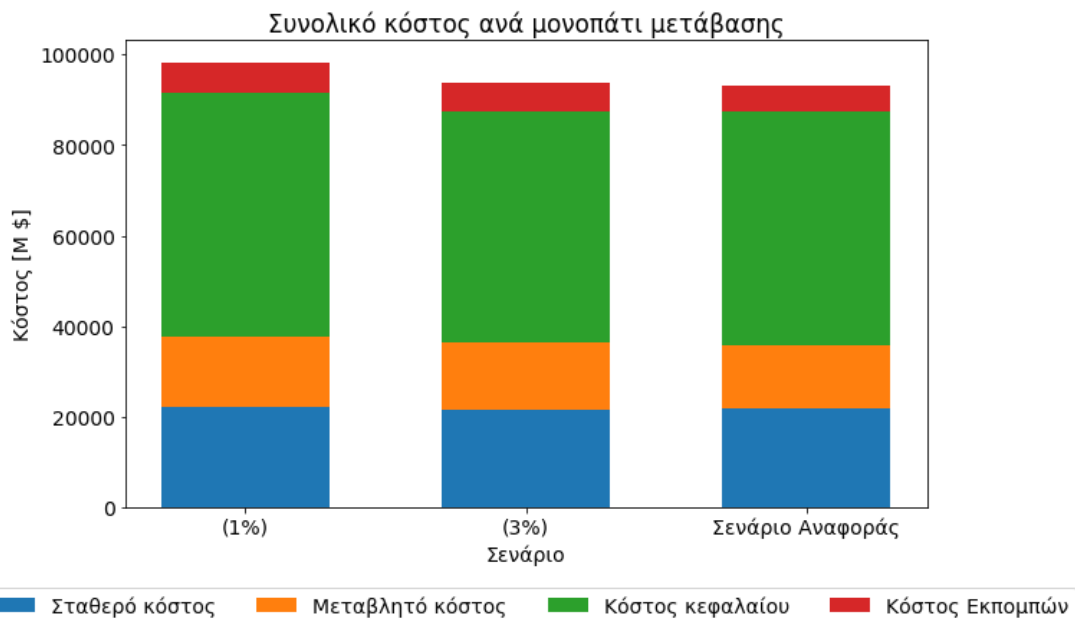


Εικόνα 6.18. Ποσότητα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας ανά εγκατεστημένη τεχνολογία του συστήματος για τα σενάρια αύξησης γης κατά 1%, 3% ανά έτος και για το σενάριο αναφοράς, για το έτος 2050, με μηδενική ΕΧΓ από τα υπεράκτια αιολικά πάρκα.

Όπως όπως φαίνεται από την εικόνα 6.19, η αύξηση της παραγωγής από ΑΠΕ στα αυστηρότερα σενάρια δεν κατάφερε να αποτρέψει την τάση αύξησης των εκπομπών που παρατηρήθηκε στην αρχική μελέτη, καθώς όσο πιο φιλόδοξο το σενάριο, τόσο υψηλότερες και οι συνολικές εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα. Σε αντίθεση όμως με τα αρχικά σενάρια, όπου το κόστος κυμαινόταν σε παρόμοια επίπεδα ανεξαρτήτως περιορισμού της ΕΧΓ, εδώ φαίνεται πως η προσθήκη “ακριβών” μονάδων ηλεκτροπαραγωγής οδηγεί σε σαφή αύξηση του κόστους επενδύσεων που πραγματοποιείται (εικόνα 6.20), καθιστώντας και υψηλότερο το συνολικό κόστος των πιο φιλόδοξων σεναρίων.



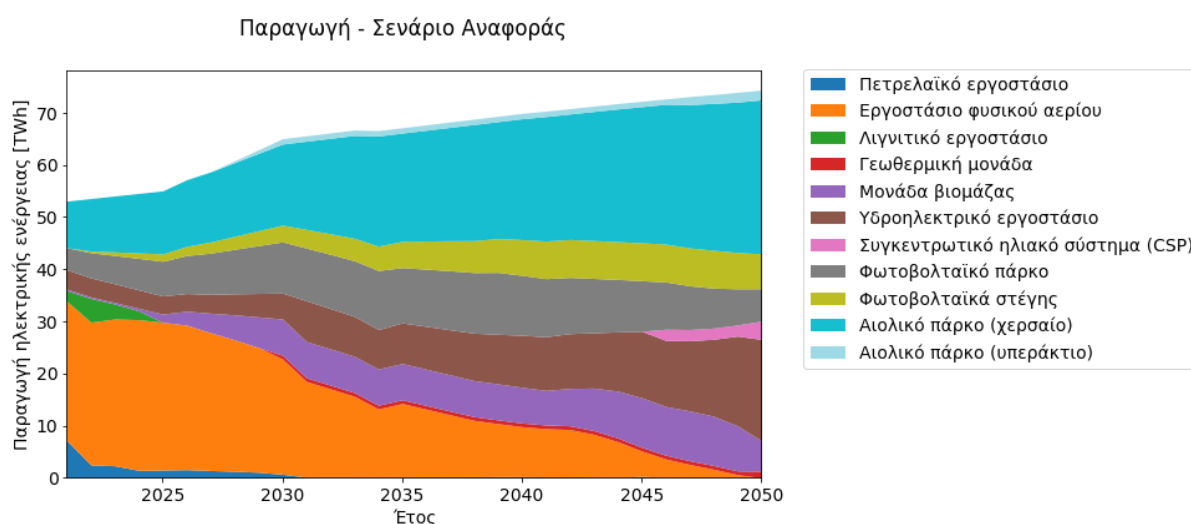
Εικόνα 6.19. Συνολικές εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα για τα σενάρια αύξησης γης κατά 1%, 3% και για το σενάριο αναφοράς, αθροιστικά για τα έτη 2021-2050, με μηδενική ΕΧΓ από τα υπεράκτια αιολικά πάρκα.



