



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΙΡΑΙΩΣ
ΤΜΗΜΑ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ
ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ

ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΥΚΛΟΥ ΖΩΗΣ (ΑΚΖ)

ΤΟΥ ΕΛΛΗΝΙΚΟΥ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ

ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

από

ΤΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΙΡΑΙΩΣ

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΟΡΦΑΝΟΣ ΝΕΟΠΤΟΛΕΜΟΣ

ΤΜΗΜΑ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ, ΠΕΙΡΑΙΑΣ 2016

ΔΗΛΩΣΗ

«Η εργασία αυτή είναι πρωτότυπη και εκπονήθηκε αποκλειστικά και μόνο για την απόκτηση του συγκεκριμένου μεταπτυχιακού τίτλου».

«Τα πνευματικά δικαιώματα χρησιμοποίησης του μη πρωτότυπου υλικού ΜΔΕ ανήκουν στο μεταπτυχιακό φοιτητή και το επιβλέπων μέλος ΔΕΠ εις ολόκληρο, δηλαδή εκάτερος μπορεί να κάνει χρήση αυτών χωρίς τη συναίνεση του άλλου. Κατ'εξάιρεση, επιτρέπεται η δημοσίευση του πρωτότυπου μέρους της διπλωματικής εργασίας σε επιστημονικό περιοδικό ή πρακτικά συνεδρίου από τον έναν εκ των δύο, με την προϋπόθεση ότι αναφέρονται τα ονόματα και των δύο (ή των τριών σε περίπτωση συνεπιβλέποντα) ως συν-συγγραφέων. Στην περίπτωση αυτή προηγείται γραπτή ενημέρωση του μη συμμετέχοντα στη συγγραφή του επιστημονικού άρθρου. Δεν επιτρέπεται η κατά οποιοδήποτε τρόπο δημοσιοποίηση υλικού το οποίο έχει δηλωθεί εγγράφως ως απόρρητο».

Μεταπτυχιακός φοιτητής

Ορφανός Νεοπτόλεμος

.....

ΥΠΟΓΡΑΦΗ

Επιβλέπων καθηγητής

Δεδούσης Βασίλειος

.....

ΥΠΟΓΡΑΦΗ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα εργασία παρουσιάζεται μια Ανάλυση Κύκλου Ζωής (ΑΚΖ), με την οποία γίνεται προσπάθεια για μια ποιοτική και ποσοτική καταγραφή των αρνητικών περιβαλλοντικών επιπτώσεων κατά την παραγωγή και μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας στην Ελλάδα. Για την ολοκλήρωση της ΑΚΖ χρειάστηκε να γίνει μοντελοποίηση των δικτύων παραγωγής και μεταφοράς, συλλογή των αντίστοιχων στοιχείων για τις ποσότητες των υλικών και ενέργειας που καταναλώνονται στα στάδια του κύκλου ζωής τους, αξιολόγηση των αποτελεσμάτων της μεθόδου και ερμηνεία των ενδεχόμενων αρνητικών επιπτώσεων, που απορρέουν απ'το ελληνικό ηλεκτρικό δίκτυο. Η υπερθέρμανση του πλανήτη (GWP), για την οποία ευθύνονται οι εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου (GHG), χρησιμοποιήθηκε ως ο βασικός δείκτης περιβαλλοντικής αξιολόγησης των δύο δικτύων. Από την ανάλυση προκύπτει ότι για την ετήσια παραγωγή και μεταφορά περίπου 55 TWh ηλεκτρικής ενέργειας, χρειάζεται να απελευθερωθούν στην ατμόσφαιρα, από όλες τις διεργασίες συνολικά, 47.300.00 τόνοι CO₂, ενώ δαπανήθηκε απ'όλο τον κύκλο ζωής των δικτύων, ενέργεια της τάξης των 796.800 TJ (LHV). Η πιο ρυπογόνος τεχνολογία στο ενεργειακό μίγμα της Ελλάδας είναι οι λιγνιτικές μονάδες ηλεκτροπαραγωγής ενώ οι σταθμοί παραγωγής ενέργειας με χρήση πετρελαίου είναι η αμέσως επόμενη. Οι μονάδες φυσικού αερίου έρχονται στην τρίτη θέση, ενώ από τις ΑΠΕ οι μονάδες βιομάζας έχουν το υψηλότερο σκορ ως προς τις εκπομπές. Ακολουθούν τα φωτοβολταϊκά, με διπλάσιες σχεδόν εκπομπές από τις Α/Γ. Για λόγους πληρότητας και ελέγχου των αποτελεσμάτων, έγινε σύγκριση με αντίστοιχες εργασίες που έχουν γίνει για άλλες χώρες. Τα συγκριτικά αποτελέσματα δείχνουν πως η Ελλάδα έχει πιο ρυπογόνο ενεργειακό τομέα από τις άλλες χώρες. Τέλος, γίνονται προτάσεις για τη βελτίωση των περιβαλλοντικών επιδόσεων οι οποίες θα μπορούσαν να αποτελέσουν μελλοντικές έρευνες ΑΚΖ. Όπως για παράδειγμα η

περαιτέρω διεύρυνση των ΑΠΕ στο δίκτυο παραγωγής αλλά και η ενδεχόμενη σύνδεση των νησιών με το Διασυνδεδεμένο δίκτυο μεταφοράς.

ABSTRACT

This paper presents a Life Cycle Assessment (LCA) and an effort for a qualitative and quantitative inventory of negative environmental impacts during the production and transportation of electricity in Greece. In order to complete the LCA, had to model the production networks and transportation of electricity, to collect data for the quantity of materials and energy that consumed in every step of the life cycle, to evaluate the method's results and to make an interpretation of possible negative impact that caused by the Greek electricity grid. Global Warning Potential (GWP), which is responsible for GreenHouse Gases (GHG) emissions, used as the main indicator for the environmental impact assessment for both networks. According to the analysis, the annual production and transportation almost 55 TWh of electricity, spends energy about 796.800 TJ (LHV) and releases into the atmosphere about 47.300.000 tons of CO₂, for the total life cycle. The most polluting technology in the Greek energy mix is lignite power plants and followed by the oil power plants. At the third place are the units of natural gas. On the other hand for the RES, units of biomass have the highest score of emissions followed by photovoltaic and wind turbines. For validation and verification of the result, papers and researches from other countries have been used to compare the LCA results. Conclusively, Greece has the most polluting energy mix than other countries. Finally, there are some proposals to improve the environmental performance of the two networks, which can be used as an element for further research. Penetration of RES in production network and connection of the islands with a transportation network are some examples.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Στο σημείο αυτό θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Καθηγητή του ΤΜΗΜΑΤΟΣ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ του ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟΥ ΠΕΙΡΑΙΑ, επιβλέποντα καθηγητή της διπλωματικής εργασίας κύριο Βασίλειο Δεδούση, για τη συνεργασία μας και την ευκαιρία που μου έδωσε να ασχοληθώ με ένα τόσο ενδιαφέρον θέμα.

Ευχαριστώ θερμά την υποψήφια Διδάκτωρ, κυρία Σαγάνη Αγγελική για την βοήθεια που μου παρείχε στην εκπόνηση της διπλωματικής μου εργασίας. Οι γνώσεις της στο λογισμικό πρόγραμμα SimaPro, ήταν πολύτιμες για την ολοκλήρωση των υπολογιστικών παραμέτρων της εργασίας.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω για τη συμβολή τους και το χρόνο που αφιέρωσαν στην επεξήγηση όλων των στοιχείων που μου παρείχαν, τους παρακάτω μηχανικούς από τη ΔΙΕΥΘΥΝΣΗ ΝΕΩΝ ΈΡΓΩΝ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ, κυρίους: Αθανασιάδη, Καλαφάτη, Μελισσάρη και Στρούζα.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Table of Contents

ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	3
ABSTRACT	4
ΓΛΩΣΣΑΡΙΟ	8
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 – ΕΙΣΑΓΩΓΗ	9
1.1. Σκοπός της εργασίας.....	9
1.2. Εργαλεία για εκτίμηση περιβαλλοντικών επιπτώσεων	10
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 – ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ ΜΕΛΕΤΩΝ ΑΚΖ.....	12
2.1. ΑΚΖ για μονάδες παραγωγής Ηλεκτρικής Ενέργειας (Η.Ε.)	12
2.1.1. Μονάδες με συμβατικά καύσιμα	16
2.1.2. Μονάδες Α.Π.Ε.....	22
2.2. ΑΚΖ για το ηλεκτρικό δίκτυο μιας χώρας.....	26
2.3. Συμπεράσματα βιβλιογραφικής ανασκόπησης	30
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 – ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΥΚΛΟΥ ΖΩΗΣ (ΑΚΖ).....	33
3.1. Μεθοδολογία Ανάλυσης Κύκλου Ζωής	33
3.1.1. Καθορισμός σκοπού και στόχου εργασίας.....	35
3.1.2. Απογραφή κύκλου ζωής.....	36
3.1.3. Εκτίμηση επιπτώσεων κύκλου ζωής.....	37
3.1.4. Ερμηνεία αποτελεσμάτων	38
3.2. Υπολογιστικά εργαλεία για ΑΚΖ.....	39

3.2.1. SimaPro 7.1.....	39
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 – ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ.....	41
4.1. Επιχειρηματική δομή και οργάνωση ελληνικού συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας.....	41
4.2. Περιγραφή μονάδων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.....	43
4.2.1. Διασυνδεδεμένο δίκτυο (Ηπειρωτικό)	45
4.2.2. Μη Διασυνδεδεμένα Νησιά (ΜΔΝ).....	49
4.3. Περιγραφή συστήματος μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας	50
4.3.1. Γραμμές μεταφοράς υψηλής τάσης 150 kV	53
4.3.2. Γραμμές μεταφοράς υπερ-υψηλής τάσης 400 kV	54
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 – ΜΕΛΕΤΗ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗΣ ΑΚΖ ΕΛΛΗΝΙΚΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ.....	55
5.1. Μοντελοποίηση συστήματος παραγωγής και μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας	55
5.2. Καταγραφή διεργασιών παραγωγής και μεταφοράς Η.Ε. και είσοδος δεδομένων στο υπολογιστικό περιβάλλον του SimaPro 7.1	60
5.3. Αποτελέσματα ΑΚΖ και εκτίμηση επιπτώσεων από εκπομπές GHG του ελληνικού ηλεκτρικού δικτύου	68
5.4. Ερμηνεία αποτελεσμάτων ΑΚΖ και Περιβαλλοντική αξιολόγηση.....	72
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 – ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΜΕ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟ ΔΙΚΤΥΟ ΚΑΙ ΑΛΛΩΝ ΧΩΡΩΝ.....	81
6.1. Εκπομπές GHG από το ηλεκτρικό δίκτυο άλλων χωρών.....	81
6.2. Σύγκριση εκπομπών GHG με το ελληνικό ηλεκτρικό δίκτυο	83

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7 – ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	88
7.1. Συγκεντρωτικά αποτελέσματα	88
7.2. Προτάσεις βελτίωσης περιβαλλοντικής απόδοσης	90
7.3. Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα	91
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	93

ΓΛΩΣΣΑΡΙΟ

ΑΚΡΩΝΥΜΙΑ	ΕΠΕΞΗΓΗΣΕΙΣ
AC	ACIDIFICATION
CHP	COMBINED HEAT AND POWER
CO ₂	CARBON DIOXIDE
EUT	EUTROPHICATION
GHG	GREEN HOUSE GAS
gr	GRAMMARS
GWP	GREEN WARMING POTENTIAL
kWh	KILOWATT HOUR
NO _x	NITROGEN OXIDE
OD	OZONE DEPLETION
PV	PHOTOVOLTAIC
SO ₂	SULFUS DIOXIDE
TJ	TERA JOULE
A/Γ	ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ
Α.Δ.Μ.Η.Ε	ΑΝΕΞΑΡΤΗΤΟΣ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΤΗΣ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ
Γ.Μ.	ΓΡΑΜΜΕΣ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ
Δ.Ε.Δ.Δ.Η.Ε.	ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΤΗΣ ΕΛΛΗΝΙΚΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ ΔΙΑΝΟΜΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ
Δ.Ε.Η.	ΔΗΜΟΣΙΑ ΕΠΙΧΕΙΡΗΣΗ ΗΛΕΚΤΡΙΣΜΟΥ
Η.Ε.	ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ
Λ.ΑΓ.Η.Ε.	ΛΕΙΤΟΥΡΓΟΣ ΑΓΟΡΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ
ΜΔΝ	ΜΗ ΔΙΑΣΥΝΔΕΔΕΜΕΝΑ ΝΗΣΙΑ
ΜΥΗΣ	ΜΙΚΡΟΙ ΥΔΡΗΛΕΚΤΡΙΚΟΙ ΣΤΑΘΜΟΙ
Ρ.Α.Ε	ΡΥΘΜΙΣΤΙΚΗ ΑΡΧΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ
Υ/Η	ΥΔΡΗΛΕΚΤΡΙΚΑ
Φ/Β	ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 – ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στο κεφαλαίο αυτό παρουσιάζεται ο σκοπός και ο στόχος της εκπόνησης μιας έρευνας για την περιβαλλοντική αξιολόγηση, των δύο δικτύων της Ελλάδας, της παραγωγής και μεταφοράς της ηλεκτρικής ενέργειας. Περιγράφεται η δομή και η μεθοδολογία αντιμετώπισης του θέματος καθώς και τα διαθέσιμα εργαλεία για την εκτίμηση των επιπτώσεων στον άνθρωπο και το περιβάλλον.

1.1. Σκοπός της εργασίας

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι αφενός η καταγραφή του συστήματος παραγωγής και μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας της Ελλάδας, και αφετέρου η εκτίμηση των αρνητικών περιβαλλοντικών επιπτώσεων καθ' όλο τον κύκλο ζωής του συστήματος. Παράλληλα, η εργασία αποσκοπεί στην περιβαλλοντική αξιολόγηση των τεχνολογιών ηλεκτροπαραγωγής (συμβατικών και ΑΠΕ) της χώρας. Για να επιτευχθεί αυτό, είναι απαραίτητη η συλλογή και η ανάλυση διάφορων αριθμητικών δεδομένων για την εξαγωγή ποσοτικών και ποιοτικών αποτελεσμάτων ως προς τις εκπομπές CO_{2eq}. Επομένως, ο απώτερος στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η καταγραφή των εκπομπών των αερίων του θερμοκηπίου (Greenhouse Gases, GHG) από το ελληνικό ηλεκτρικό ενεργειακό σύστημα και η εξαγωγή ποιοτικών και ποσοτικών αποτελεσμάτων για την αξιολόγηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων του συστήματος.

Η έρευνα για την εκπόνηση της εργασίας παρουσιάζει πρωτοτυπία, στηρίζεται σε αξιόπιστα ποσοτικά δεδομένα, οδηγεί σε ενδιαφέροντα συμπεράσματα και δημιουργεί προϋποθέσεις μελλοντικής έρευνας στην ανάλυση ηλεκτρικών ενεργειακών συστημάτων. Για το λόγο αυτό, στα Κεφάλαια που ακολουθούν παρουσιάζεται η προσπάθεια μοντελοποίησης των δικτύων παραγωγής και μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας, συλλογής των αντίστοιχων δεδομένων για τις ποσότητες υλικών και

ενέργειας που καταναλώνονται στα στάδια του κύκλου ζωής τους, και τέλος, αξιολόγηση των αποτελεσμάτων της μεθόδου με βάση τη βιβλιογραφική ανασκόπηση αντίστοιχων μελετών. Η ερμηνεία που δίνεται στις διάφορες κατηγορίες περιβαλλοντικής αξιολόγησης και των ενδεχόμενων αρνητικών επιπτώσεων, βασίζεται σε αντίστοιχα εργαλεία εκτίμησης περιβαλλοντικών επιπτώσεων.