Εικόνα 6.20. Συνολικά κόστη του συστήματος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας για τα σενάρια αύξησης γης κατά 1%, 3% ανά έτος και για το σενάριο αναφοράς, αθροιστικά για τα έτη 2021-2050, με μηδενική ΕΧΓ από τα υπεράκτια αιολικά πάρκα.

6.3.2 Μηδενισμός των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα το 2050

Δεύτερο κρίσιμο σημείο που εντοπίστηκε είναι το γεγονός πως με την επιβολή αυστηρότερων περιορισμών στην ΕΧΓ, το συνολικό κόστος παραμένει σταθερό και αυξάνονται οι συνολικές εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα. Αυτό δείχνει, πως, όταν το σύστημα δεν έχει αυστηρούς στόχους ως προς τις εκπομπές διοξειδίου, επιλέγει τη λύση με το λιγότερο κόστος, ακόμα κι όταν αυτό έχει δυσμενείς περιβαλλοντικές επιπτώσεις (αύξηση εκπομπών). Για το λόγο αυτό προσαρμόστηκε το μοντέλο με την προσθήκη του στόχου μηδενισμού των εκπομπών του συστήματος το 2050. Η τροποποίηση που αναφέρεται στο κεφάλαιο 6.3.1 συνεχίζει να ισχύει και στη συγκεκριμένη εκδοχή του μοντέλου.

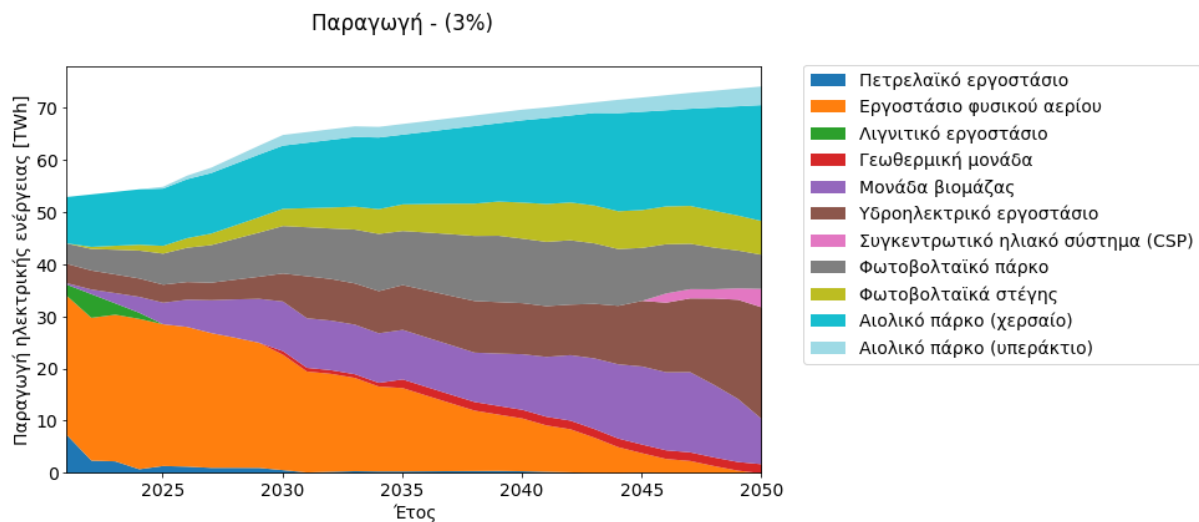


Εικόνα 6.21. Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας ανά τεχνολογία για το σενάριο αναφοράς για την περίοδο 2021-2050, με μηδενισμό των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα το 2050.

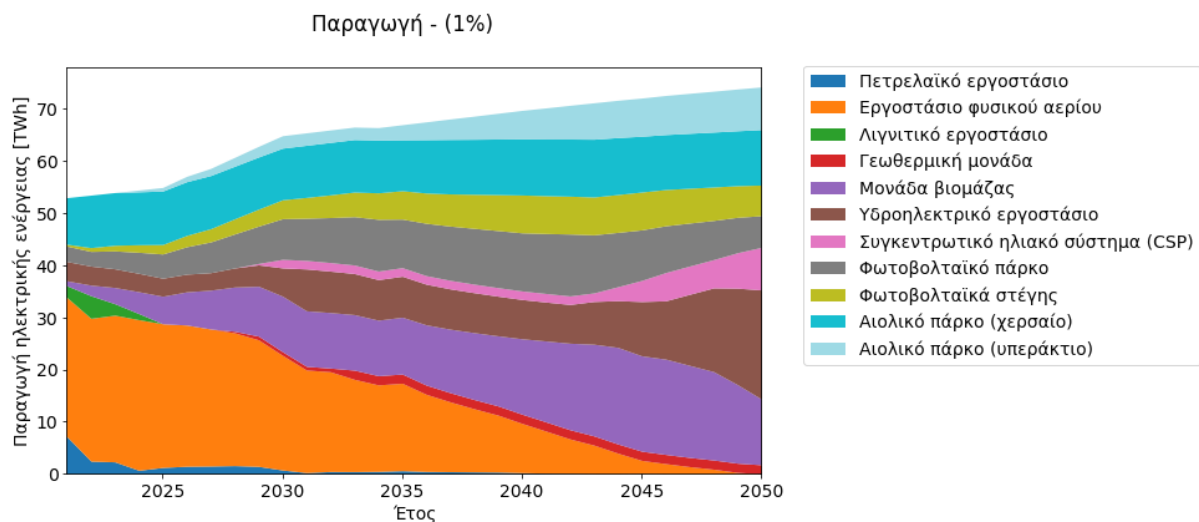
Ήδη από το σενάριο αναφοράς μπορεί να αναγνωριστεί η αισθητή διαφορά σε σχέση με την αρχική μελέτη. Στην εικόνα 6.21 φαίνεται πως μέχρι το 2050 η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από φυσικό αέριο μηδενίζεται, και αντικαθίσταται, μεταξύ άλλων, από αρκετά αυξημένη παραγωγή υδροηλεκτρικών εργοστασίων, βιομάζα, καθώς και μια μικρή ποσότητα υπεράκτιων αιολικών η οποία δεν υπήρχε στην αρχική μελέτη.

Οι συγκεκριμένες διαφορές είναι ακόμα πιο έντονες εξετάζοντας τα σενάρια περιορισμού αύξησης της ΕΧΓ κατά 1% και 3% (εικόνες 6.22, 6.23 και 6.24). Παρατηρείται σημαντική αύξηση στην παραγωγή από υδροηλεκτρικά εργοστάσια, ελαφρώς αυξημένα και τα συγκεντρωτικά ηλιακά συστήματα, ενώ αξιοσημείωτη είναι η υποχώρηση των φωτοβολταϊκών πάρκων σε σχέση με τα αρχικά σενάρια. Η πιο

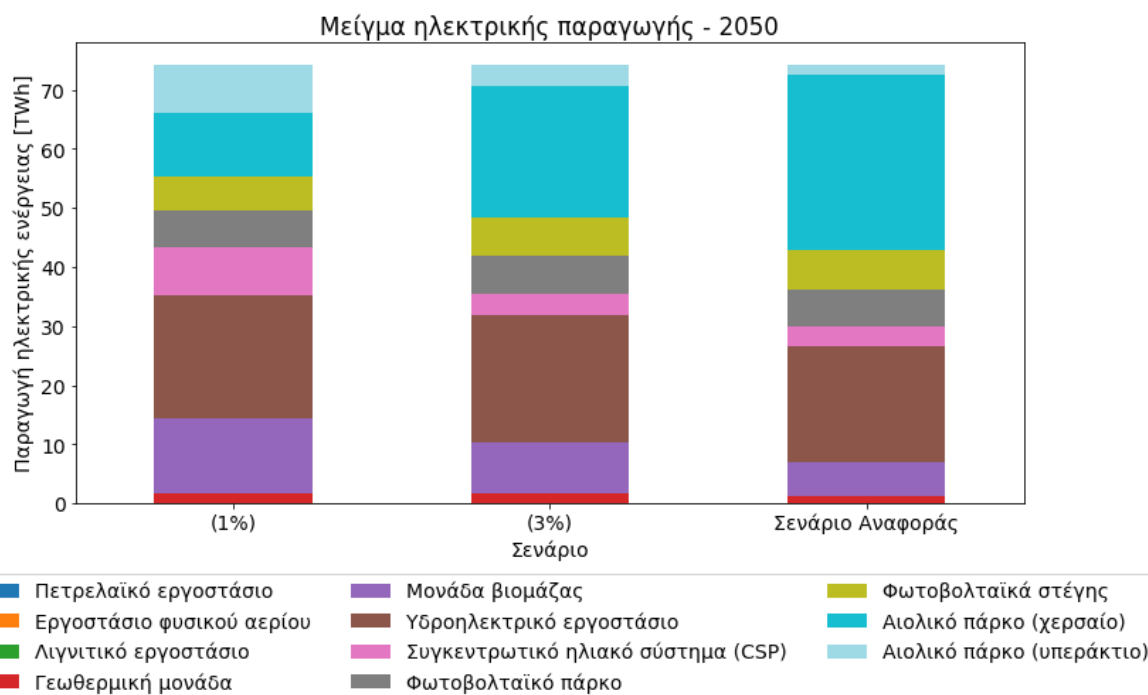
μεγάλη διαφορά όμως εντοπίζεται στη σημαντική αύξηση της παραγωγής από υπεράκτια αιολικά πάρκα, καθώς συνδυάζουν την πολύ χαμηλή (μηδενική) ΕΧΓ με τις μηδενικές εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου.



Εικόνα 6.22. Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας ανά τεχνολογία για το σενάριο 3% για την περίοδο 2021-2050, με μηδενισμό των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα το 2050.