1.2. Εργαλεία για εκτίμηση περιβαλλοντικών επιπτώσεων

Η Ανάλυση Κύκλου Ζωής (AKZ) ή Life Cycle Assessment (LCA) είναι ένα μεθοδολογικό εργαλείο που βοηθάει στη λήψη αποφάσεων. Πρόκειται για μία τεχνική αποτίμησης των περιβαλλοντικών επιπτώσεων που σχετίζονται με κάποιο/α προϊόν, υπηρεσία ή διεργασία και γενικότερα οποιονδήποτε περιβαλλοντικό μηχανισμό. Με την AKZ προσδιορίζεται η φύση της διεργασίας και ποσοτικοποιείται, καθώς και τα συστατικά που χρησιμοποιούνται κατά την παραγωγή, διάθεση, χρήση και την τελική απόρριψη στο περιβάλλον. Σκοπός της AKZ είναι η διερεύνηση της αποτελεσματικότητας των μεθόδων περιορισμού των περιβαλλοντικών επιβαρύνσεων παράλληλα με την ορθολογικότερη χρήση των πρωτογενών πηγών ενέργειας και πρώτων υλών που χρησιμοποιούνται στις εκάστοτε διεργασίες. Το αρχικό στάδιο του κύκλου ζωής που μελετάται σε μια AKZ, είναι η εξαγωγή και η επεξεργασία των πρώτων υλών. Στη συνέχεια, μελετάται η φάση της κατασκευής των υλικών/προϊόντων, της συσκευασίας και τυποποίησής τους. Ακολουθεί η μελέτη του τρόπου μεταφοράς και διανομής στους χώρους κατανάλωσης ενώ τέλος μελετάται η χρήση, η επαναχρησιμοποίηση και η συντήρησή τους. Η ανακύκλωση σε συνδυασμό με την ανάκτηση των αποβλήτων τους είναι το ζήτημα που θα διερευνηθεί αμέσως μετά και τέλος η διαδικασία της τελικής διάθεσης/απόρριψης του προϊόντος [47].

Στο σημείο αυτό αναφέρεται ότι η μέθοδος χαρακτηρισμού των επιπτώσεων (Damage Assessment Method) που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία είναι η CML 2

Baseline 2000. Τα δεδομένα που λαμβάνει υπόψη ο συγκεκριμένος περιβαλλοντικός δείκτης αξιολόγησης είναι μία βασική τιμή (baseline) που στηρίζεται στην αρχή των βέλτιστων διαθέσιμων πρακτικών, για κάθε κατηγορία επιπτώσεων. Οι βασικοί αυτοί δείκτες αντιπροσωπεύουν τις εκπομπές από τις εκάστοτε διεργασίες, σε έδαφος, νερό και αέρα. Σύμφωνα με τη μεθοδολογία αυτή, οι εξεταζόμενες περιβαλλοντικές επιπτώσεις διακρίνονται στις παρακάτω κατηγορίες/δείκτες [35]:

- Καταστροφή της στοιβάδας του όζοντος (Ozone layer depletion, ODP)
- Τοξικότητα στον άνθρωπο (Human toxicity)
- Υδάτινη οικοτοξικότητα (Fresh water aquatic ecotoxicity)
- Θαλάσσια οικοτοξικότητα (Marine aquatic ecotoxicity)
- Οικοτοξικότητα εδαφών (Terrestrial ecotoxicity)
- Φωτοχημική οξείδωση (Photochemical oxidation)
- Υπερθέρμανση του πλανήτη (Global warming, GWP100)
- Οξίνιση (Acidification)
- Εξάντληση αβιοτικών οργανισμών (Abiotic depletion)
- Ευτροφισμός (Eutrophication)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 – ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ ΜΕΛΕΤΩΝ ΑΚΖ

Στο κεφάλαιο 2 καταγράφονται εφαρμογές της Ανάλυσης Κύκλου Ζωής (ΑΚΖ), σε μελέτες περίπτωσης από τη διεθνή βιβλιογραφία. Πιο συγκεκριμένα, παρουσιάζονται μελέτες ΑΚΖ για τις εκπομπές CO_{2eq}, από μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας (συμβατικές και ΑΠΕ), από το δίκτυο μεταφοράς και διανομής ηλεκτρικής ενέργειας, καθώς και για τις συνολικές εκπομπές από το ηλεκτρικό δίκτυο ορισμένων χωρών (παραγωγή και μεταφορά). Τέλος, αναλύονται τα όρια του συστήματος, για κάθε μελέτη περίπτωσης.

2.1. ΑΚΖ για μονάδες παραγωγής Ηλεκτρικής Ενέργειας (Η.Ε.)

Τα στάδια τα οποία θα πρέπει να περιλαμβάνει μια ΑΚΖ, για την καταγραφή και μελέτη των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου από ενεργειακά συστήματα (Green House Gases – GHG emissions), σύμφωνα με τη διεθνή βιβλιογραφία [1, 3, 4, 9, 10, 12, 21, 26, 32, 23,28-39.], είναι τα εξής:

- a) ανεύρεση, εξόρυξη και επεξεργασία ενεργειακών/φυσικών πόρων
- b) εξόρυξη πρώτων υλών για την κατασκευή των υποδομών του σταθμού παραγωγής
- c) κατασκευή της εκάστοτε τεχνολογίας ηλεκτροπαραγωγής
- d) μεταφορά των καυσίμων
- e) άλλη συναφή δραστηριότητα που αφορά μεταφορές π.χ. για τον παροπλισμό της μονάδας και την ανακύκλωση κάποιων υλικών του
- f) απώλειες ενέργειας σε θερμότητα και
- g) διαχείριση των αποβλήτων.

Από το 1990 η κατανάλωση ενέργειας, σε παγκόσμιο επίπεδο, έχει αυξηθεί κατά 40%. Σήμερα, το 68% της ενέργειας που χρησιμοποιείται παγκοσμίως, προέρχεται από ορυκτά καύσιμα ενώ ο τομέας της ηλεκτροπαραγωγής, γενικότερα, είναι υπεύθυνος για το 40% των συνολικών εκπομπών CO₂ στην ατμόσφαιρα [19]. Ο αντικειμενικός

σκοπός μιας AKZ, είναι να εντοπίζει και να κατατάσσει τις διάφορες περιβαλλοντικές πιέσεις σε κάθε στάδιο του κύκλου ζωής και όχι να τις μετακυλύει από το ένα στάδιο του κύκλου ζωής στο άλλο, από τη μία περιοχή στην άλλη ή από τη μία κατηγορία περιβαλλοντικής επίπτωσης στην άλλη [15]. Όπως επισημαίνεται και στην κριτική ανασκόπηση που κάνει ο Turconi κ.α. [32] σε 167 μελέτες περίπτωσης, οι δείκτες που χρησιμοποιούνται για την κατάταξη των εκπομπών στις διάφορες κατηγορίες επιπτώσεων, είναι κατά κύριο λόγο τα kg CO₂. Ωστόσο, όπως τονίζεται στη μελέτη, υπάρχει ο κίνδυνος της υπεραπλούστευσης των αποτελεσμάτων της AKZ, με τη χρήση ενός μόνο δείκτη. Παρ'όλο που το ανθρακικό αποτύπωμα είναι μια απλουστευμένη, αλλά κατανοητή για το ευρύ κοινό, εξήγηση της ρύπανσης (υπερθέρμανση του πλανήτη) που προκαλείται από τις ανθρώπινες δραστηριότητες, εάν παραλειφθεί η συνεισφορά στις περιβαλλοντικές επιπτώσεις και από άλλα αέρια, όπως οι εκπομπές kg NO_x και kg SO₂, τότε μπορεί τα αποτελέσματα της μελέτης να είναι αμφισβητήσιμα. Τα συγκεκριμένα αέρια, είναι υπεύθυνα για τις κατηγορίες επιπτώσεων του ευτροφισμού και της οξίνισης του περιβάλλοντος αντίστοιχα, κατηγορίες εξίσου σημαντικές για την περιβαλλοντική αξιολόγηση των μονάδων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Ο τομέας ηλεκτροπαραγωγής είναι υπεύθυνος για το 19% και 56% των συνολικών εκπομπών SO₂ και NO_x αντίστοιχα, στην ατμόσφαιρα [14]. Επιπλέον, η σημασία της εξέτασης και άλλων εκπομπών αερίων, πέρα των GHG, όπως είναι οι εκπομπές SO₂ και NO_x, μπορεί να εξηγηθεί περαιτέρω όταν εξετάζεται η πλήρης κατανομή των εκπομπών αυτών, σε όλο τον κύκλο ζωής της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Όταν η αξιολόγηση, οποιασδήποτε μονάδας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, επικεντρώνεται μόνο στην κατηγορία της υπερθέρμανσης του πλανήτη (Global Warming Potential – GWP), τότε μπορεί ενώ τα αποτελέσματα της AKZ, για τη συγκεκριμένη κατηγορία, να δίνουν παρόμοιες εκπομπές CO₂ για δύο διαφορετικές τεχνολογίες, οι συνέπειες για τον

ευτροφισμό (eutrophication) και την οξίνιση (acidification), τελικά, να είναι πολύ σημαντικές και να υπερισχύουν σε μία από τις δύο τεχνολογίες [32].

Η βιώσιμη ανάπτυξη απαιτεί μεθόδους και εργαλεία, ώστε να γίνεται εφικτή η μέτρηση και η σύγκριση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων, από τις ανθρώπινες δραστηριότητες. Στις περιβαλλοντικές επιπτώσεις συμπεριλαμβάνονται οι εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου προς το περιβάλλον από μια διεργασία, την κατανάλωση ενέργειας και πόρων από κάθε στάδιο του κύκλου ζωής ενός προϊόντος ή μιας υπηρεσίας, καθώς και άλλες παράμετροι όπως η χρήση γης κλπ. Υπό αυτό το πρίσμα, οι μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας εκπέμπουν και αυτές σημαντικές ποσότητες ρύπων, από όλα τα στάδια του κύκλου ζωής τους. Ακόμα και οι εκπομπές από τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας δεν είναι τόσο αμελητέες όπως ίσως θεωρείται, όπως επισημαίνουν, ο Varun κ.α. στη μελέτη τους [39] για τις εκπομπές CO₂ από μονάδες ΑΠΕ. Εφαρμόζοντας την Ανάλυση Κύκλου Ζωής (ΑΚΖ), κάνει μια εκτίμηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων της ηλεκτροπαραγωγής από μονάδες ΑΠΕ και τις συγκρίνει με τις εκπομπές CO₂ από μονάδες συμβατικού καυσίμου, για να καταλήξει πώς τα αποτελέσματα της έρευνας είναι υπέρ των ΑΠΕ.

Τα ενεργειακά συστήματα εκπέμπουν αέρια του θερμοκηπίου (GHG) και έτσι συνεισφέρουν στο ανθρωπογενές κομμάτι του φαινομένου του θερμοκηπίου. Οι εκπομπές αυτές, προέρχονται απ'όλα τα στάδια του κύκλου ζωής της κάθε μονάδας παραγωγής ενέργειας αλλά και από τον κύκλο ζωής του καυσίμου που χρησιμοποιούν. Στη βιβλιογραφία, οι εκπομπές μιας μονάδας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας μπορεί να αναφέρονται είτε στις αθροιστικές εκπομπές, δηλαδή απ'όλα τα στάδια του κύκλου ζωής, είτε στις άμεσες εκπομπές από το στάδιο μόνο της λειτουργίας της μονάδας παραγωγής. Στη μελέτη του Weisser [9], η οποία βασίζεται σε δημοσιευμένες πρωτότυπες μελέτες ΑΚΖ, που έγιναν μεταξύ 2000 με 2006, αναλύονται οι εκπομπές

GHG απ'το σύνολο του κύκλου ζωής των μονάδων ηλεκτροπαραγωγής. Στις συγκεκριμένες μελέτες, παρατηρούνται αντικρουόμενα αποτελέσματα για τις εκπομπές GHG μεταξύ των διάφορων τεχνολογιών για τις ίδιες μονάδες καυσίμου. Μία εξήγηση [9] μπορεί να είναι πως αυτές οι διαφορές οφείλονται στη μεθοδολογική προσέγγιση που ακολουθήθηκε στην κάθε μελέτη περίπτωσης ξεχωριστά. Δηλαδή στα όρια του συστήματος που επιλέχθηκαν, στις υποθέσεις που έχουν γίνει, στα αναλυτικά στοιχεία που είχαν στη διάθεση τους οι ερευνητές, όπως για την παροχή καυσίμου αλλά και για το μίγμα και την προέλευση του καυσίμου, καθώς και στην γεωγραφική κατανομή των μονάδων αυτών, κ.α. Επίσης, ο Weisser στη μελέτη του παρουσιάζει τις άμεσες εκπομπές από μονάδες παραγωγής με ορυκτά καύσιμα, σε διαφορετικές περιοχές, για να δείξει ότι υπάρχουν διαφορές ανάμεσα σε μονάδες ηλεκτροπαραγωγής με τον ίδιο τύπο καυσίμου, που οφείλονται στη διαφορετική τεχνολογία κάθε μονάδας, στην θερμική απόδοσή της, στην θερμογόνο δύναμη του κάθε καυσίμου κ.α.. Τέλος, παρουσιάζει τις εκπομπές GHG από διάφορες τεχνολογίες ΑΠΕ και συμβατικού καυσίμου, με σκοπό οι policy makers να έχουν μια εκτίμηση του εύρους που κυμαίνονται οι εκπομπές από κάθε τεχνολογία ηλεκτροπαραγωγής. Σημειώνεται πως στην παραπάνω μελέτη, το μέγεθος των σταθμών (plants) δεν έχει ληφθεί υπόψιν.

Τα συμπεράσματα από την μελέτη του Weisser [9] είναι ότι οι άμεσες εκπομπές από τα ορυκτά καύσιμα οφείλονται κυρίως στον τύπο της μονάδας ηλεκτροπαραγωγής. Δηλαδή, στον τύπο καυσίμου (ιδιαίτερα της περιεκτικότητάς του σε άνθρακα) που χρησιμοποιούν, καθώς και στην θερμική απόδοση της κάθε μονάδας. Επιπλέον, η θερμική απόδοση αυξάνεται όσο αυξάνεται και ο συντελεστής φορτίου, άρα οι εκπομπές GHG, από μια συγκεκριμένη μονάδα ηλεκτροπαραγωγής, θα εξαρτώνται και από τη διάρκεια λειτουργίας της (π.χ. χρήση της για κάλυψη φορτίων αιχμής, για κάλυψη φορτίων βάσης, χρήση μονάδων συνδυασμένου κύκλου για συμπαραγωγή

θερμότητας, κλπ) [10, 36]. Πρέπει να επισημανθεί ότι όσο μεγαλύτερη είναι η θερμογόνος δύναμη του ορυκτού καυσίμου, τόσο λιγότερη η περιεκτικότητά του σε άνθρακα. Από την άλλη, οι κύριες εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου από μονάδες ηλεκτροπαραγωγής ΑΠΕ, οφείλονται κυρίως στα στάδια της παραγωγής των εξαρτημάτων και της εξόρυξης των πρώτων υλών για την κατασκευή των μονάδων ΑΠΕ, καθώς και από το στάδιο της κατασκευής των αντίστοιχων υποδομών για τους σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.

Παρακάτω, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα, από τη διεθνή βιβλιογραφία, για τις εκπομπές CO₂ από μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, ανά τεχνολογία. Για κάθε τεχνολογία, οι εκπομπές αξιολογήθηκαν σύμφωνα με τις συνεισφορές τους από τις ακόλουθες φάσεις του κύκλου ζωής τους: (α) παροχή καυσίμου, από την εξαγωγή του μέχρι την είσοδό του στο σταθμό παραγωγής, (β) λειτουργία του σταθμού παραγωγής (λειτουργία και συντήρηση, συμπεριλαμβανομένης και της διάθεσης καταλοίπων) και (γ) υποδομές, συμπεριλαμβανομένης της χρήσης γης για τον σταθμό και τον παροπλισμό του, μετά το τέλος του κύκλου ζωής. Τέλος, αν δεν διευκρινίζεται κάτι άλλο, οι εκπομπές παρουσιάζονται σε kg ή gr CO₂ eq. ανά MWh ή kWh, όπου MWh (ή kWh) αναφέρεται στην ηλεκτρική ενέργεια που τροφοδοτεί το δίκτυο.

2.1.1. Μονάδες με συμβατικά καύσιμα

Λιθάνθρακας (hard coal)

Τα αποτελέσματα των AKZ, για τους σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από άνθρακα (coal), έδειξαν ότι οι άμεσες εκπομπές είναι αυτές που συνεισφέρουν περισσότερο στις εκπομπές GHG για τους σταθμούς αυτούς. Οι εκπομπές από τα στάδια της κατασκευής του σταθμού, του παροπλισμού και της απόθεσης των απορριμάτων, μετά το τέλος του κύκλου ζωής του, καταγράφονται ως αμελητέες. Τέλος, σημαντικές θεωρούνται οι εκπομπές που προέρχονται από το στάδιο της

εξόρυξης του άνθρακα από το ορυχείο, καθώς και η μεταφορά του στους σταθμούς παραγωγής. [9, 32, 39]

Για παράδειγμα, για σταθμούς παραγωγής με θερμική απόδοση 42% και 33%, οι εκπομπές υπολογίζονται σε 750 και 1050 kg CO_{2eq}/MWh, αντίστοιχα [32]. Σε άλλη μελέτη καταγράφονται οι εκπομπές σε 975 gr CO_{2eq}/kWh [39], ενώ μπορούν να παρατηρηθούν και οι διαφορές μεταξύ των αθροιστικών και των άμεσων εκπομπών, που καταγράφονται σε 800-1000 gr CO_{2eq}/kWh οι άμεσες ενώ οι αθροιστικές σε 950-1250 gr CO_{2eq}/kWh [9]. Από την άλλη, για μονάδες αεριοποιημένου άνθρακα (coal gasification) μπορεί να επιτευχθεί υψηλότερη απόδοση, της τάξης του 52%, δηλαδή να μειωθούν οι εκπομπές σε 660-800 kg CO_{2eq}/MWh [32].