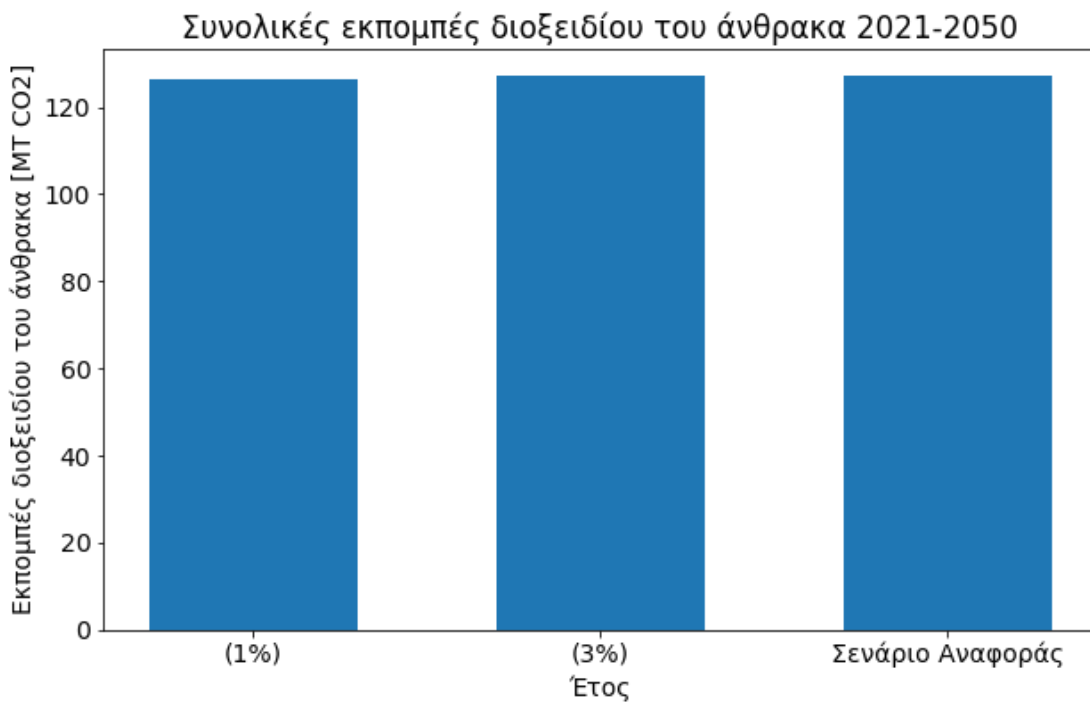
Εικόνα 6.23. Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας ανά τεχνολογία για το σενάριο 1% για την περίοδο 2021-2050, με μηδενισμό των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα το 2050.



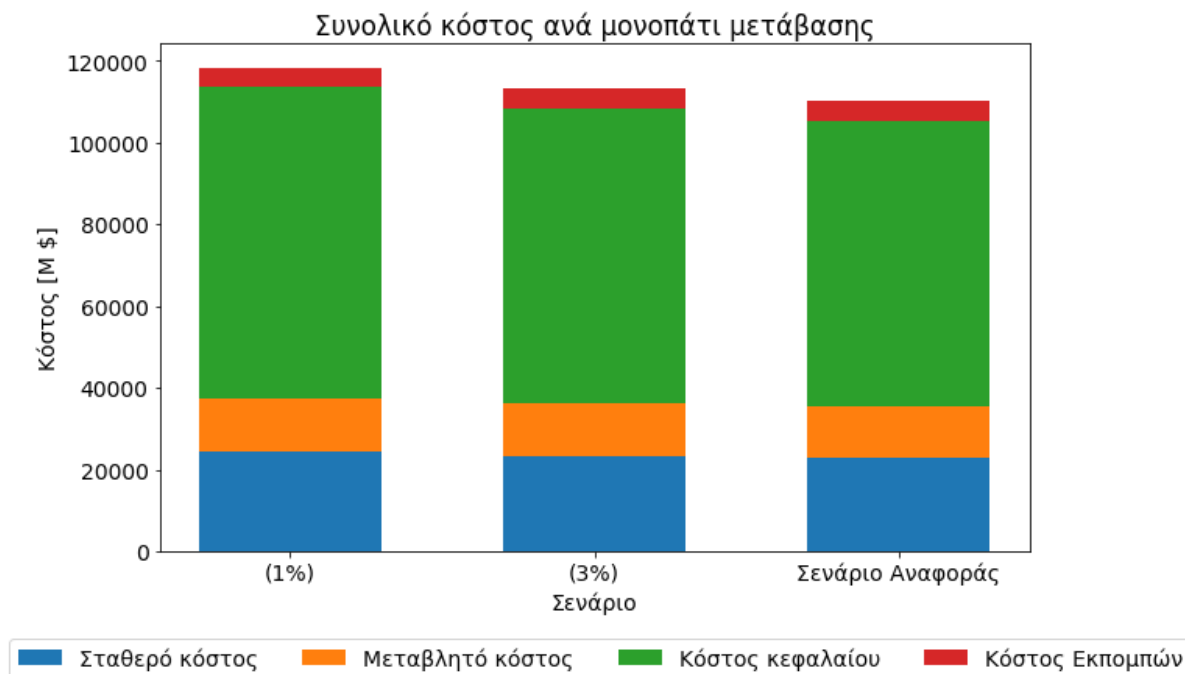
Εικόνα 6.24. Ποσότητα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας ανά εγκατεστημένη τεχνολογία του συστήματος για τα σενάρια αύξησης γης κατά 1%, 3% ανά έτος και για το σενάριο αναφοράς, για το έτος 2050, με μηδενισμό των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα το 2050.

Πολύ σημαντικά συμπεράσματα μπορούν βγουν μελετώντας τη σχέση σεναρίων περιορισμών της ΕΧΓ, εκπομπών και κόστους. Όπως φαίνεται και στο διάγραμμα της εικόνας 6.25, οι συνολικές εκπομπές σε κάθε ένα από τα τρία σενάρια είναι κατ' ουσίαν ίδιες. Σημαντικό ρόλο σε αυτό έχει διαδραματίσει πως σε κάθε σενάριο έχει προστεθεί ο φιλόδοξος στόχος της απανθρακοποίησης μέχρι το 2050. Αντίστοιχα γίνεται σαφής η σχέση ΕΧΓ και κόστους σε αυτό το μοντέλο (εικόνα 6.26), καθώς όσο πιο αυστηροί οι περιορισμοί τόσο υψηλότερο και το κόστος.

Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα με εκείνα του αρχικού μοντέλου, μπορεί κανείς να παρατηρήσει πως είναι δυνατός ο περιορισμός της επέκτασης της χρήσης γης από τεχνολογίες ηλεκτροπαραγωγής, καθώς, ενδεικτικά, στα παραπάνω σενάρια η έκταση που καταλαμβάνεται στο σενάριο αναφοράς είναι υπερδιπλάσια από αυτή του σεναρίου του 1%. Για να επιτευχθεί αυτό όμως θα πρέπει να υπάρξει σημαντική αύξηση στις εκπομπές ώστε να μείνει σταθερό το κόστος του συστήματος, ή να μην επηρεαστούν οι εκπομπές, αρκεί να δαπανηθούν τα κατάλληλα ποσά σε επενδύσεις νέων τεχνολογιών.



Εικόνα 6.25. Συνολικές εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα για τα σενάρια αύξησης γης κατά 1%, 3% και για το σενάριο αναφοράς, αθροιστικά για τα έτη 2021-2050, με μηδενισμό των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα το 2050.



Εικόνα 6.26. Συνολικά κόστη του συστήματος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας για τα σενάρια αύξησης γης κατά 1%, 3% ανά έτος και για το σενάριο αναφοράς, αθροιστικά για τα έτη 2021-2050, με μηδενισμό των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα το 2050.

Κεφάλαιο 7. Συμπεράσματα και μελλοντικές προεκτάσεις

7.1 Συμπεράσματα

Σκοπός της παρούσας εργασίας ήταν η εξέταση των αντισταθμίσεων μεταξύ της ανάπτυξης της καθαρής ηλεκτροπαραγωγής και των απαιτήσεων σε όρους χρήσης γης. Η παραπάνω ανάλυση του μοντέλου της Ελλάδας με χρήση του OSeMOSYS βοήθησε στην κατανόηση των επιπτώσεων που έχει η προσθήκη περιορισμών στη χρήση γης στο Ελληνικό σύστημα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.

Είναι σημαντικό βέβαια να λαμβάνεται πάντα υπόψιν πως η συγκεκριμένη ανάλυση έγινε βάσει πολλών υποθέσεων, και ενδεχόμενες έτερες παραμετροποιήσεις να οδηγούσαν σε ελαφρώς διαφορετικά αποτελέσματα. Αυτή όμως είναι άλλωστε και η ίδια η φύση της μοντελοποίησης συστημάτων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.

Παρά τις υποθέσεις αυτές, είναι σαφές πως η εφαρμογής περιορισμών στο επίπεδο αύξησης της χρήσης γης για ηλεκτροπαραγωγή οδηγεί είτε σε αύξηση των συνολικών εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα που απελευθερώνονται στην ατμόσφαιρα είτε σε αύξηση του κόστους που δαπανάται για το σύστημα. Αυτές είναι και οι βασικές αντισταθμίσεις που εντοπίστηκαν, καθώς δεν παρατηρήθηκε αξιόλογη μεταβολή άλλων παραμέτρων στα διαφορετικά σενάρια. Φυσικά, αντίστοιχες μελέτες που θα επικεντρώνοντας στην εφαρμογή αντίστοιχων περιορισμών έχοντας αυστηρότερα πλαίσια στα επιτρεπτά επίπεδα εκπομπών, ενδεχομένως να παρατηρούσαν με μεγαλύτερη ανάλυση και ακρίβεια τη σχέση ΕΧΓ και κόστους.

Όμως η επιλογή εφαρμογής λιγότερο φιλόδοξων σεναρίων σε σχέση με τον περιορισμό των εκπομπών διοξειδίου έρχονται σε αντιδιαστολή με κάθε κατεύθυνση που δίνεται σε επίπεδο πολιτείας αλλά και κοινωνίας, με τα περισσότερα ενδιαφερόμενα μέρη να πιέζουν για την άμεση απανθρακοποίηση του συστήματος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Συνεπώς, είναι σημαντικό να λαμβάνεται υπόψη πως ο περιορισμός της χρήσης γης είναι σημαντικός, χωρίς όμως να θυσιάζονται οι κλιματικοί στόχοι που έχουν τεθεί σε εθνικό και παγκόσμιο επίπεδο, πράγμα το οποίο θα είχε ακόμα δυσμενέστερες περιβαλλοντικές και κοινωνικές επιπτώσεις στο μέλλον.

Για την επίτευξη της πλήρους απανθρακοποίησης και της κλιματικής ουδετερότητας αναμένεται, συνεπώς, αυξημένη ανάγκη για ανάπτυξη τεχνολογιών που θα οδηγήσουν σε αύξηση της χρήσης γης, και κατά συνέπεια αναδεικνύεται ως απαραίτητη η συμπερίληψη της επίδρασης χρήσης γης ως παραμέτρου σε

αντίστοιχες μελέτες καταλληλότητας που πραγματοποιούνται. Η ενσωμάτωση της παραμέτρου της ΕΧΓ στον πυρήνα της διαδικασίας λήψης αποφάσεων για την κατασκευή νέων έργων θα διασφαλίζει πως λαμβάνεται υπόψη ένας σημαντικός ακόμη παράγοντας. Εάν δεν συμβεί κάτι τέτοιο, η άκριτη ανάπτυξη μονάδων παραγωγής με μεγάλη ανάγκη σε έκταση γης θα οδηγεί σε συχνές αντιδράσεις τοπικών κοινωνιών, οι οποίες θα καθυστερούν ή και θα ματαιώνουν τα έργα αυτά.