Λιγνίτης (lignite)

Η πλειοψηφία των εκπομπών από ένα λιγνιτικό σταθμό παραγωγής, προέρχεται από τη λειτουργία του ίδιου του σταθμού παραγωγής. Μικρότερη συνεισφορά καταγράφεται για τα στάδια της κατασκευής του σταθμού, του παροπλισμού και της απόθεσης των απορριμάτων, μετά το τέλος του κύκλου ζωής του. Λόγω της χαμηλής θερμογόνου δύναμης του λιγνίτη, οι εκπομπές αναμένονται υψηλές, εξαιτίας της μεγάλης περιεκτικότητάς του σε άνθρακα. Αυτός ο παράγοντας μπορεί να είναι, σε μερικές περιπτώσεις, πιο καθοριστικός και από την θερμική απόδοση του ίδιου του σταθμού παραγωγής. Επιπλέον, οι λιγνιτικές μονάδες, χρειάζονται ορυχεία για την εξόρυξη του λιγνίτη, όμως, συνηθίζεται η θέση των σταθμών να είναι δίπλα στα ορυχεία και έτσι δεν υπάρχει σημαντική συνεισφορά από τη μεταφορά της πρώτης ύλης (καυσίμων). [9,32]

Οι εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου (GHG) από τον κύκλο ζωής ενός λιγνιτικού σταθμού παραγωγής ενέργειας, μπορεί να κυμαίνονται από 800–1200 kg CO_{2eq}/MWh, με θερμική απόδοση σταθμού 52% [32]. Γενικά, στη βιβλιογραφία [9, 32, 40], οι τιμές μπορεί να κυμαίνονται από 800–1700 gr CO_{2eq}/kWh, ενώ όπως σημειώνεται στους

μελλοντικούς σταθμούς (2010-2020) οι εκπομπές από τους λιγνιτικούς σταθμούς θα περιορίζονται λίγο πάνω από τα 800 gr CO_{2eq}/kWh [9]. Για να υπάρξουν, βέβαια, σημαντικές βελτιώσεις ως προς τις αθροιστικές εκπομπές, θα πρέπει να δοθεί έμφαση στους παράγοντες που επηρεάζουν την θερμική απόδοση (thermal efficiency) και τη λειτουργία (operation) των σταθμών αυτών.

Πετρέλαιο (oil)

Το στάδιο του κύκλου ζωής των πετρελαιομηχανών για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας που συνεισφέρει περισσότερο σε αέρια του θερμοκηπίου, είναι αυτό της λειτουργίας του σταθμού. Αμελητέες καταγράφονται οι εκπομπές από τα στάδια της κατασκευής του σταθμού και του παροπλισμού του, μετά το τέλος του κύκλου ζωής, ενώ πολύ σημαντικές είναι οι εκπομπές από τα στάδια της εξεύρεσης, της εξόρυξης, της μεταφοράς και της διύλησης του πετρελαίου. Το φάσμα των εκπομπών GHG που καταγράφεται οφείλεται αφενός, σε μεγάλο βαθμό, στον τύπο της τεχνολογίας του σταθμού παραγωγής και αφετέρου στο διαφορετικό τρόπο λειτουργίας του κάθε σταθμού και για την κάθε χώρα χωριστά (π.χ. κάλυψη φορτίων αιχμής ή φορτίων βάσης). [9, 39-40]

Πιο συγκεκριμένα, οι άμεσες εκπομπές από σταθμούς παραγωγής με καύσιμο το πετρέλαιο, έχουν ένα εύρος εκπομπών GHG μεταξύ 700-800 gr CO_{2eq}/kWh [9]. Όπως προαναφέρθηκε, μπορούμε να παρατηρήσουμε τις σημαντικές διαφορές, μεταξύ των εκπομπών για τον ίδιο σταθμό, ανάλογα με τον τρόπο λειτουργίας τους. Δηλαδή, ενώ οι εκπομπές για τα τρία στάδια του κύκλου ζωής που προαναφέρθηκαν φτάνουν περίπου τα 742 gr CO_{2eq}/kWh [39], αν η χρήση των συγκεκριμένων μονάδων γίνεται για την κάλυψη των φορτίων αιχμής του δικτύου, τότε οι εκπομπές μπορεί να αυξηθούν στα 933 gr CO_{2eq}/kWh [40].

Φυσικό αέριο (natural gas)

Υπάρχουν πολλοί, διαφορετικοί, τρόποι για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από φυσικό αέριο, όπως για παράδειγμα από μονάδες απλού κύκλου (SC), με χαμηλές ενεργειακές αποδόσεις της τάξης του 26% - 35% ή συνδυασμένου κύκλου (CC) με υψηλότερες αποδόσεις έως και 60%. Η διάκριση αυτή γίνεται διότι οι πρώτες (SC) καλύπτουν κυρίως τα φορτία αιχμής, ενώ οι δεύτερες (CC) καλύπτουν κυρίως τα φορτία βάσης, στο ηλεκτρικό δίκτυο [32]. Έτσι, η πλειοψηφία των εκπομπών GHG από τους σταθμούς φυσικού αερίου, προέρχονται κυρίως από το στάδιο της λειτουργίας της μονάδας και όχι από τα στάδια της κατασκευής και του παροπλισμού του σταθμού, μετά το τέλος του κύκλου ζωής του. Ωστόσο, υπάρχουν σημαντικές εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου από τον κύκλο ζωής του καυσίμου αυτού. Αυτές, προέρχονται από την επεξεργασία του φυσικού αερίου, από τη λειτουργία του αγωγού μεταφοράς (κυρίως από τους συμπιεστές), καθώς και από τις διαρροές κατά τη μεταφορά του (μελέτες AKZ συνήθως υποθέτουν πως το 1-2% του φυσικού αερίου χάνεται στην ατμόσφαιρα, κατά το στάδιο της μεταφοράς, ως διαρροή [37]), κ.α. Επειδή όλες αυτές οι παράμετροι ποικίλουν μεταξύ των χωρών, η δομή της AKZ μπορεί να είναι ένας σημαντικός παράγοντας για τον υπολογισμό των αθροιστικών εκπομπών [9].

Με βάση τη βιβλιογραφία οι άμεσες εκπομπές GHG, από μονάδες συνδυασμένου κύκλου (CC), κυμαίνονται μεταξύ 350 – 410 kg CO_{2eq}/MWh [32]. Σε άλλες μελέτες το ποσό καταγράφεται στα 608 gr CO_{2eq}/kWh για τις αθροιστικές εκπομπές [39], ενώ σε άλλη κυμαίνεται μεταξύ 360-575 gr CO_{2eq}/kWh, για τις άμεσες εκπομπές και 440-780 gr CO_{2eq}/kWh, για τις αθροιστικές [9]. Τέλος, σε μία μελέτη AKZ για τις σκανδιναβικές χώρες, βρέθηκε ότι με τη χρήση των μονάδων φυσικού αερίου για κάλυψη των φορτίων αιχμής, οι εκπομπές GHG μπορούν να εκτοξευθούν στα 1269 gr CO_{2eq}/kWh [40]. Αξίζει να αναφερθεί ότι για τις μελλοντικές μονάδες φυσικού αερίου οι εκπομπές αναμένονται να είναι σταθερά κάτω από 400 gr CO_{2eq}/kWh. Ωστόσο για

να επιτευχθεί αυτό θα πρέπει να μειωθούν οι διαρροές κατά τη μεταφορά του, να αυξηθεί η ηλεκτρική απόδοση των μονάδων αλλά και να βελτιωθούν οι επιδόσεις των αγωγών μεταφοράς [9].

Πυρηνική ενέργεια (nuclear power)

Τα αποτελέσματα έδειξαν πως, οι συντελεστές εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου από πυρηνικά εργοστάσια, για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, ποικίλουν, με διαφορές έως και μία τάξη μεγέθους. Αυτή η μεταβλητότητα οφείλεται αφενός στις μεθοδολογικές προσεγγίσεις που ακολουθήθηκαν για την αξιολόγηση των μονάδων και αφετέρου στις διαφορετικές τεχνολογίες των μονάδων αυτών [32]. Πιο συγκεκριμένα, οι διαφορετικές διεργασίες που χρησιμοποιούνται για την επεξεργασία του ουρανίου ή το είδος του αντιδραστήρα, όπως για παράδειγμα αν χρησιμοποιούνται αντιδραστήρες πεπιεσμένου νερού (PWR) ή αντιδραστήρες με χρήση βραστού νερού (BWR), αυτός ο διαχωρισμός θα έχει σημαντική επίδραση στα αποτελέσματα [9].

Στις τιμές που αναφέρονται στη βιβλιογραφία για τις εκπομπές GHG από τις μονάδες ηλεκτροπαραγωγής με τη χρήση πυρηνικής ενέργειας, καταγράφεται ξεκάθαρα η απόκλιση των αποτελεσμάτων. Ενδεικτικά αναφέρονται μερικές τιμές: 3,1 - 35 kg CO_{2eq}/MWh [32], 0,74 - 1,3 gr CO_{2eq}/kWh [9], 24 gr CO_{2eq}/kWh [39] και 5 gr CO_{2eq}/kWh [40]. Οι βασικοί τομείς βελτίωσης, για να μειωθούν οι εκπομπές από τις τεχνολογίες που βασίζονται στην πυρηνική ενέργεια, θα πρέπει να είναι [11]: (α) μείωση της καταναλισκώμενης ηλεκτρικής ενέργειας κατά τη διεργασία του εμπλουτισμού, (β) χρήση ηλεκτρικής ενέργειας με χαμηλή περιεκτικότητα άνθρακα και (γ) παράταση της διάρκειας ζωής των μονάδων και αύξηση της απόδοσης καύσης.

Μεγάλα υδροηλεκτρικά (hydropower)

Για την εκμετάλλευση της υδροηλεκτρικής ενέργειας χρησιμοποιούνται δύο εφαρμογές, τα φράγματα με λεκάνες απορροής και οι μονάδες run-of-river. Η πρώτη λύση, απαιτεί

την κατασκευή ενός φράγματος και τη συλλογή των υδάτων σε μια δεξαμενή. Έτσι, επιτρέπεται η άμεση παραγωγή και χρήση ηλεκτρικής ενέργειας σε ώρες αιχμής. Αντίθετα, η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από τις μονάδες run-of-river βασίζεται στην ποσότητα και τη ροή των υδάτων και είναι κάτι που δεν μπορεί να ελεγχθεί. Ωστόσο, για να είναι πλήρης μια AKZ, θα πρέπει να συμπεριληφθούν στη μελέτη και οι επιπτώσεις από άλλους παράγοντες όπως η δευτερογενής εκμετάλευση του νερού για σκοπούς άρδρευσης κλπ. Το ποσό των εκπομπών GHG, λοιπόν, εξαρτάται από τον τύπο του υδροηλεκτρικού σταθμού, το μέγεθος των δεξαμενών νερού, την ποσότητα των καλυμένων με φυτά περιοχών, που πλημμυρίζουν λόγω του φράγματος, τη σύσταση του εδάφους, το βάθος του νερού, τις κλιματολογικές συνθήκες της περιοχής κ.α. Τέλος, είναι σημαντικό να τονιστεί ότι τα αποτελέσματα για τις εκπομπές GHG είτε από τον ένα τύπο μονάδας είτε από τον άλλον, δεν δείχνουν να διαφέρουν σημαντικά. Για να είναι, όμως, αξιόπιστα τα αποτελέσματα μιας μελέτης AKZ θα πρέπει να συλλεχθούν όλα τα παραπάνω στοιχεία [9, 32, 39].

Οι περισσότερες εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου, προέρχονται από το στάδιο της κατασκευής της υποδομής, των υδροηλεκτρικών μονάδων. Αυτές, μπορούν να κυμαίνονται μεταξύ 2 – 5 kg CO_{2eq}/MWh, για μονάδες run-of-river και 11- 20 kg CO_{2eq}/MWh, για μονάδες με φράγμα [32]. Σε άλλες μελέτες οι εκπομπές κυμαίνονται από 2 – 9 gr CO_{2eq}/kWh, για τα στάδια της κατασκευής και λειτουργίας ενώ για τις αθροιστικές εκπομπές απ'όλα τα στάδια του κυκλου ζωής, οι εκπομπές κυμαίνονται από 1 – 34 gr CO_{2eq}/kWh [9]. Τέλος, σε μία μελέτη για τις σκανδιναβικές χώρες [40], το ποσό αερίων του θερμοκηπίου που εκπέμπεται στην ατμόσφαιρα καταγράφηκε στα 9 gr CO_{2eq}/kWh ενώ σε άλλη [39] κυμαίνεται από 1 - 10 gr CO_{2eq}/kWh, για υδροηλεκτρική μονάδα με φράγμα και μόνο για το στάδιο της κατασκευής, με συγκεκριμένα, όμως, γεωγραφικά χαρακτηριστικά της περιοχής.

Μονάδες συνδυασμένου κύκλου (Combined Heat and Power, CHP)

Για την μελέτη των μονάδων συνδυασμένου κύκλου, κυρίαρχο ρόλο για μια ΑΚΖ θα παίζει το καύσιμο που επιλέγεται για την παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας. Οι εκπομπές GHG για μονάδες συνδυασμένου κύκλου (CCS) με δυνατότητα για αποθήκευση της ενέργειας και χρήση καυσίμου βασισμένο στην καύση άνθρακα, κυμαίνονται μεταξύ 65 – 152 gr CO_{2eq}/kWh, ενώ για μονάδες αεριοποίησης συνδυασμένου κύκλου, IGCC, μεταξύ 40 – 66 gr CO_{2eq}/kWh [9]. Αυτό, μας δείχνει ότι η μείωση των εκπομπών CO₂ ανά kWh μπορεί να υποστεί μείωση της τάξης του 80-90%, ανάλογα με την τεχνολογία και τον τύπο καυσίμου που χρησιμοποιείται. Τέλος σε άλλη μελέτη [40] παρουσιάζονται ξεχωριστά οι εκπομπές για μονάδες συνδυασμένου κύκλου, με καύσιμο φυσικό αέριο (503 gr CO_{2eq}/kWh), βιομάζα (100 gr CO_{2eq}/kWh) και με τη χρήση άνθρακα (πάνω από 700 gr CO_{2eq}/kWh).

2.1.2. Μονάδες Α.Π.Ε.

Φωτοβολταϊκά (Photovoltaic)

Τα περισσότερα αποτελέσματα των ερευνών ΑΚΖ δείχνουν πως το στάδιο που συνεισφέρει περισσότερο στις συνολικές εκπομπές GHG, από τον κύκλο ζωής των φωτοβολταϊκών σταθμών, είναι το στάδιο της κατασκευής των πανέλων (panels). Αντίθετα, αμελητέες είναι οι εκπομπές από τη συντήρηση και τη λειτουργία του σταθμού. Σε γενικές γραμμές, οι εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου, εξαρτώνται από: (α) την τεχνολογία των Φ/Β panels, δηλαδή αν είναι μονοκρυσταλλικά, πολυκρυσταλλικά ή άμορφα, (β) από τις κλιματολογικές συνθήκες της περιοχής, για την παραγωγή ενέργειας, (γ) από το ενεργειακό μίγμα της χώρας στην οποία κατασκευάστηκαν, (δ) από τους inverters κ.α. Επίσης, οι εκπομπές GHG εξαρτώνται και από την τοποθεσία των Φ/Β, δηλαδή αν θα τοποθετηθούν σε κάποια οροφή κτηρίου ή αν θα είναι ένας σταθμός παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Τέλος, για τον υπόλοιπο

περιφερειακό εξοπλισμό, οι εκπομπές που προέρχονται από αυτόν, θεωρούνται αμελητέες.