Ήδη στη χώρα μας την τελευταία δεκαετία, όπου η παραγωγή ενέργειας από ανεμογεννήτριες έχει αυξηθεί δραματικά, πολύ συχνά παρατηρείται δυσφορία και αντίθεση σε τέτοια έργα. Το συγκεκριμένο πρόβλημα όμως, πέρα από την καθαρή ποσοτική του προσέγγιση, θα πρέπει να προσεγγιστεί πιο σφαιρικά, καθώς ενδεχόμενες λύσεις όπως μικρότερα αιολικά πάρκα ώστε να περιορίζεται η οπτική όχληση, η συμπερίληψη των κατοίκων με τη μορφή επιδοτήσεων, τα ανταποδοτικά προγράμματα ή και η ευκαιρία συμμετοχής τους σε ενεργειακές κοινότητες θα πρέπει να εξετάζονται κατά περίπτωση. Ακόμα, είναι σημαντικό να λαμβάνεται ανατροφοδότηση από όλα τα ενδιαφερόμενα μέρη σε περιφερειακό και εθνικό επίπεδο, ώστε η επιλογή των εκτάσεων για την εγκατάσταση νέων υποδομών να έχει το δυνατόν λιγότερες επιπτώσεις στον περιβάλλοντα χώρο.

Είναι σημαντικό να αναφερθεί πως η παραπάνω ανάλυση έχει ορίσει την Επίδραση Χρήσης Γης ως την συνολική έκταση που καταλαμβάνεται για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Αυτή η προσέγγιση σαφώς “τιμωρεί” τα αιολικά πάρκα, τα οποία απαιτούν μεγάλους κενούς χώρους μεταξύ των ανεμογεννητριών. Αν η επιλογή της ΕΧΓ γινόταν μόνο με βάση το άμεσο αποτύπωμα, η επίδρασή τους θα ήταν πολύ κοντινή με τεχνολογίες όπως οι λιγνιτικές μονάδες. Αυτό φαίνεται ήδη από την πρώτη εναλλακτική μελέτη του κεφαλαίου 6.3.1, όπου αυξήθηκε σε μεγάλο βαθμό η παραγωγή από τα υπεράκτια αιολικά πάρκα λόγω της μείωσης της επίδρασης χρήσης γης που τους καταλογίστηκε.

Οι εκτάσεις γης έχουν άλλωστε πολύπλοκη φύση και δεν μπορούν να εξεταστούν μονοσήμαντα, καθώς στην περίπτωση των αιολικών ο χώρος που καταλαμβάνεται δεν είναι διαθέσιμος για συγκεκριμένες χρήσεις (π.χ. κατοικίες), αλλά είναι διαθέσιμος για άλλες (καλλιέργειες ή βοσκοτόπια). Ακόμα, κάθε τεχνολογία έχει περιορισμούς για τα μέρη στα οποία μπορεί να αναπτυχθεί: Ένα υδροηλεκτρικό φράγμα έχει συγκεκριμένα σημεία στα οποία μπορεί να δημιουργηθεί (και κατά συνέπεια να επηρεάσει τον περιβάλλοντα χώρο). Αλλά και η επίδραση που έχει η εγκατάσταση μιας τεχνολογίας σε μια περιοχή μπορεί να διαφέρει σημαντικά, καθώς με διαφορετικό τρόπο επηρεάζει τη γη στην οποία βρίσκεται ένα ηλιακό πάρκο και διαφορετικά ένα λιγνιτωρυχείο.

Η ολοένα και γρηγορότερα αυξανόμενη απαίτηση για εκτάσεις γης για την παραγωγή ενέργειας συμβαίνει ήδη, και οδηγεί σε ανταγωνισμό για την απόκτηση και την εκμετάλλευσή τους. Αυτός ο ανταγωνισμός μπορεί να οδηγεί σε συγκρούσεις όσον αφορά την προτεραιοποίηση της παγκόσμιας έναντι στην τοπική προστασία του

περιβάλλοντος ή την διατήρηση του τοπικού χαρακτήρα. Τέτοιες θα αποτελέσουν σημαντικό εμπόδιο στην αποπεράτωση τέτοιων έργων και κατά συνέπεια στην επίτευξη των εθνικών κλιματικών στόχων.

Όπως πολύ συχνά σε τέτοια ζητήματα, οι επιπτώσεις στους οικονομικά και κοινωνικά ασθενέστερους αναμένεται να είναι δυσανάλογες. Για να υπερκεραστούν τα εμπόδια αυτά είναι απαραίτητη η προσαρμογή της εθνικής και περιφερειακής ενεργειακής πολιτικής, ώστε να συμπεριλαμβάνει και την παράμετρο της χρήσης γης και να επικυρώνει μια όσο το δυνατόν δικαιότερη μετάβαση στην κλιματική ουδετερότητα.

7.2. Μελλοντικές Προεκτάσεις

Με βάση τα παραπάνω γίνεται σαφές πως θα είχε αξία μια πιο ποιοτική και πολύπλευρη μελέτη πάνω στη χρήση γης για ηλεκτροπαραγωγή, εστιάζοντας στις διαφορετικές δυνητικές χρήσεις της γης όπου καταλαμβάνουν οι τεχνολογίες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, αλλά και επικεντρώνοντας τη μελέτη της επίδρασης που έχει η χρήση γης ενδεχομένως σε συγκεκριμένους τομείς, εστιάζοντας μόνο, για παράδειγμα, στη βιοποικιλότητα ή στην εκμετάλλευση της γης.