Σε μια ανάλυση κύκλου ζωής (AKZ), το εύρος των εκπομπών, μπορεί να διαφέρει μέχρι και μία ολόκληρη τάξη μεγέθους, αν συνυπολογίσει κανείς όλα τα παραπάνω. Έτσι, υπάρχουν μελέτες που δίνουν εκπομπές, με εύρος μεταξύ 30 – 130 kg CO_{2eq}/MWh [32]. Ενώ, σε άλλες μελέτες οι εκπομπές κυμαίνονται μεταξύ 43 – 73 gr CO_{2eq}/kWh [9]. Στις εργασίες που λαμβάνουν υπόψη τους πιο αναλυτικά στοιχεία, όπως για το αν είναι πολυκρυσταλλικά ή όχι τα panels, τότε τα αποτελέσματα για τις εκπομπές GHG, από τους υπό εξέταση Φ/Β σταθμούς, είναι πιο ακριβή. Για παράδειγμα, όπως παρουσιάζεται στη μελέτη [9], οι εκπομπές ανέρχονται στα 43 – 62 gr CO_{2eq}/kWh, για μονοκρυσταλλικά panels και 50 - 73 gr CO_{2eq}/kWh για τα υπόλοιπα Φ/Β panels. Οι διαφορές αυτές, μπορεί να οφείλονται στις διαφορετικές ποσότητες σιλικόνης κάθε μοντέλου, στις διαφορετικές ηλεκτρικές αποδόσεις των panel, στη διάρκεια ζωής τους, καθώς και στις διαφορετικές τιμές της ακτινοβολίας του ήλιου που λαμβάνεται υπόψη σε κάθε περιοχή για την παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος. Τέλος, στη μελέτη [39], παρουσιάζονται αποτελέσματα εκπομπών που κυμαίνονται μεταξύ 53 – 250 gr CO_{2eq}/kWh. Η απόκλιση των αποτελεσμάτων που δίνει κάθε μελέτη περίπτωσης, οφείλεται στο γεγονός ότι κάθε μία από αυτές [2, 23-24], αναφέρεται σε συγκεκριμένη τεχνολογία και με συγκεκριμένα, γεωγραφικά, χαρακτηριστικά.

Ανεμογεννήτριες (wind turbine)

Οι περισσότερες εκπομπές GHG, από τον κύκλο ζωής των αιολικών πάρκων, είναι από το στάδιο της κατασκευής των αιολικών, καθώς και από τις υποδομές που χρειάζονται για τους σταθμούς παραγωγής. Οι περισσότερες μελέτες περίπτωσης, περιορίζουν τα όρια του συστήματος της εργασίας τους, στις ανεμογεννήτριες που

απαρτίζουν ένα αιολικό πάρκο. Με βάση τη βιβλιογραφία [9], δεν παρουσιάζονται σημαντικές διαφοροποιήσεις στις εκπομπές GHG, αν τα αιολικά πάρκα είναι στη θάλασσα (offshore) ή αν είναι στη στεριά (onshore), παρ'όλο που απαιτείται διαφορετική υποδομή θεμελίων για κάθε περίπτωση. Άλλα στάδια του κύκλου ζωής που συνεισφέρουν στις συνολικές εκπομπές, είναι αυτά της λειτουργίας των Α/Γ, της μεταφοράς των εξαρτημάτων στο χώρο που θα τοποθετηθεί το αιολικό πάρκο, καθώς και το στάδιο του παροπλισμού των μονάδων, στο τέλος του κύκλου ζωής τους. Επίσης, συσχετίσεις των εκπομπών GHG υπάρχουν και με την ταχύτητα του ανέμου. [32, 39]

Το εύρος των εκπομπών από διάφορες ΑΚΖ είναι 3 – 28 gr CO_{2eq}/kWh [32]. Όταν οι μελέτες έχουν πιο αναλυτικά στοιχεία, όπως για το αν είναι offshore ή onshore, τότε τα αποτελέσματα για τις εκπομπές GHG, από τα υπό εξέταση αιολικά πάρκα, είναι πιο ακριβή. Αυτό διαφάνεται ξεκάθαρα στα αποτελέσματα της εργασίας [9], που δίνει εύρος τιμών 8 - 30 gr CO_{2eq}/kWh, για onshore και 9 - 19 gr CO_{2eq}/kWh για offshore. Τέλος, σε διαφορετική εργασία ΑΚΖ για ανεμογεννήτριες [39], παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου, που κυμαίνονται μεταξύ 10 - 124 gr CO_{2eq}/kWh. Και σε αυτήν την περίπτωση αξίζει να σημειωθεί πως κάθε μελέτη περίπτωσης [22, 34], αναφέρεται σε συγκεκριμένη τεχνολογία Α/Γ και τα χαρακτηριστικά της.

Βιομάζα / Βιοαέριο (biomass / biogas)

Τα συστήματα βιομάζας που εξετάζονται στη βιβλιογραφία βασίζονται σε τρεις τεχνολογίες μετατροπής της βιομάζας σε ηλεκτρικής ενέργεια. Οι μονάδες αυτές είναι απλού κύκλου με χρήση καυσίμου (COMB), συνδυασμένου κύκλου (CO-COMB) και οι μονάδες αεριοποίησης (IBGCC). Οι εκπομπές GHG από τα συστήματα βιομάζας εξαρτώνται, κυρίως, από τον κύκλο ζωής του καυσίμου που χρησιμοποιούν, τις ιδιότητές του, καθώς και την τεχνολογία που χρησιμοποιούν οι μονάδες αυτές, για την

μετατροπή του καυσίμου σε ηλεκτρική ενέργεια και, τέλος, από την απόδοση των μονάδων αυτών. Έτσι, σημαντική συνεισφορά στις εκπομπές εμφανίζονται στο στάδιο της λειτουργίας της μονάδας και όχι από το στάδιο της κατασκευής του σταθμού. [9, 32, 39]

Οι τιμές για τις εκπομπές GHG που καταγράφονται, εμφανίζουν μεγάλη μεταβλητότητα και μπορεί να κυμαίνονται από 8,5 – 118 kg CO_{2eq}/MWh (COMB), 25 - 130 kg CO_{2eq}/MWh (CO-COMB) και 17 - 117 kg CO_{2eq}/MWh (IBGCC) [32]. Σε άλλη μελέτη, το εύρος κυμαίνεται μεταξύ 35 – 99 gr CO_{2eq}/kWh [9], αυστηρά με καύσιμο εισόδου το ξύλο και παραπροϊόντα του, ενώ σε άλλη [39] μεταξύ 35 – 178 gr CO_{2eq}/kWh. Η τελευταία παρουσιάζει μελέτες περίπτωσης [5-6], στις οποίες αναφέρονται συγκεκριμένα η τεχνολογία που χρησιμοποιείται για την παραγωγή ενέργειας, τα χαρακτηριστικά της, καθώς και συγκεκριμένο καύσιμο για τη λειτουργία της. Τέλος, σε μελέτη για τις σκανδιναβικές χώρες [40] οι εκπομπές που καταγράφηκαν, για μονάδες συνδυασμένου κύκλου με χρήση ως καύσιμο στη μία περίπτωση πέλετ και στην άλλη άχυρο, είναι 15 gr CO_{2eq}/kWh και 100 gr CO_{2eq}/kWh, αντίστοιχα.

Μικροί υδροηλεκτρικοί σταθμοί (small hydro)

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, οι υδροηλεκτρικοί σταθμοί χωρίζονται στις μονάδες με φράγμα και λεκάνες απορροής και στις μονάδες run-of-river. Οι μικροί υδροηλεκτρικοί σταθμοί ή ΜΥΗΣ (μονάδες run-of-river), βασίζουν την παραγωγή ενέργειας στην ροή των υδάτων και δεν απαιτούν σημαντικές παρεμβάσεις στο περιβάλλον, όπως αντίθετα, απαιτείται για την κατασκευή φραγμάτων για τους Υ/Η σταθμούς με δεξαμενές νερού. Επίσης, οι ΜΥΗΣ δεν δημιουργούν ανεπανόρθωτες βλάβες στο οικοσύστημα και έτσι μόνο αυτοί κατατάσσονται στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ΑΠΕ). [9, 39]

Οι εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου, για μονάδες run-of-river, κυμαίνονται μεταξύ 2 – 5 kg CO_{2eq}/MWh [32]. Σε άλλες καταγραφές οι εκπομπές κυμαίνονται μεταξύ 2 – 9 gr CO_{2eq}/kWh, για τα στάδια της κατασκευής και λειτουργίας ενώ για τις αθροιστικές εκπομπές απ'όλα τα στάδια του κύκλου ζωής, οι εκπομπές κυμαίνονται από 1 – 34 gr CO_{2eq}/kWh [9]. Τέλος, σε μία μελέτη για τις σκανδιναβικές χώρες [40], το ποσό αερίων του θερμοκηπίου που εκπέμπεται στην ατμόσφαιρα, καταγράφηκε στα 9 gr CO_{2eq}/kWh.

2.2. AKZ για το ηλεκτρικό δίκτυο μιας χώρας

Οι περισσότερες μελέτες ανάλυσης κύκλου ζωής (AKZ) που ερευνούν το ενεργειακό δίκτυο μιας χώρας, συνήθως, αναφέρονται μόνο στις μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και στις εκπομπές CO₂ που προέρχονται από αυτές. Ωστόσο, για να καταγραφούν (και να μειωθούν) οι εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου (GHG) που προέρχονται από τον ηλεκτρικό τομέα της κάθε χώρας, θα πρέπει να κατανοήσουμε τη συμβολή, στις εκπομπές αυτές, από ολόκληρο τον κύκλο ζωής της βιομηχανίας που είναι υπεύθυνη για την παραγωγή, τη μεταφορά και τη διανομή της ηλεκτρικής ενέργειας στην υπό εξέταση μελέτη περίπτωσης [16]. Στην περίπτωση αυτή, τα όρια του συστήματος θα πρέπει να είναι καλά καθορισμένα. Για παράδειγμα, για μια χώρα στην οποία γίνεται και εισαγωγή και εξαγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, από και προς τις γειτονικές της χώρες, θα πρέπει να αποφεύγεται η πολυπλοκότητα στην AKZ. Μπορεί να υπάρξει κίνδυνος διπλής μέτρησης εκπομπών, δηλαδή και αυτές από τις άλλες χώρες, ή εν πάση περιπτώσει θα πρέπει να είναι αρκετά καθορισμένες οι διεργασίες που λαμβάνονται υπόψη και από το σύστημα παραγωγής και μεταφοράς της γειτονικής χώρας. Σε κάθε περίπτωση, ο καθορισμός των ορίων του συστήματος, θα παίξει αποφασιστικό ρόλο για τη συλλογή των στοιχείων.

Η κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας σε μία χώρα, συνήθως γίνεται σε μεγάλες αποστάσεις από εκεί που παράγεται. Έτσι, τα δίκτυα μεταφοράς της ηλεκτρικής

ενέργειας απαρτίζονται από γραμμές μεταφοράς, καλώδια, μετασχηματιστές και άλλες ηλεκτρικές συσκευές που παράγουν ένα ευρύ φάσμα εκπομπών, με συνέπειες τόσο στο περιβάλλον όσο και στον άνθρωπο [29]. Αν μελετηθούν οι επιπτώσεις αυτές, απ'όλο τον κύκλο ζωής της κάθε συσκευής, τότε τα στάδια που συνεισφέρουν περισσότερο είναι αυτά της χρήσης τους (use phase), της εγκατάστασης, της συντήρησης και της αποσυναρμολόγησης. Πιο συγκεκριμένα για τα καλώδια, η έρευνα που έγινε από τους C. Jones και M. McManus [7] ομοίως δείχνει ότι οι κατηγορίες επιπτώσεων, στις οποίες έχουν πολύ σημαντική επίδραση, είναι στο φαινόμενο της κλιματικής αλλαγής (climate change), στην εξάντληση των φυσικών πόρων (fossil fuel depletion) και στο σχηματισμό αιωρούμενων σωματιδίων (particulate matter formation). Πολλές από τις εκπομπές σχετίζονται με τα υλικά από τα οποία είναι κατασκευασμένοι οι αγωγοί μεταφοράς, όπου στην πλειοψηφία τους είναι κυρίως μέταλλα. Με πιο βελτιωμένες και αποδοτικότερες μεθόδους για την ανακύκλωση και ανάκτηση των υλικών αυτών, θα υπήρχαν, αντίστοιχα, πολύ σημαντικές μειώσεις στις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου.

Ωστόσο, οι πιο σημαντικές εκπομπές GHG, προέρχονται από τις απώλειες ενέργειας κατά τη μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας, ενώ για τη μείωσή τους θα πρέπει να επιλέγονται καλώδια με τη χαμηλότερη αντίσταση αγωγού [7]. Οι απώλειες του δικτύου έχουν τετραγωνική σχέση με τη ζήτηση ενέργειας. Έτσι, οι απώλειες κατά τη μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας, έχουν δυσανάλογα υψηλότερο αντίκτυπο, ως προς τις εκπομπές CO₂, τις ώρες υψηλής ζήτησης ενέργειας ενώ αντίθετα μειωμένες κατά τη χαμηλή ζήτηση. Αυτό καταδεικνύει ότι αγνοώντας τις χρονικές (και ενδεχομένως και τις χωρικές) μεταβολές, οι μετρήσεις ως προς τις εκπομπές και τις επιπτώσεις από τις απώλειες ενέργειας του δικτύου, μπορεί να υποτιμηθούν [16]. Τα στάδια τα οποία θα πρέπει να περιλαμβάνει μια AKZ, για την καταγραφή και μελέτη των εκπομπών αερίων

του θερμοκηπίου από το δίκτυο μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας (GHG emissions), σύμφωνα με τη διεθνή βιβλιογραφία [7, 16, 29], είναι τα εξής: (α) εξόρυξη και επεξεργασία των πρώτων υλών, για την κατασκευή των εξαρτημάτων του δικτύου μεταφοράς, (β) μεταφορά και εγκατάσταση όλων των στοιχείων (εξαρτημάτων και υλικών) του δικτύου στο χώρο εγκατάστασης, συμπεριλαμβανομένης και της ενέργειας που καταναλώνεται στο στάδιο αυτό, (γ) λειτουργία και συντήρηση δικτύου και (δ) αποσυναρμολόγηση και ανακύκλωση/διάθεση των υλικών του.

Ανακεφαλαιώνοντας, για τον εντοπισμό των περιβαλλοντικών επιπτώσεων από το δίκτυο παραγωγής και μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας μιας χώρας, θα πρέπει να καθοριστούν, προσεκτικά, τα όρια του συστήματος, έτσι ώστε η AKZ να έχει αξιόπιστα και συγκρίσιμα αποτελέσματα. Για το λόγο αυτό, θα πρέπει να υιοθετηθεί μια “cradle to grave” προσέγγιση και να μοντελοποιηθούν ξεχωριστά τα δύο δίκτυα, παραγωγής και μεταφοράς, έτσι ώστε να είναι πιο εύκολη η αποδόμισή τους (dematerialization), η συλλογή των στοιχείων και η ερμηνεία των αποτελεσμάτων. Για το δίκτυο παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, τα στάδια του κύκλου ζωής που πρέπει να συμπεριληφθούν είναι η εξόρυξη πρώτων υλών και ορυκτών καυσίμων, η επεξεργασία και μεταφορά τους, η λειτουργία των σταθμών παραγωγής και ο παροπλισμός τους, μετά το τέλος του κύκλου ζωής τους. Τέλος, για το δίκτυο μεταφοράς της ηλεκτρικής ενέργειας, τα στάδια που πρέπει να συμπεριληφθούν σε μια AKZ είναι οι επιπτώσεις από την εξόρυξη, επεξεργασία και μεταφορά των πρώτων υλών και γενικότερα τις επιπτώσεις απ’όλα τα στάδια του κύκλου ζωής των υλικών, από τις απώλειες ενέργειας του δικτύου και τέλος από τυχόν εισαγωγές ηλεκτρικής ενέργειας. [13, 31, 41]

Καμία μελέτη AKZ δεν βρέθηκε που να συνδυάζει μια ολοκληρωμένη περιβαλλοντική αξιολόγηση, του συνόλου του ηλεκτρικού δικτύου μιας χώρας, με εξαίρεση μια εργασία που δημοσιεύτηκε το 2014, για την Πορτογαλία [31]. Στη συγκεκριμένη μελέτη

περίπτωσης, μοντελοποιήθηκε και αξιολογήθηκε το δίκτυο παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας της χώρας, ανά τύπο καυσίμου, αξιολογήθηκαν οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις από τις εισαγωγές ηλεκτρικής ενέργειας και τέλος, μετρήθηκαν οι εκπομπές από το δίκτυο μεταφοράς και διανομής της ηλεκτρικής ενέργειας, στην Πορτογαλία.

Ο μεγάλος χρόνος ζωής και λειτουργίας των δικτύων μεταφοράς, αποτελεί πρόκληση για την πρόβλεψη της εξέλιξής του και, τελικά, την μέτρηση των εκπομπών CO₂ που προέρχονται από όλο τον κύκλο ζωής του. Ακόμα πιο δύσκολη είναι η προσπάθεια καταμερισμού και σύνδεσης, των εν λόγω εκπομπών, με το ενεργειακό μίγμα της χώρας και την εξάρτησή τους από τη λειτουργία των μονάδων παραγωγής. Για το λόγο αυτό, στη μελέτη AKZ του δικτύου μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας (μόνο υψηλή τάση) στην Αγγλία [16], για τη μέτρηση των εκπομπών CO₂, έπρεπε να υιοθετηθεί ένα στατικό ενεργειακό μίγμα της χώρας, σταθερές απώλειες δικτύου και σταθερή διάρκεια ζωής των υποδομών του δικτύου, για 40 χρόνια. Τα αποτελέσματα, από την έρευνα αυτή, έδειξαν πώς οι εκπομπές από το δίκτυο μεταφοράς της Αγγλίας, κατά τη μεταφορά μιας kWh ηλεκτρικής ενέργειας από γραμμές μεταφοράς υψηλής τάσης, ανέρχονται στα 11 gr CO_{2eq}/kWh. Αν συμπεριληφθούν και οι εκπομπές από τις απώλειες του δικτύου τότε, σύμφωνα με τη μελέτη [7], θα πρέπει να προστεθούν και άλλα 2 - 4 gr CO_{2eq}/kWh. Σε άλλη μελέτη, για τις εκπομπές GHG, από το δίκτυο μεταφοράς της Νορβηγίας [29] οι εκπομπές μετρήθηκαν σε 3,9 – 4,7 gr CO_{2eq}/kWh, όταν λαμβάνεται υπόψιν το ενεργειακό μίγμα των σκανδιναβικών χωρών, ενώ ανέρχεται στα 10,06 – 11,08 gr CO_{2eq}/kWh, όταν λαμβάνεται υπόψιν ένας μέσος όρος του ενεργειακού μίγματος της Ευρώπης. Η διαφορά αυτή οφείλεται, κυρίως, στις μεγάλες απώλειες ενέργειας που εμφανίζει το ευρωπαϊκό δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας. Ένα άλλο ενδιαφέρον αποτέλεσμα της έρευνας είναι η καταγραφή της συνεισφοράς των εκπομπών GHG, από τα διαφορετικά στοιχεία που απαρτίζουν το δίκτυο, όπου οι

αγωγοί μεταφοράς κατέχουν την πλειοψηφία αυτών. Τέλος, για το ηλεκτρικό δίκτυο μεταφοράς της Πορτογαλίας [31], οι αντίστοιχες εκπομπές εκτιμάται ότι συμβάλλουν κατά 5% - 14%, στις συνολικές εκπομπές από το ηλεκτρικό δίκτυο της χώρας.

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, οι περισσότερες ΑΚΖ που δίνουν εκτίμηση των εκπομπών CO_{2eq}/kWh για μια χώρα [13, 33], αναφέρονται στο δίκτυο παραγωγής της χώρας. Εξαιρέση αποτελούν δύο μελέτες, για την Πορτογαλία [31] και την Κίνα [41], οι οποίες υπολογίζουν τις αθροιστικές εκπομπές από το δίκτυο παραγωγής και μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας της κάθε χώρας. Για κάποιες χώρες του ΟΟΣΑ, μερικές ενδεικτικές τιμές για τις εκπομπές GHG, παρουσιάζονται στη συνέχεια. Η τιμές αυτές, που αναφέρονται στη βιβλιογραφία [33], βασίζονται σε μετρήσεις με βάση τα διαθέσιμα στοιχεία για το ενεργειακό μίγμα των χωρών αυτών, της περιόδου 2006 – 2008 και είναι: Γαλλία (περίπου 100 gr CO_{2eq}/kWh), Ελβετία (200 gr CO_{2eq}/kWh), Ισπανία (400 gr CO_{2eq}/kWh), Γερμανία και Τουρκία (περίπου 600 gr CO_{2eq}/kWh), ΗΠΑ (650 gr CO_{2eq}/kWh) και τέλος οι χώρες Ελλάδα, Πολωνία, Τσεχία, οι οποίες εμφανίζουν τα υψηλότερα ποσοστά εκπομπών από τις χώρες του ΟΟΣΑ (κοντά στα 900 gr CO_{2eq}/kWh). Σε μία άλλη συγκριτική ΑΚΖ, που έγινε για τη χώρα του Μεξικού το 2010 [13], παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των εκπομπών GHG των χωρών Αγγλία (597 gr CO_{2eq}/kWh), Ιταλία (634 gr CO_{2eq}/kWh), Μεξικό (571 gr CO_{2eq}/kWh) και Πορτογαλία (611 gr CO_{2eq}/kWh). Τέλος, η ανάλυση κύκλου ζωής για το δίκτυο παραγωγής και μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας στην Κίνα [41], μετρήθηκε ότι εκπέμπει 1.104 gr CO_{2eq}/kWh.

2.3. Συμπεράσματα βιβλιογραφικής ανασκόπησης

Μέσα από τη βιβλιογραφική ανασκόπηση των μελετών ανάλυσης κύκλου ζωής, βγαίνουν αρκετά συμπεράσματα για τη μεθοδολογία που πρέπει να ακολουθήσουν παρόμοιες μελέτες, στο μέλλον. Το βασικό συμπέρασμα, σε γενικές γραμμές, είναι ότι

για να μελετηθούν οι εκπομπές, αερίων του θερμοκηπίου, από το ηλεκτρικό δίκτυο μιας χώρας και κατ'επέκταση οι επιπτώσεις αυτών στην ανθρώπινη υγεία και στο περιβάλλον, πρέπει να αξιολογηθεί, ξεχωριστά, το δίκτυο παραγωγής και μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας της χώρας [31]. Οι εκπομπές GHG από τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας δεν θα πρέπει να θεωρούνται αμελητέες, ωστόσο τα αποτελέσματα, ως προς την περιβαλλοντική αξιολόγησή τους, υπερτερούν σε σχέση με τις μονάδες παραγωγής συμβατικού καυσίμου. Πιο συγκεκριμένα, το στάδιο με τις μεγαλύτερες περιβαλλοντικές επιπτώσεις, στον άνθρωπο και στο περιβάλλον, από τις μονάδες ηλεκτροπαραγωγής με ορυκτά καύσιμα, είναι το στάδιο λειτουργίας (operation) των σταθμών. Όσον αφορά τις μονάδες ΑΠΕ, το στάδιο που συνεισφέρει περισσότερο, είναι αυτό της εξόρυξης και επεξεργασίας (manufacturing and processing) των πρώτων υλών καθώς και το στάδιο της κατασκευής των σταθμών (construction and installation) [39].

Σημαντικός παράγοντας για την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων μιας AKZ, ως προς το σύνολο της περιβαλλοντικής αξιολόγησης των μονάδων ηλεκτροπαραγωγής, είναι η εξέταση και άλλων δεικτών, πέρα της υπερθέρμανσης του πλανήτη. Τέτοιοι περιβαλλοντικοί δείκτες μπορεί να είναι αυτοί που αναφέρονται στην οξίνιση και στον ευτροφισμό, με άλλα λόγια η εξέταση εκτός του αερίου CO₂ και των αερίων SO₂ και NO_x [32]. Ξεχωριστή επισήμανση θα πρέπει να γίνει και για τα διαφορετικά αποτελέσματα που βγάζουν ορισμένες μελέτες AKZ, ως προς τις εκπομπές των μονάδων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, της ίδιας τεχνολογίας. Για τις άμεσες εκπομπές, από μονάδες ηλεκτροπαραγωγής, που αναφέρονται στον ίδιο τύπο (συμβατικού) καυσίμου, σε διαφορετικές περιοχές, οι διακυμάνσεις που συχνά εμφανίζονται μπορεί να οφείλονται αφενός, στη μεθοδολογική προσέγγιση που ακολουθήθηκε στην κάθε μελέτη περίπτωσης ξεχωριστά και, αφετέρου στη διαφορετική τεχνολογία κάθε μονάδας, στην θερμική απόδοσή της, στην θερμογόνο

δύναμη του κάθε καυσίμου κ.α. [9]. Αντίστοιχα, για τις μονάδες ΑΠΕ, μπορεί να παρατηρηθούν μεγάλες διακυμάνσεις στα αποτελέσματα των εκπομπών, ίδιας τεχνολογίας ΑΠΕ, αν ληφθούν υπόψη συγκεκριμένα κλιματολογικά και γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά της υπό εξέταση περιοχής, σε σχέση με κάποια άλλη [1, 3, 4, 9, 10, 12, 21, 26, 32, 23,28-39].

Τέλος, θα πρέπει να γίνει κατανοητό πως για την εκτίμηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων, από το ηλεκτρικό δίκτυο μιας χώρας σε ολόκληρο τον κύκλο ζωής του, θα πρέπει να μελετηθεί η επίδραση όλης της βιομηχανίας που είναι υπεύθυνη για την παραγωγή, τη μεταφορά και τη διανομή της ηλεκτρικής ενέργειας, στις εκπομπές GHG [31]. Έτσι, θα πρέπει να ξεπεραστούν τα προβλήματα που εμφανίζονται στη μελέτη του δικτύου μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας μιας χώρας, όπως για παράδειγμα του μεγάλου χρόνου ζωής και λειτουργίας των δικτύων και, να μοντελοποιηθούν με βάση ένα στατικό ενεργειακό μίγμα, σταθερές απώλειες δικτύου και σταθερή διάρκεια ζωής, των υποδομών του δικτύου [16].

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 – ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΥΚΛΟΥ ΖΩΗΣ (ΑΚΖ)

Στο Κεφάλαιο 3 παρουσιάζεται η μέθοδος της Ανάλυσης Κύκλου Ζωής, ΑΚΖ (Life Cycle Assessment, LCA), για ένα προϊόν ή μια υπηρεσία. Πιο συγκεκριμένα, καταγράφονται τα πλεονεκτήματα της εφαρμογής της καθώς και τα κριτήριά της. Στη συνέχεια, αναλύονται τα στάδια που ακολουθούνται σε μια ΑΚΖ, σύμφωνα με τον διεθνή οργανισμό τυποποίησης ISO.

3.1. Μεθοδολογία Ανάλυσης Κύκλου Ζωής

Η Ανάλυση Κύκλου Ζωής (ΑΚΖ) είναι μία μέθοδος κατά την οποία γίνεται μια ποιοτική αλλά και ποσοτική καταγραφή των περιβαλλοντικών πιέσεων και των ενδεχόμενων αρνητικών επιπτώσεων που σχετίζονται με ένα προϊόν, μια διεργασία ή μια υπηρεσία [20]. Η ΑΚΖ είναι ένα εργαλείο για την εκτίμηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων από ένα προϊόν (ή υπηρεσία), σε ολόκληρο τον κύκλο ζωής του (“cradle to grave”). Δηλαδή, από τη συλλογή των πρώτων υλών για την παραγωγή του προϊόντος έως την τελική διάθεση και απόθεση των αποβλήτων [27].

Η πετρελαϊκή κρίση στα τέλη του 1960 ήταν η αιτία για την πρώτη χρήση της ανάλυσης του κύκλου ζωής, που οδήγησε στην προσπάθεια εύρεσης νέων και πιο αποδοτικών πηγών ενέργειας. Στις αρχές της δεκαετίας του '70 προστέθηκαν στους παράγοντες που ευνόησαν την ανάπτυξη της ανάλυσης του κύκλου ζωής η υποβάθμιση των φυσικών πηγών ενέργειας, οι εκπομπές αερίων στην ατμόσφαιρα, η ρύπανση του νερού και το πρόβλημα της διάθεσης των αποβλήτων [30]. Ως μέθοδος έχει γίνει, στις μέρες μας, ευρέως αποδεχτή από την επιστημονική κοινότητα ως το πλέον διαδεδομένο και αξιόπιστο εργαλείο εκτίμησης των επιδράσεων στο περιβάλλον, που προκαλούν τα προϊόντα και οι υπηρεσίες [28]. Η ΑΚΖ αξιολογεί το συνολικό περιβαλλοντικό αντίκτυπο ενός προϊόντος ή μιας υπηρεσίας, είναι δηλαδή μία ολιστική διαδικασία, ενώ

εξετάζει ποικίλες και διαφορετικές μεταξύ τους κατηγορίες περιβαλλοντικών επιπτώσεων [25].

Σύμφωνα με το διεθνές πρότυπο ISO 14040 [20] η AKZ μεταφράζει την απογραφή των σχετικών ροών ενέργειας και υλικών, που εισάγονται σ'ένα σύστημα, καθώς και των εκπομπών στο περιβάλλον. Κάνει αποτίμηση των ενδεχόμενων περιβαλλοντικών επιπτώσεων που έχουν σχέση με τις συγκεκριμένες εισροές και εκροές ενώ, τέλος, ερμηνεύει τα αποτελέσματά της, έτσι ώστε να αποτελέσουν ένα σημαντικό βοήθημα περιβαλλοντικής διαχείρισης και εργαλείο λήψης αποφάσεων.

Μερικά από τα πλεονεκτήματα της AKZ είναι ότι:

- a) αναπτύσσει σύνθετη αποτίμηση των περιβαλλοντικών συνεπειών που σχετίζονται με ένα συγκεκριμένο προϊόν
- b) πραγματοποιεί ποσοτικούς προσδιορισμούς των περιβαλλοντικών εκροών σε αέρα, νερό και έδαφος, σε κάθε στάδιο του κύκλου ζωής
- c) προσδιορίζει κάθε σημαντική μετακίνηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων μεταξύ των σταδίων του κύκλου ζωής και των περιβαλλοντικών μέσων
- d) κάνει αποτίμηση των αρνητικών επιπτώσεων στον άνθρωπο και στην οικολογία, από την κατανάλωση υλικών αγαθών και των εκροών τους στο περιβάλλον, στα όρια μιας τοπικής κοινωνίας, μιας γεωγραφικής περιοχής αλλά και σε ολόκληρο τον κόσμο
- e) συγκρίνει τις επιπτώσεις στην υγεία και στην οικολογία, δύο ή περισσότερων εφάμιλλων προϊόντων/μεθόδων αλλά και προσδιορίζει τις επιπτώσεις ενός συγκεκριμένου προϊόντος ή μιας συγκεκριμένης μεθόδου, τέλος
- f) προσδιορίζει τις επιπτώσεις μέσω των περιβαλλοντικών δεικτών αξιολόγησης (όπως αναφέρθηκαν στο κεφάλαιο 1) δίνοντας όμως μεγαλύτερη προσοχή στους τομείς που υπάρχει μεγαλύτερη ανησυχία.

Σύμφωνα με το Διεθνή οργανισμό για την τυποποίηση ISO, η μεθοδολογία για την ανάλυση κύκλου ζωής προϊόντων, αγαθών και υπηρεσιών, αποτελείται από τέσσερα στάδια: (α) τον καθορισμό του σκοπού και του στόχου της εργασίας, (β) την απογραφή του κύκλου ζωής, (γ) την εκτίμηση των επιπτώσεων του κύκλου ζωής και (δ) την ερμηνεία των αποτελεσμάτων. Στη συνέχεια, αναπτύσσονται αναλυτικά τα τέσσερα στάδια της Ανάλυσης Κύκλου Ζωής.

3.1.1. Καθορισμός σκοπού και στόχου εργασίας (goal and scope definition)

Στο στάδιο αυτό τοποθετείται το πλαίσιο στο οποίο θα διεξαχθεί η εργασία και προσδιορίζονται τα όρια και οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις που θα μελετηθούν. Βασικοί παράμετροι που θα πρέπει να καθοριστούν σ' αυτό το, αρχικό, στάδιο της AKZ είναι η λειτουργική μονάδα αναφοράς, τα όρια του συστήματος και οι διάφοροι περιορισμοί της ανάλυσης.

Η λειτουργική (/μετρητική) μονάδα αναφοράς (functional unit) είναι ένα από τα βασικά στοιχεία της AKZ που πρέπει να προσδιορισθεί. Καθορίζει την κλίμακα για τη σύγκριση δύο ή περισσότερων προϊόντων με διαφορετικά χαρακτηριστικά και ποσοτικοποιεί τις επιδόσεις ενός προϊόντος ή μιας υπηρεσίας. Είναι ένα μέτρο της λειτουργίας του υπό μελέτη συστήματος και έχει ως στόχο την παροχή μιας αναφοράς, με την οποία θα σχετίζονται οι εισροές και οι εκροές του υπό μελέτη συστήματος.