Ακόμα, στο ίδιο πλαίσιο θα είχε νόημα η εξέταση της ΕΓΧ σε σενάρια πλήρους απανθρακοποίησης του συστήματος ηλεκτρικής παραγωγής της χώρας. Αυτό βέβαια είναι δύσκολο να πραγματοποιηθεί καθώς είναι απαραίτητη η χρήση τεχνολογιών που δεν είναι ακόμα διαθέσιμες, όπως το υδρογόνο, οι οποίες θα παρέχουν σταθερή παραγωγή για τις ώρες υψηλής ζήτησης όπου δεν μπορούν να ανταπεξέλθουν ΑΠΕ όπως τα αιολικά και τα ηλιακά πάρκα. Μια ακόμα συνισταμένη που θα πρέπει να προστεθεί είναι τεχνολογίες αποθήκευσης ενέργειας, μια πρακτική που αναμένεται να διαδραματίσει μείζονα ρόλο στην ευστάθεια των συστημάτων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.

Τέλος, θα είχε αξία να εξεταστούν μεταβλητοί ποσοστιαίοι περιορισμοί στην αύξηση χρήσης γης, καθώς θα μπορούσε ένα σενάριο με πιο χαλαρούς περιορισμούς σε μια αρχική περίοδο και αυστηρότερους στη συνέχεια να έδινε ενδιαφέροντα αποτελέσματα. Η μελέτη τέτοιων, πιο πολύπλοκων σεναρίων, θα έδινε τη δυνατότητα ανάπτυξης μοντέλων, τα οποία θα μεγιστοποιούσαν τον περιορισμό της χρήσης γης κρατώντας σταθερά τόσο το κόστος όσο και τις εκπομπές, βελτιστοποιώντας την εφαρμογή των περιορισμών. Η συγκεκριμένη υλοποίηση όμως θα ήταν δύσκολο να πραγματοποιηθεί σε γραμμικά μοντέλα όπως το OSeMOSYS, καθώς απαιτεί προσαρμογή της μεταβλητής κάθε χρόνο βάσει της τιμής του προηγούμενου έτους, πράγμα αντιφατικό στην γραμμική φύση τους.

Βιβλιογραφία

- [1] The Intergovernmental Panel on Climate Change, AR6 Climate Change 2021: The Physical Science Basis <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/>
- [2] European Commission, 2050 long-term strategy https://ec.europa.eu/clima/eu-action/climate-strategies-targets/2050-long-term-strategy_en
- [3] UNEP/MAP. (2016). Background document to the Regional Climate Change Adaptation Framework, UNEP(DEPI)/MED IG.22.
- [4] EIB. (2008). Study on Climate Change and Energy in the Mediterranean.
- [5] Comparing the Ecological Impacts of Wind and Oil & Gas Development: A Landscape Scale Assessment <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0081391>
- [6] de Lucas, Manuela, Guyonne FE Janss, and Miguel Ferrer. "Birds and wind farms." *Quercus, Madrid* (2007).
- [7] Opposing Wind Energy Landscapes: A Search for Common Cause <https://doi.org/10.1080/00045608.2011.568879>
- [8] Fast, S., & Mabee, W. (2015). Place-making and trust-building: The influence of policy on host community responses to wind farms. *Energy Policy*, 81, 27–37. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2015.02.008>
- [9] Re-focussing research efforts on the public acceptance of energy infrastructure: A critical review <https://doi.org/10.1016/j.energy.2013.12.056>
- [10] Energy Modelling Platform for Europe, <https://www.energymodellingplatform.eu/>
- [11] The Open Energy Modelling Initiative, <https://openmod-initiative.org/>
- [12] PRIMES – E3 Modelling, <https://e3modelling.com/modelling-tools/primes/>
- [13] Capros, P., et al. "European Energy and CO 2 Emissions Trends to 2020: PRIMES model v. 2." *Bulletin of Science, Technology & Society* 19.6 (1999): 474-492.
- [14] E3MLab, <http://www.e3mlab.eu/e3mlab/>
- [15] European Commission, Modelling tools for EU analysis, https://ec.europa.eu/clima/eu-action/climate-strategies-targets/economic-analysis/modelling-tools-eu-analysis_en
- [16] Capros, Pantelis, et al. "Outlook of the EU energy system up to 2050: The case of scenarios prepared for European Commission's "clean energy for all Europeans" package using the PRIMES model." *Energy strategy reviews* 22 (2018): 255-263.