Τα όρια του συστήματος (system boundaries) καθορίζουν ποιές διεργασίες θα πρέπει να συμπεριληφθούν στην AKZ και ποιές θα πρέπει να μείνουν εκτός. Ο καθορισμός των ορίων του συστήματος είναι σχετικά υποκειμενικός και εξαρτάται από πολλούς παράγοντες όπως για παράδειγμα, από το ποιά είναι η εκάστοτε εφαρμογή της μεθόδου, ποιοί είναι το κοινό στο οποίο απευθύνεται η μελέτη, ποιοί είναι οι λόγοι διεξαγωγής της AKZ (π.χ. συγκριτική AKZ ή όχι) κ.α.. Καθίσταται έτσι φανερό ότι θέτοντας συγκεκριμένες διεργασίες ή τμήματα εκτός των ορίων του συστήματος, τα

αποτελέσματα που θα προκύψουν δεν θα είναι ακριβή, με άμεση συνέπεια την αλλοίωση του τελικού αποτελέσματος [8].

Τέλος, μερικοί περιορισμοί (constraints) που εμφανίζονται συνήθως σε μια ΑΚΖ μπορεί να είναι τα όρια μεταξύ της παραγωγικής μονάδας και του περιβάλλοντος, οι γεωγραφικοί περιορισμοί, οι περιορισμοί ανάμεσα στον κύκλο ζωής και τους κύκλους ζωής άλλων σχετικών τεχνικών συστημάτων.

Η εγκυρότητα των αποτελεσμάτων της ΑΚΖ εξαρτάται, έτσι, σε μέγιστο βαθμό από την ποιότητα και τις πηγές των δεδομένων που εισάγονται. Κατά τη συλλογή των δεδομένων θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη παράμετροι όπως το χρονικό, γεωγραφικό και τεχνολογικό εύρος των πηγών, η ακρίβεια και η αξιοπιστία τους, η βάση κατανομής που θα χρησιμοποιηθεί, τα όρια του συστήματος, καθώς και η εγκυρότητα των μεθόδων που χρησιμοποιούνται για τη συλλογή τους [18].

3.1.2. Απογραφή κύκλου ζωής (Life Cycle Inventory, LCI)

Στο δεύτερο στάδιο συλλέγονται, οργανώνονται και επεξεργάζονται όλα τα δεδομένα που έχουν σχέση με την εκτίμηση του κύκλου ζωής και αποτελεί τη βάση για την εκτίμηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων. Η ακρίβεια και η εγκυρότητα των δεδομένων που συλλέγονται, καθορίζουν και την εγκυρότητα των αποτελεσμάτων της ΑΚΖ συνολικά.

Κάθε προϊόν, στο στάδιο αυτό, πρέπει να παρουσιάζεται ως ένα σύστημα, το οποίο καθορίζεται από ένα σύνολο διεργασιών που συνδέονται μεταξύ τους. Για τον ακριβή προσδιορισμό του συστήματος θα πρέπει να ποσοτικοποιηθούν οι ροές μάζας και ενέργειας, που ανταλλάσσονται μεταξύ του συστήματος και του περιβάλλοντός του. Τα δεδομένα, λοιπόν, είναι οι εισροές και οι εκροές από κάθε διεργασία. Η συλλογή των αριθμητικών δεδομένων είναι μια χρονοβόρα διαδικασία η οποία περιλαμβάνει τρία βασικά στάδια: (α) έρευνα παλαιότερων επιστημονικών εργασιών και των

αποτελεσμάτων τους πάνω στο συγκεκριμένο αντικείμενο, (β) αναζήτηση σχετικών πληροφοριών στο διαδίκτυο και (γ) επαφή με οργανισμούς και ανθρώπους που σχετίζονται με τον τομέα αυτό. Με αυτό τον συνδυασμό συλλέγεται μεγάλη ποσότητα δεδομένων. Για την τήρηση και την επεξεργασία των δεδομένων απαιτείται η αντίστοιχη βάση δεδομένων ή φύλλο εργασίας, συχνά με τη χρήση κατάλληλων λογισμικών πακέτων [49].

Το αποτέλεσμα της απογραφής του κύκλου ζωής είναι μια λίστα υλικών και ενέργειας που καταναλώθηκαν, η οποία περιέχει τις ποσότητες των ρύπων που ελευθερώθηκαν στο περιβάλλον. Οι πληροφορίες μπορούν να διαχωριστούν με βάση το στάδιο του κύκλου ζωής, του μέσου στο οποίο ελευθερώθηκαν οι ρύποι (αέρας, νερό, έδαφος), μιας οποιασδήποτε διεργασίας ή για κάθε συνδυασμό αυτών.

3.1.3. Εκτίμηση επιπτώσεων κύκλου ζωής (Life Cycle Impact Assessment, LCIA)

Στο στάδιο αυτό μιας ΑΚΖ, πραγματοποιείται η εκτίμηση των επιπτώσεων στην ανθρώπινη υγεία και στο περιβάλλον, από τις περιβαλλοντικές πηγές και τις εκροές του υπό μελέτη συστήματος, κατά τα στάδια του κύκλου ζωής του. Η διαδικασία της αξιολόγησης των επιπτώσεων του κύκλου ζωής, προωθεί μια συστηματική διαδικασία για την κατάταξη και τον χαρακτηρισμό αυτών των τύπων των περιβαλλοντικών επιπτώσεων. Έτσι, δίνεται έμφαση στην προσπάθεια εκτίμησης των ποσοτικών αυτών δεδομένων όσον αφορά την περιβαλλοντική σημασία τους.

Η διαδικασία του προσδιορισμού των επιπτώσεων συντελείται από τις παρακάτω διακριτές ενέργειες [45]:

- (α) κατηγοριοποίηση
- (β) χαρακτηρισμός
- (γ) κανονικοποίηση
- (δ) ομαδοποίηση και

(ε) στάθμιση.

Οι ενέργειες αυτές, μετατρέπουν τα αποτελέσματα της LCI σε ένα δείκτη για κάθε κατηγορία επιπτώσεων. Ο σκοπός τους, δηλαδή, είναι η απόδοση ενός ενιαίου δείκτη επιπτώσεων, χρησιμοποιώντας αριθμητικούς συντελεστές κανονικοποίησης και στάθμισης. Με την κατηγοριοποίηση και τον χαρακτηρισμό δίνεται ένα περιβαλλοντικό προφίλ στο προϊόν (ή υπηρεσία) ενώ στη συνέχεια γίνεται η αξιολόγηση του περιβαλλοντικού προφίλ, σε ένα πίνακα δεδομένων. Έτσι, γίνεται ευκολότερη η σύγκριση και η αποτίμηση της αξιοπιστίας του αποτελέσματος. Η αποτίμηση πραγματοποιείται σε 4 στάδια: (α) προσδιορισμός της επιβάρυνσης των περιβαλλοντικών προβλημάτων, (β) μετατροπή του περιβαλλοντικού προφίλ σε περιβαλλοντικό πίνακα, (γ) έλεγχος ορθότητας του αποτελέσματος και (δ) επισκόπηση της LCA από εξωτερικούς μελετητές.

3.1.4. Ερμηνεία αποτελεσμάτων (Interpretation)

Το τελικό βήμα μιας AKZ αποτελεί μια συστηματική τεχνική για την ταυτοποίηση, τον ποσοτικό προσδιορισμό, τον έλεγχο και την εκτίμηση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από την απογραφή του κύκλου ζωής (LCI) καθώς και από την αξιολόγηση των επιπτώσεων του κύκλου ζωής (LCIA). Τα βήματα της ερμηνείας των αποτελεσμάτων του κύκλου ζωής είναι τα εξής [42]: (α) προσδιορισμός των σημαντικότερων περιβαλλοντικών επιπτώσεων και (β) αποτίμηση της πληρότητας, της ευαισθησίας και της συνοχής των δεδομένων. Το βήμα της ερμηνείας των αποτελεσμάτων προσδιορίζει το όριο εμπιστοσύνης και αξιοπιστίας των αποτελεσμάτων της AKZ.

Τα αποτελέσματα αξιολογούνται με ελέγχους συνέπειας των υποθέσεων που υιοθετήθηκαν, καθώς και των μεθόδων, προτύπων και δεδομένων που χρησιμοποιήθηκαν. Παράλληλα, γίνονται έλεγχοι συνέπειας και πληρότητας σε όλο το

εύρος των μεθοδολογικών εργαλείων και των διαφόρων πρακτικών. Γίνονται επίσης αναλύσεις ευαισθησίας, οι οποίες μελετούν την επίδραση στα αποτελέσματα από μεταβολές του συστήματος. Η εκτίμηση βελτιώσεων αποτελεί μια συστηματική αξιολόγηση των αναγκών και περιθωρίων για μείωση της περιβαλλοντικής επιβάρυνσης που συνδέεται με τη χρήση ενέργειας, πρώτων υλών και περιβαλλοντικών εκπομπών καθ' όλη τη διάρκεια του κύκλου ζωής προϊόντων και διεργασιών [47].

3.2. Υπολογιστικά εργαλεία για AKZ

Για την επεξεργασία των δεδομένων έχουν αναπτυχθεί διάφορα υπολογιστικά εργαλεία, όπως τα SimaPro, GaBi, RETScreen κ.α. Για την ανάλυση του κύκλου ζωής του ελληνικού δικτύου παραγωγής και μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας χρησιμοποιείται το λογισμικό πρόγραμμα SimaPro 7.1. Η περιβαλλοντική αξιολόγηση βασίζεται στις εκπομπές λόγω των βασικών υλικών και των απαιτούμενων για την παραγωγή τους διαδικασιών, οι οποίες καταχωρούνται στις βάσεις δεδομένων του προγράμματος. Το SimaPro υπολογίζει τις εκπομπές που προκύπτουν καθ' όλη τη διάρκεια του κύκλου ζωής του προϊόντος, δημιουργώντας μία πυραμίδα στην κορυφή της οποίας βρίσκονται οι συνολικές εκπομπές και οι οποίες αναλύονται σε όλο και απλούστερες διαδικασίες, καταλήγοντας στη βάση της πυραμίδας [50].

3.2.1. SimaPro 7.1.

Το λογισμικό SimaPro δημιουργήθηκε και διατίθεται από την εταιρεία Pre-Consultants B.V. Αποτελεί ένα ευρέως διαδομένο εργαλείο Ανάλυσης Κύκλου Ζωής παρέχοντας ιδιαίτερα εξειδικευμένες διεργασίες, παραμένοντας ταυτόχρονα αρκετά εύχρηστο. Διαθέτει μεγάλο όγκο παρεχόμενων δεδομένων, σε (προ)εγκατεστημένες βάσεις δεδομένων και βιβλιοθήκες στο παρεχόμενο λογισμικό. Τα δεδομένα είναι καταναμημένα σε ξεχωριστές βιβλιοθήκες, υποστηριζόμενες από όλο το εύρος των

δυνατών διεργασιών ή διαδικασιών. Η επεξεργασία των αποτελεσμάτων παρουσιάζεται σε ραβδογράμματα και πίνακες, με τις πιο σημαντικές πληροφορίες.

Μερικές από τις χαρακτηριστικές, βασικές, κατηγορίες επιπτώσεων για τον άνθρωπο και το περιβάλλον είναι (α) το φαινόμενο του θερμοκηπίου (GWP), που μετριέται σε σχέση με την επίδραση που έχει 1kg CO₂, (β) το φωτοχημικό νέφος (POCP), που μετριέται σε σχέση με την επίδραση που έχει 1 kg αιθυλενίου, (γ) η οξίνιση του περιβάλλοντος (AP), που μετριέται σε σχέση με την επίδραση που έχει 1kg SO₂, η καταστροφή της στοιβάδας του όζοντος (ODP) και άλλα [35].

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 – ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Στο κεφάλαιο 4 αρχικά περιγράφεται η δομή του ελληνικού συστήματος παραγωγής και μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας και οι αρμόδιες υπηρεσίες. Στη συνέχεια γίνεται διαχωρισμός του ελληνικού δικτύου, στο διασυνδεδεμένο δίκτυο (ηπειρωτικό) και το δίκτυο των μη διασυνδεδεμένων νησιών (απομονωμένο). Καταγράφονται, τα στοιχεία του ελληνικού δικτύου για τις μονάδες παραγωγής, την εγκατεστημένη ισχύ, την παραγωγή ενέργειας ανά σταθμό και τύπο καυσίμου, καθώς και στοιχεία για τις γραμμές μεταφοράς υψηλής και υπερυψηλής τάσης (150, 400 kV).

4.1. Επιχειρηματική δομή και οργάνωση ελληνικού συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας

Η Δημόσια Επιχείρηση Ηλεκτρισμού Α.Ε. (ΔΕΗ) είναι η μεγαλύτερη εταιρία παραγωγής και προμήθειας ηλεκτρικής ενέργειας στην Ελλάδα. Διαθέτει μια μεγάλη υποδομή σε εγκαταστάσεις ορυχείων για την εξαγωγή λιγνίτη, μονάδες παραγωγής, μεταφοράς και διανομής ηλεκτρικής ενέργειας. Κατέχει περίπου το 68% της εγκατεστημένης ισχύος των σταθμών ηλεκτροπαραγωγής στην Ελλάδα συμπεριλαμβάνοντας στο ενεργειακό της μείγμα λιγνιτικούς, υδροηλεκτρικούς και πετρελαϊκούς σταθμούς, καθώς και σταθμούς φυσικού αερίου, αλλά και μονάδες ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (ΑΠΕ). [53]

Ο Ανεξάρτητος Διαχειριστής Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΑΔΜΗΕ) Α.Ε. αποτελεί 100% θυγατρική εταιρεία της ΔΕΗ Α.Ε. η οποία συστάθηκε σε συμμόρφωση με τις διατάξεις της Οδηγίας 2009/72/ΕΚ της Ευρωπαϊκής Ένωσης. Ο ΑΔΜΗΕ αναλαμβάνει το ρόλο του Διαχειριστή του Ελληνικού Συστήματος Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΕΣΜΗΕ) και συγκεκριμένα τα καθήκοντα λειτουργίας, συντήρησης και ανάπτυξης του ΕΣΜΗΕ ενσωματώνοντας τα αντίστοιχα καθήκοντα και λειτουργίες που αποτελούσαν αρμοδιότητα του ΔΕΣΜΗΕ ως Διαχειριστή του

Συστήματος και της Γενικής Διεύθυνσης Μεταφοράς της ΔΕΗ ως Κυρίου του Συστήματος. [51]

Η ΔΕΔΔΗΕ Α.Ε. (Διαχειριστής του Ελληνικού Δικτύου Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας) συστάθηκε με την απόσχιση του κλάδου Διανομής της ΔΕΗ Α.Ε. σύμφωνα με το Ν. 4001/2011 και σε συμμόρφωση με την Οδηγία 2009/72/ΕΚ της Ευρωπαϊκής Ένωσης. Είναι κατά 100% θυγατρική εταιρεία της ΔΕΗ Α.Ε., ωστόσο είναι ανεξάρτητη λειτουργικά και διοικητικά, τηρώντας όλες τις απαιτήσεις ανεξαρτησίας που ενσωματώνονται στο παραπάνω νομικό πλαίσιο. Έργο της εταιρείας είναι η λειτουργία, η συντήρηση και η ανάπτυξη του δικτύου διανομής ηλεκτρικής ενέργειας στην Ελλάδα και η διασφάλιση της διαφανούς και αμερόληπτης πρόσβασης των καταναλωτών και γενικότερα όλων των χρηστών του δικτύου. [52]

Η Ρυθμιστική Αρχή Ενέργειας (ΡΑΕ) είναι ανεξάρτητη ρυθμιστική αρχή, η οποία συστήθηκε με το ν.2773/1999, στο πλαίσιο εναρμόνισης με τις Οδηγίες 2003/54/ΕΚ και 2003/55/ΕΚ για τον ηλεκτρισμό και το φυσικό αέριο, με κύρια αρμοδιότητά της να εποπτεύει την εγχώρια αγορά ενέργειας, σε όλους τους τομείς της, εισηγούμενη προς τους αρμόδιους φορείς της Πολιτείας και λαμβάνοντας η ίδια μέτρα για την επίτευξη του στόχου της απελευθέρωσης των αγορών ηλεκτρικής ενέργειας και φυσικού αερίου. Οι κυριότερες, αποφασιστικού χαρακτήρα, αρμοδιότητες της ΡΑΕ στον ηλεκτρισμό και το φυσικό αέριο, συνοπτικά αφορούν [55]:

- a) παρακολούθηση και εποπτεία της αγοράς ενέργειας
- b) προστασία των καταναλωτών
- c) παρακολούθηση της ασφάλειας του ενεργειακού εφοδιασμού της χώρας
- d) χορήγηση αδειών
- e) εποπτεία επί των Ανεξάρτητων Διαχειριστών Μεταφοράς
- f) έγκριση τιμολογίων μη ανταγωνιστικών δραστηριοτήτων

- g) χορήγηση εξαιρέσεων από υποχρεώσεις παροχής πρόσβασης τρίτων
- h) παρακολούθηση πρόσβασης στις ενεργειακές διασυνδέσεις
- i) λήψη ρυθμιστικών μέτρων για την εύρυθμη λειτουργία των ενεργειακών αγορών.

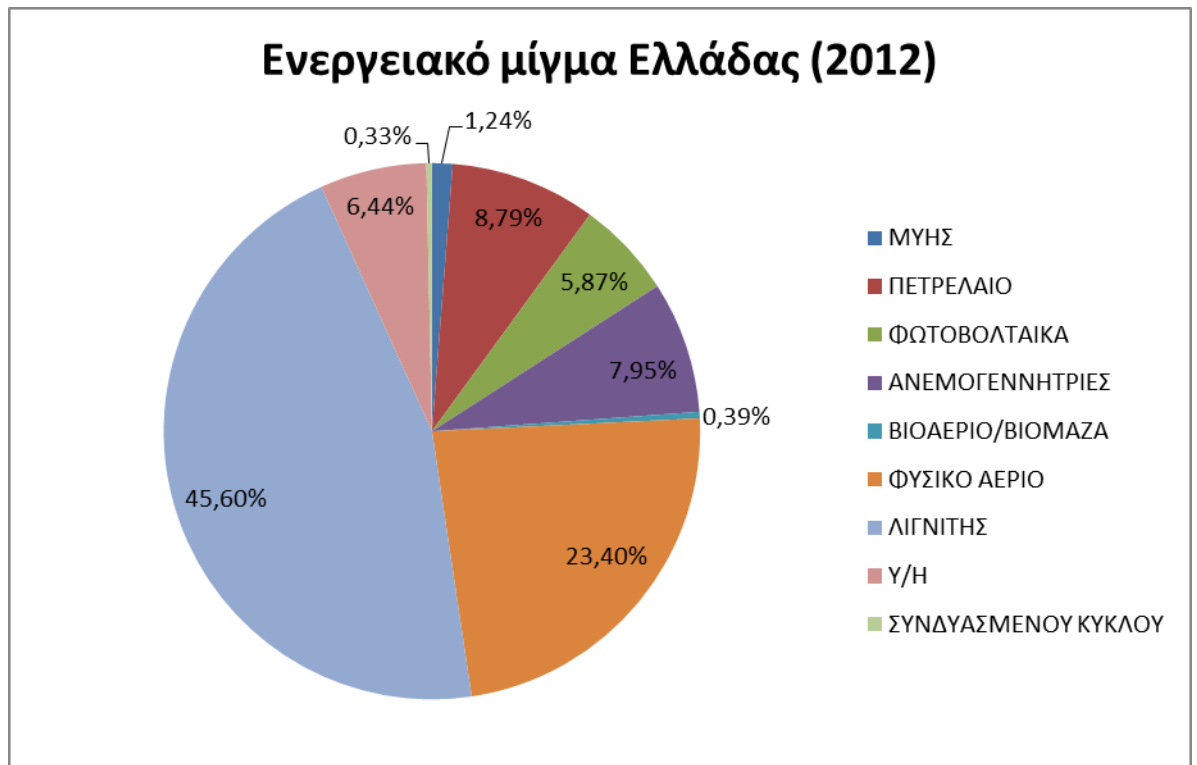
Ο Λειτουργός της Αγοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας ΑΕ (ΛΑΓΗΕ ΑΕ) ιδρύθηκε με βάση το ν 4001/2011 για τη Λειτουργία Ενεργειακών Αγορών Ηλεκτρισμού και Φυσικού Αερίου, για Έρευνα, Παραγωγή και δίκτυα μεταφοράς Υδρογονανθράκων και άλλες ρυθμίσεις (ΦΕΚ 179/22-8-2011). Ο ΛΑΓΗΕ εφαρμόζει τους κανόνες για τη λειτουργία της Αγοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας σύμφωνα με τις διατάξεις του νόμου 4001/2011 και των κατ' εξουσιοδότηση αυτού εκδιδόμενων πράξεων και ιδίως τον Ημερήσιο Ενεργειακό Προγραμματισμό. [54]

4.2. Περιγραφή μονάδων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας

Το ηλεκτρικό δίκτυο της Ελλάδας, εξαιτίας της μορφολογίας της χώρας, χωρίζεται στο Διασυνδεδεμένο δίκτυο (ηπειρωτικό) και στο Μη Διασυνδεδεμένο δίκτυο (απομονωμένο), όπου συμπεριλαμβάνονται όλα τα νησιά, τα οποία δεν έχουν συνδεθεί με το ηπειρωτικό δίκτυο. Η συνολική παραγωγή ενέργειας και από τα δύο δίκτυα, για το έτος 2012, ξεπερνάει τις 55 TWh και το ενεργειακό μίγμα αποτελείται, συνολικά, από 9 τύπους καυσίμου: (α) μικροί Υ/Η σταθμοί, (β) θερμικοί σταθμοί πετρελαίου diesel, (γ) φωτοβολταϊκά, (δ) ανεμογεννήτριες, (ε) Βιοαέριο/Βιομάζα, (στ) φυσικό αέριο, (ζ) λιγνίτης, (η) μεγάλα Υ/Η και (θ) μονάδες συνδυασμένου κύκλου (Εικόνα 4.1).

Ξεχωριστή αναφορά πρέπει να γίνει για τη συμμετοχή, των δύο ανεξάρτητων δικτύων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, στο ενεργειακό σύστημα. Τα Μη Διασυνδεδεμένα Νησιά κατέχουν το 10% περίπου της συνολικής παραγωγής ενώ, το Διασυνδεδεμένο δίκτυο είναι αυτό που υπερισχύει στην ηλεκτροπαραγωγή της χώρας κατά 90% (Εικόνα 4.2). Αντίστοιχα, όπως θα δούμε αναλυτικά και στη συνέχεια, το ενεργειακό μίγμα του

απομονωμένου δικτύου αποτελείται από 4 τύπους καυσίμων ενώ του διασυνδεδεμένου δικτύου από 9 τύπους καυσίμου (Εικόνες 4.4 και 4.3, αντίστοιχα).

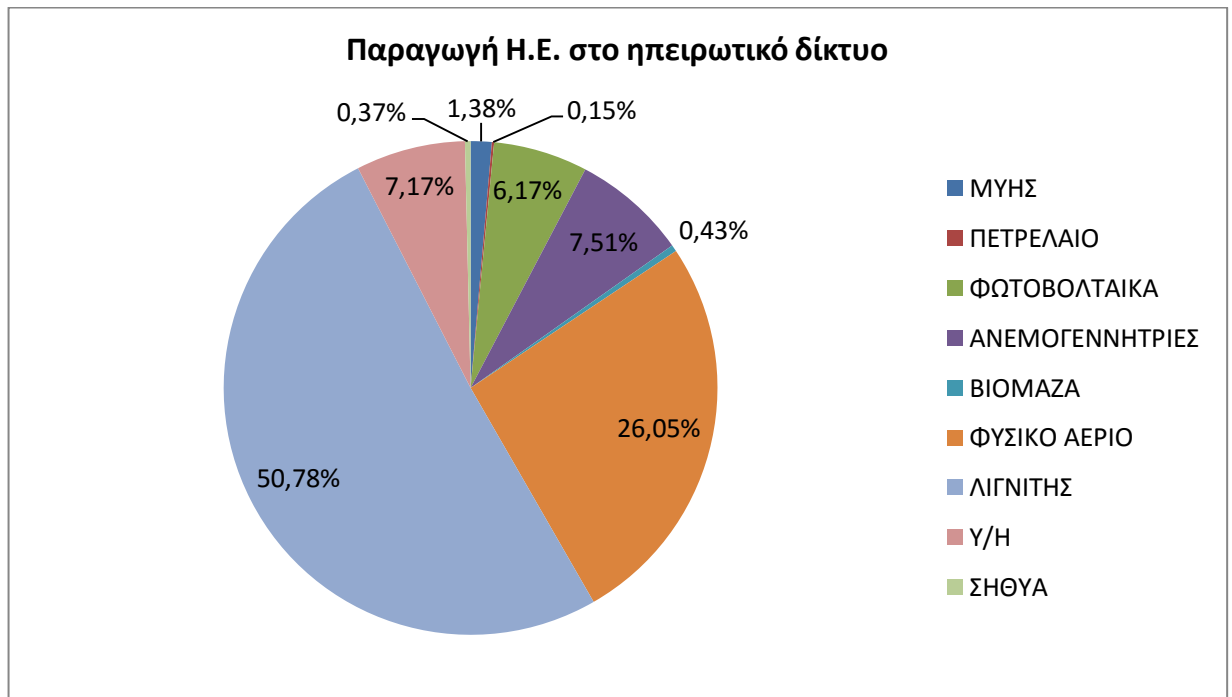


Εικόνα 4.1: Ενεργειακό μίγμα του ελληνικού δικτύου παραγωγής Η.Ε. [44, 48]



Εικόνα 4.2: Συμμετοχή του Διασυνδεδεμένου και Μη Διασυνδεδεμένου δικτύου στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας της Ελλάδας [44, 48]

4.2.1. Διασυνδεδεμένο δίκτυο (Ηπειρωτικό)



Εικόνα 4.3.: Συνολική παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας στο Διασυνδεδεμένο δίκτυο, για Θερμικές μονάδες [44] και ΑΠΕ [48]

Η πλειονότητα του συστήματος ηλεκτροπαραγωγής (58.8% της συνολικής εγκατεστημένης ισχύος, Πίνακας 4.1.), στο ηπειρωτικό δίκτυο, αποτελείται από θερμικές μονάδες, οι οποίες περιλαμβάνουν λιγνιτικές, πετρελαϊκές και μονάδες φυσικού αερίου, όπως φαίνεται και στον Πίνακα 4.2. Οι μονάδες αυτές καλύπτουν και το μεγαλύτερο μέρος της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας (78.6% για το 2012). Οι κύριοι λιγνιτικοί σταθμοί βρίσκονται στην περιοχή της Πτολεμαΐδας, στη βόρεια Ελλάδα και στη περιοχή της Μεγαλόπολης, στην Πελοπόννησο. Οι πετρελαϊκοί σταθμοί και οι μονάδες φυσικού αερίου βρίσκονται κυρίως κοντά στην περιοχή της πρωτεύουσας, όπου συγκεντρώνεται περίπου το 30% της συνολικής κατανάλωσης του Συστήματος. Ο στόλος των θερμικών μονάδων μπορεί να χαρακτηριστεί πεπαλαιωμένος σε γενικές γραμμές, αφού οι περισσότερες μονάδες έχουν συμπληρώσει πάνω από είκοσι χρόνια

λειτουργίας, αν και την τελευταία δεκαετία προστέθηκαν στο Σύστημα περίπου 3.700 MW από νέες μονάδες φυσικού αερίου. Πάντως την τελευταία πενταετία τέθηκαν σε εμπορική λειτουργία πέντε νέες μονάδες συνδυασμένου κύκλου συνολικής καθαρής ισχύος 2.032 MW. [43]

Έως το τέλος του Μαΐου του 2013, στο ΕΣΜΗΕ λειτουργούσαν σταθμοί ΑΠΕ συνολικής εγκατεστημένης ισχύος 4.170 MW, εκ των οποίων τα 1.495 MW αφορούν ανεμογεννήτριες και τα 2.322 MW φωτοβολταϊκά (συμπεριλαμβανομένων των Φ/Β του Ειδικού Προγράμματος ΦΕΚ Β 1079/2009). Παράλληλα, ο ΑΔΜΗΕ (μέχρι πρότινος ο ΔΕΣΜΗΕ) έχει χορηγήσει Δεσμευτικές Προσφορές Σύνδεσης για επιπλέον 600 σταθμούς ΑΠΕ συνολικής εγκατεστημένης ισχύος 5.665 MW (δεν περιλαμβάνονται οι μονάδες που εξαιρούνται από την υποχρέωση λήψης Άδειας Παραγωγής προ του Ν. 3851/2010). Ο Πίνακας 4.3. συνοψίζει στατιστικά στοιχεία για την εγκατεστημένη ισχύ, στους σταθμούς ΑΠΕ.

Μονάδες παραγωγής	Εγκατεστημένη Ισχύς (MW)	Συμμετοχή (%)
Θερμικές μονάδες	10.238,50	58,8
Υ/Η μονάδες	3.017,70	17,3
ΑΠΕ και ΣΗΘΥΑ	4.169,81	23,9
Σύνολο	17.426,01	100

Πίνακας 4.1.: Εγκατεστημένη Ισχύς στο Διασυνδεδεμένο δίκτυο [43]

Οι υδροηλεκτρικοί σταθμοί (Πίνακας 4.3) βρίσκονται κυρίως στη δυτική και βόρεια Ελλάδα. Ενώ, η εγκατεστημένη ισχύς των υδροηλεκτρικών μονάδων στο Ελληνικό σύστημα παραγωγής είναι σημαντική (~17%), η συνεισφορά τους στο ενεργειακό

ισοζύγιο είναι σχετικά μικρή (~7%). Η περιορισμένη διαθεσιμότητα νερών έχει ως αποτέλεσμα οι υδροηλεκτρικές μονάδες να χρησιμοποιούνται κατά κύριο λόγο για την κάλυψη αιχμών.

ΘΕΡΜΟΗΛΕΚΤΡΙΚΟΙ ΣΤΑΘΜΟΙ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ	ΑΡΙΘΜΟΣ	ΕΓΚΑΤΕΣΤΗΜΕΝΗ ΙΣΧΥΣ (MW)
Λιγνιτικές	15	4.462
Πετρελαϊκές	4	730
Φ.Α. Συνδυασμένου Κύκλου	9	3.999,8
Φ.Α. Ανοικτού Κύκλου	4	308,5
Μονάδες ΣΗΘΥΣ	3	334
ΣΥΝΟΛΟ	35	9.834,3

Πίνακας 4.2.: Εγκατεστημένη Ισχύς θερμικών σταθμών, Διασυνδεδεμένο [43]

ΜΟΝΑΔΕΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ	ΑΡΙΘΜΟΣ	ΕΓΚΑΤΕΣΤΗΜΕΝΗ ΙΣΧΥΣ (MW)
Υδροηλεκτρικά	39	3.017,7
Ανεμογεννήτριες		1.768
Μικροί Υ/Η Σταθμοί		224
Φωτοβολταϊκά		2.443
ΣΒΙΟ		51
Η/Θ		0
ΣΗΘΥΑ		100
ΣΥΝΟΛΟ		4.586

Πίνακας 4.3.: Εγκατεστημένη Ισχύς Υ/Η μονάδων και ΑΠΕ, Διασυνδεδεμένο [43]

Τέλος, παρουσιάζεται μια αναλυτική καταγραφή της συνολικής παραγωγής ενέργειας για το Διασυνδεδεμένο σύστημα. Στον πίνακα 4.4(α) και 4.4(β) καταγράφεται η συνολική παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, από τις μονάδες ΑΠΕ και τις μονάδες συμβατικού καυσίμου, αντίστοιχα. Η συνολική παραγωγή ενέργειας ξεπερνάει τις 50 TWh.