- [17] Siskos, Pelopidas, et al. "Implications of delaying transport decarbonisation in the EU: A systems analysis using the PRIMES model." *Energy Policy* 121 (2018): 48-60.
- [18] PRIMES – E3 Modelling, <https://e3modelling.com/modelling-tools/primes/>
- [19] IEA-ETSAP | Times, <https://iea-etsap.org/index.php/etsap-tools/model-generators/times>
- [20] Nijs, W. and Ruiz Castello, P., The JRC European TIMES Energy System Model, European Commission, 2019, JRC117820.
- [21] Giannakidis, George, et al. "Informing energy and climate policies using energy systems models." Springer International Publishing, Switzerland. doi 10.1007 (2015): 978-3.
- [22] IEA-ETSAP | Times, <https://iea-etsap.org/index.php/etsap-tools/model-generators/times>
- [23] Pyomo · GitHub, <https://github.com/Pyomo>
- [24] Brown, Tom, Jonas Hörsch, and David Schlachtberger. "PyPSA: Python for power system analysis." arXiv preprint arXiv:1707.09913 (2017).
- [25] Hörsch, Jonas, et al. "PyPSA-Eur: An open optimisation model of the European transmission system." *Energy Strategy Reviews* 22 (2018): 207-215.
- [26] Schlott, Markus, et al. "PyPSA-VN: An open model of the Vietnamese electricity system." 2020 5th International Conference on Green Technology and Sustainable Development (GTSD). IEEE, 2020.
- [27] PyPSA: Python for Power System Analysis · GitHub, <https://github.com/PyPSA/pypsa>
- [28] Hunter, Kevin, Sarat Sreepathi, and Joseph F. DeCarolis. "Modeling for insight using tools for energy model optimization and analysis (Temoa)." *Energy Economics* 40 (2013): 339-349.
- [29] TemoaProject/temoa: Tools for Energy Model Optimization and Analysis · GitHub, <https://github.com/TemoaProject/temoa>
- [30] Howells, Mark, et al. "OSeMOSYS: the open source energy modeling system: an introduction to its ethos, structure and development." *Energy Policy* 39.10 (2011): 5850-5870.

[31] Howells, Mark, et al. "OSeMOSYS: the open source energy modeling system: an introduction to its ethos, structure and development." *Energy Policy* 39.10 (2011): 5850-5870.

[32] Welsch, Manuel, et al. "Modelling elements of smart grids—enhancing the OSeMOSYS (open source energy modelling system) code." *Energy* 46.1 (2012): 337-350.

[33] Howells, Mark, et al. "OSeMOSYS: the open source energy modeling system: an introduction to its ethos, structure and development." *Energy Policy* 39.10 (2011): 5850-5870.

[34] How to contribute to the development of the tool — OSeMOSYS 0.0.1 documentation,

<https://osemosys.readthedocs.io/en/latest/manual/How%20to%20contribute%20to%20the%20development%20of%20the%20tool.html>

[35] Oberle, Stella, and Rainer Elstrand. "Are open access models able to assess today's energy scenarios?." *Energy Strategy Reviews* 26 (2019): 100396.

[36] Oberle, Stella, and Rainer Elstrand. "Are open access models able to assess today's energy scenarios?." *Energy Strategy Reviews* 26 (2019): 100396.

[37] Ευρωπαϊκή Επιτροπή, Μια νέα στρατηγική της ΕΕ για την προσαρμογή στην κλιματική αλλαγή, https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/el/ip_21_663

[38] Ευρωπαϊκή Επιτροπή, Μια Ευρωπαϊκή Πράσινη Συμφωνία, https://ec.europa.eu/info/strategy/priorities-2019-2024/european-green-deal_e |

[39] Υπουργείο Ενέργειας και Περιβάλλοντος, Προσαρμογή στην Κλιματική Αλλαγή <https://ypen.gov.gr/perivallon/klimatiki-allagi/prosarmogi-stin-klimatiki-allagi/>

[40] Η Καθημερινή, Έως το 2023 θα κλείσουν όλες οι εν λειτουργία λιγνιτικές μονάδες <https://www.kathimerini.gr/economy/business/1056209/eos-to-2023-tha-kleisoyn-oles-oi-en-leitoyrgia-lignitikes-monades/>

[41] Ong, Sean, Clinton Campbell, and Garvin Heath. "Land use for wind, solar, and geothermal electricity generation facilities in the united states." *A report from the National Renewable Energy Laboratory to the Electric Power Research Institute, National Renewable Energy Laboratory* (2012).

[42] Trainor, Anne M., Robert I. McDonald, and Joseph Fargione. "Energy sprawl is the largest driver of land use change in United States." *PloS one* 11.9 (2016): e0162269.

[43] Hertwich, E., et al. "Green Energy Choices: The benefits, risks, and trade-offs of low-carbon technologies for electricity production." (2016).

[44] Denholm, Paul, et al. Land use requirements of modern wind power plants in the United States. No. NREL/TP-6A2-45834. National Renewable Energy Lab.(NREL), Golden, CO (United States), 2009.

[45] Ek, Kristina, and Lars Persson. "Wind farms—Where and how to place them? A choice experiment approach to measure consumer preferences for characteristics of wind farm establishments in Sweden." *Ecological economics* 105 (2014): 193-203.

[46] Kontogianni, Areti, et al. "Planning globally, protesting locally: Patterns in community perceptions towards the installation of wind farms." *Renewable Energy* 66 (2014): 170-177.

[47] Pasqualetti, Martin J. "Opposing wind energy landscapes: a search for common cause." *The New Geographies of Energy*. Routledge, 2013. 218-228.

[48] Koutsandreas, D.; Pappis, I.; Trachanas, G.; Nikas, A.; Doukas, H. (2021). Accelerating the transformation of the Greek energy system through green hydrogen's penetration in the energy mix: A multicriteria-based power generation schedule. 6th Hellenic Association for Energy Economics Energy Transition Symposium: "Looking Ahead with Optimism, Beyond the Covid Era", 28 September-1 October, 2021, Athens, Greece. 10.13140/RG.2.2.16927.23204

[49] Koutsandreas, D.; Trachanas, G.; Pappis, I.; Nikas, A.; Doukas, H.; Psarras, J. (2022). A multicriteria modeling approach for evaluating power generation scenarios under uncertainty: The case of green hydrogen in Greece. *Energy Strategy Reviews* (Σε διαδικασία κρίσης)

[50] Palmer-Wilson, Kevin, et al. "Impact of land requirements on electricity system decarbonisation pathways." *Energy policy* 129 (2019): 193-205.