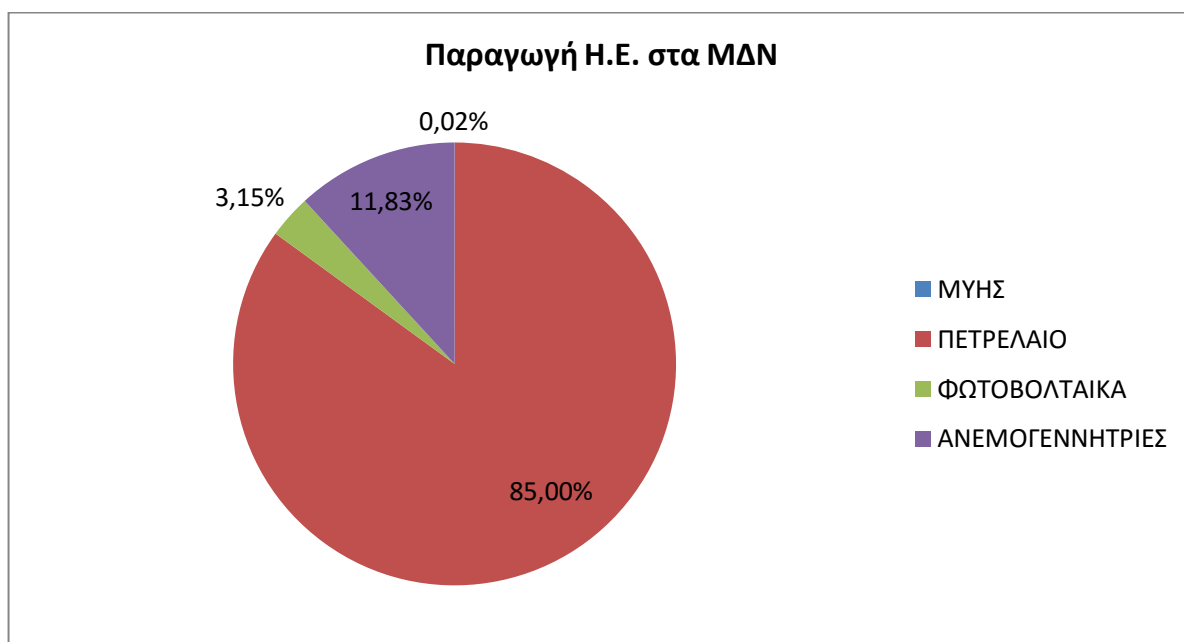
ΜΟΝΑΔΕΣ ΑΠΕ	ΕΝΕΡΓΕΙΑ (MWh)
Αιολικά	3.856.163
Φωτοβολταϊκά	3.171.246
Βιοαέριο-Βιομάζα	221.851
ΜΥΗΣ	707.037
ΣΗΘΥΑ	188.015

Πίνακας 4.4(α): Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας μονάδων ΑΠΕ, Διασυνδεδεμένο [48]

ΣΥΜΒΑΤΙΚΕΣ ΜΟΝΑΔΕΣ	ΕΝΕΡΓΕΙΑ (GWh)
Λιγνίτης	26.078,32
Πετρέλαιο	75,43
Φυσικό αέριο	13.381,1
Υδροηλεκτρικά	3.680,94

Πίνακας 4.4(β): Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας μονάδων συμβατικού καυσίμου, Διασυνδεδεμένο [43]

4.2.2. Μη Διασυνδεδεμένα Νησιά (ΜΔΝ)



Εικόνα 4.4: Συνολική παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας στα Μη Διασυνδεδεμένα Νησιά (ΜΔΝ), για το έτος 2012 [44]

Τα περισσότερα νησιά σήμερα στην Ελλάδα (κυρίως στο Αιγαίο) ηλεκτροδοτούνται από αυτόνομα ηλεκτρικά συστήματα με παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας κατά κύριο λόγο από τοπικούς θερμικούς σταθμούς παραγωγής, οι οποίοι λειτουργούν με καύσιμο πετρέλαιο, βαρύ (μαζούτ) ή και ελαφρύ (ντίζελ), και τους σταθμούς ΑΠΕ (αιολικούς και φωτοβολταϊκούς). Τα νησιά αυτά δεν έχουν διασυνδεθεί μέχρι σήμερα με το ηπειρωτικό ηλεκτρικό σύστημα, κυρίως λόγω τεχνικών και τεχνολογικών δυσκολιών, που υφίσταντο μέχρι πρότινος, αλλά και λόγω οικονομικών δυσκολιών καθώς οι διασυνδέσεις είναι έργα μεγάλης έντασης κεφαλαίου. Η αγορά ηλεκτρικής ενέργειας των Μη Διασυνδεδεμένων Νησιών (ΜΔΝ) αποτελείται από τριάντα δύο (32) αυτόνομα συστήματα. Ορισμένα εξ αυτών εξυπηρετούν περισσότερα από ένα νησιά (συμπλέγματα νησιών), και η Λειτουργία και Διαχείριση της Αγοράς των ΜΔΝ γίνεται από τον ΔΕΔΔΗΕ Α.Ε. (Διεύθυνση Διαχείρισης Νήσων). [55]

Στην εικόνα 4.4 παρουσιάζεται το ενεργειακό μίγμα των Μη Διασυνδεδεμένων Νησιών (ΜΔΝ). Είναι εμφανές ότι το ενεργειακό μίγμα καλύπτεται σχεδόν αποκλειστικά, σε ποσοστό 85% της ενέργειας, από θερμικούς σταθμούς παραγωγής. Αντίστοιχα, στον πίνακα 4.6, παρουσιάζεται η συνολική παραγόμενη ενέργεια για το έτος 2012 [44], όπου η συνολική παραγωγή από τους θερμικούς σταθμούς ανέρχεται περίπου στις 5 TWh.

ΜΟΝΑΔΕΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ	ΕΝΕΡΓΕΙΑ (GWh)
Θερμική παραγωγή	4.952,37
Ανεμογεννήτριες	689,35
Φωτοβολταϊκά	183,65
Μικροί Υ/Η σταθμοί	0,945
Σύνολική Παραγωγή	5.826,315

Πίνακας 4.6 Συνολική παραγωγή ενέργειας στα ΜΔΝ, κατά το έτος 2012

4.3. Περιγραφή συστήματος μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας

Τη σπονδυλική στήλη του Διασυνδεδεμένου Συστήματος Μεταφοράς αποτελούν οι τρεις γραμμές διπλού κυκλώματος των 400 kV, που μεταφέρουν ηλεκτρισμό, κυρίως από το σπουδαιότερο για την χώρα ενεργειακό κέντρο παραγωγής της Δυτικής Μακεδονίας. Στη περιοχή αυτή, παράγεται περίπου το 70% της συνολικής ηλεκτροπαραγωγής της χώρας το οποίο στη συνέχεια μεταφέρεται στα μεγάλα κέντρα κατανάλωσης της Κεντρικής και Νότιας Ελλάδας όπου και καταναλώνεται περίπου το 65% της συνολικής ηλεκτρικής ενέργειας. Υπάρχουν, επιπλέον, γραμμές μεταφοράς των 400 kV και των 150 kV που συνδέουν την Άνδρο και τα νησιά της Δυτικής Ελλάδας, Κέρκυρα, Λευκάδα, Κεφαλονιά και Ζάκυνθο με το διασυνδεδεμένο σύστημα

μεταφοράς, καθώς και μία υποβρύχια διασύνδεση της Κέρκυρας με την Ηγουμενίτσα στα 66 kV [43].

Σύμφωνα με το Ελληνικό Σύστημα Παραγωγής-Μεταφοράς-Διανομής, το σύστημα των γραμμών μεταφοράς αποτελείται από γραμμές μεταφοράς υψηλής τάσης, 150 kV και 66 kV και υπερυψηλής τάσης 400 kV. Τόσο οι γραμμές υψηλής τάσης, όσο και οι γραμμές υπερυψηλής τάσης διαχωρίζονται σε ελαφρύ και βαρύ τύπου, όπως επίσης και σε μονού ή διπλού κυκλώματος. Οι εναέριες γραμμές μεταφοράς, αναρτώνται από μονωτήρες που με τη σειρά τους αναρτώνται από πυλώνες, οι οποίοι είναι συνήθως χαλύβδινα στατικά δικτυώματα. Η απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών πύργων εξαρτάται από το επιτρεπόμενο κατακόρυφο βέλος του τόξου του αναρτημένου αγωγού ενώ για χαλύβδινους πυλώνες, με γραμμές υψηλής τάσεως, το άνοιγμα μεταξύ των πύργων κυμαίνεται από 330-400m.

Πιο αναλυτικά, οι πυλώνες στήριξης που χρησιμοποιούνται είναι κατασκευασμένοι είτε από οπλισμένο σκυρόδεμα είτε από μεταλλικά τμήματα, ενώ σε ορισμένες περιπτώσεις χρησιμοποιούνται και ξύλινοι στύλοι. Οι τσιμεντένιοι στύλοι είναι πίο ανθεκτικοί από τους ξύλινους που είναι εκτεθειμένοι σε φθορά, αλλά είναι πίο εύθραυστοι σε απότομα χτυπήματα. Οι πυλώνες πρέπει να είναι ψηλοί ώστε οι αγωγοί να απέχουν πολύ από το έδαφος. Οι διαστάσεις των στύλων καθορίζονται ανάλογα με την αποστολή τους. Οι ελάχιστες αποστάσεις αγωγού γής και αγωγού αγωγού καθορίζονται με τρόπο που να μην υπάρχει κίνδυνος ηλεκτρικού τόξου και επομένως βραχυκυκλώματος. Στον υπολογισμό των αποστάσεων λαμβάνεται υπόψη, όπως προαναφέρθηκε, τόσο η καμπύλη που σχηματίζει ο αγωγός λόγω του βάρους του αλλά και η διαμόρφωση του εδάφους στην περιοχή που περνά η γραμμή καθώς και η επίδραση του ανέμου.

Οι πιο βασικές από τις εγκαταστάσεις και τις συσκευές που περιλαμβάνονται στις γραμμές μεταφοράς είναι οι ακόλουθες:

Οι αγωγοί, οι οποίοι αποτελούν το μέσο μεταφοράς της ηλεκτρικής ενέργειας. Στις γραμμές υψηλής τάσης είναι συνήθως τρείς και στις διπλές γραμμές είναι έξι. Για λόγους οικονομίας δεν χρησιμοποιείται ουδέτερος αγωγός. Οι αγωγοί στηρίζονται στους πυλώνες και, ανάλογα με την κατασκευή τους, διακρίνονται σε μονόκλωνους (από ένα σύρμα) και σε πολύκλωνους (από περισσότερα του ενός συνεστραμμένα σύρματα). Οι πολύκλωνοι αγωγοί είναι πιο ακριβοί αλλά χρησιμοποιούνται περισσότερο λόγω της μεγαλύτερης ευκαμψίας και της μεγαλύτερης μηχανικής αντοχής τους. Οι αγωγοί είναι πολύ σημαντικό στοιχείο για τη γραμμή μεταφοράς και αποτελούν, γύρω στο σαράντα τις εκατό του συνολικού κόστους της γραμμής. Υπάρχει μεγάλη ποικιλία αγωγών ανάλογα με την διατομή, το υλικό και τον τρόπο κατασκευής τους. Για την επιλογή τους λαμβάνονται υπόψη πολλές παράμετροι όπως οι μηχανικές και οι ηλεκτρικές ιδιότητες τους, καθώς επίσης και το ολικό κόστος της ηλεκτρικής ενέργειας που θα χαθεί εξαιτίας των απωλειών.

Στις αρχές του 20ου αιώνα άρχισαν να χρησιμοποιούνται οι αγωγοί αλουμινίου, οι οποίοι ήταν χαμηλότερης αγωγιμότητας και χαμηλότερου κόστους. Εξαιτίας όμως της μικρής αντοχής του αλουμινίου κρίθηκε ακατάλληλο για εγκαταστάσεις δικτύων με πυλώνες σε σχετική μεγάλη απόσταση μεταξύ τους. Η καινοτόμα ιδέα της ενίσχυσης του αλουμινίου με χάλυβα εμφανίστηκε περίπου στα μέσα του ίδιου αιώνα και είναι αυτή που επικρατεί μέχρι σήμερα. Οι αγωγοί ACSR, όπως λέγονται, συνδυάζουν τις ικανοποιητικές ηλεκτρικές ιδιότητες του αλουμινίου με την υψηλή αντοχή του χάλυβα διατηρώντας το κόστος κατασκευής σε χαμηλά επίπεδα. Επίσης, τα τελευταία χρόνια έχουν αναπτυχθεί αγωγοί κραμάτων αλουμινίου που έχουν παρόμοια συμπεριφορά με τους ACSR χωρίς όμως να παρουσιάζουν προβλήματα διάβρωσης, όπως συμβαίνει

πολλές φορές με τον πυρήνα των αγωγών όταν αυτοί βρίσκονται υπό ακραία καιρικά φαινόμενα. Τέλος, πρέπει να αναφερθεί ότι οι αγωγοί θα πρέπει να έχουν τα χαρακτηριστικά που θα τους επιτρέπουν να μειώνουν τις επιδράσεις ηλεκτρικής προέλευσης στο περιβάλλον. Να έχουν μειωμένα ηλεκτρικά και μαγνητικά πεδία, τα οποία θεωρούνται υπαίτια καρκινογένεσεων, όπως επίσης μειωμένες ραδιοφωνικές παρεμβολές.

Οι μονωτήρες που αφενός συγκρατούν τους αγωγούς στους στύλους και αφ' ετέρου εξασφαλίζουν τη μόνωση τους ως προς γη, είναι αναπόσπαστο κομμάτι μιας γραμμής μεταφοράς. Οι μονωτήρες πρέπει να έχουν μεγάλη ηλεκτρική αντοχή για να εξασφαλίζουν τέλεια μόνωση μεταξύ αγωγού και στύλου και μεγάλη μηχανική αντοχή ώστε να αντέχουν το βάρος του αγωγού μαζί με όλες τις καταπονήσεις όπως το χιόνι και ο αέρας. Οι μονωτήρες κατασκευάζονται από πορσελάνη ή γυαλί, σε μεγέθη που σχετίζονται με την τάση της γραμμής και σχήμα που εμποδίζει την επικάθηση υγρασίας και σκόνης. Μελλοντικά θα υπερισχύσει η χρήση πλαστικών μονωτήρων (silicon rubber). Οι μονωτήρες των γραμμών μεταφοράς συνήθως κρέμονται από τους στύλους και έχουν την μορφή αλυσοειδών, αποτελούμενων από σειρά μονωτήρων που συνδέονται μεταξύ τους με μεταλλικούς συνδετήρες. Ο αριθμός τους εξαρτάται από την τάση της γραμμής (πχ 10 για γραμμές 150 KV).

Τέλος, το δίκτυο μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας έως το 2012, στο Διασυνδεδεμένο σύστημα, αποτελείτο από 331 Κέντρα Υψηλής Τάσης (KYT). Στα KYT περιέχονται οι μετασχηματιστές (των 150 και 400 kV) και τα μεταλλικά (χαλύβδινα) ικρυώματα στήριξης, για κάθε έναν από τους 7 τύπους γραμμών μεταφοράς.

4.3.1. Γραμμές μεταφοράς υψηλής τάσης 150 kV

Οι κύριες γραμμές μεταφοράς εναλλασσόμενου ρεύματος και υψηλής τάσης 150 kV, χρησιμοποιούν τους εξής τύπους πυλώνων E, B, 2B.

Οι πυλώνες τύπου Ε είναι απλού κυκλώματος, ελαφριού τύπου, με ψιλό αγωγό διατομής 336 κυκλικών χιλιοστών. Οι πυλώνες τύπου Β είναι απλού κυκλώματος, βαρέως τύπου, με χοντρό αγωγό διατομής 636 κυκλικών χιλιοστών. Αντίστοιχα, οι πυλώνες τύπου 2Β είναι διπλού κυκλώματος, βαρέως τύπου, με χοντρό αγωγό διατομής 636 κυκλικών χιλιοστών

4.3.2. Γραμμές μεταφοράς υπερ-υψηλής τάσης 400 kV

Οι κύριες γραμμές μεταφοράς εναλλασσόμενου ρεύματος και υψηλής τάσης 400 kV, χρησιμοποιούν τους εξής τύπους πυλώνα Β', 2Β'Β' και Β'Β'Β'.

Οι πυλώνες τύπου Β' και 2Β'Β' είναι πυλώνες απλού και διπλού κυκλώματος, αντίστοιχα, υπερβαρέως τύπου, με δίδυμους αγωγούς ανά φάση, διατομής 936 κυκλικών χιλιοστών. Τέλος, οι πυλώνες Β'Β'Β' είναι απλού κυκλώματος, υπερβαρέως τύπου, με τρίδυμους αγωγούς ανά φάση, διατομής 936 κυκλικών χιλιοστών.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 – ΜΕΛΕΤΗ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗΣ ΑΚΖ ΕΛΛΗΝΙΚΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Στην ΑΚΖ που παρουσιάζεται, γίνεται προσπάθεια μοντελοποίησης του συστήματος παραγωγής και μεταφοράς της ηλεκτρικής ενέργειας στην Ελλάδα. Αρχικά παρουσιάζονται τα αντίστοιχα στοιχεία που συλλέχτηκαν για τις ποσότητες των υλικών που απαρτίζουν τα δύο συστήματα, καθώς και για τις ποσότητες ενέργειας που καταναλώνονται στα στάδια του κύκλου ζωής τους. Στη συνέχεια, πραγματοποιείται εφαρμογή της μεθόδου ΑΚΖ με χρήση του υπολογιστικού προγράμματος SimaPro 7.1. και αξιολογούνται τα αποτελέσματά της. Τέλος, δίνεται μια ερμηνεία για τις διάφορες κατηγορίες περιβαλλοντικής αξιολόγησης και των ενδεχόμενων αρνητικών επιπτώσεων, που απορρέουν απ' το ελληνικό ενεργειακό ηλεκτρικό δίκτυο.

5.1. Μοντελοποίηση συστήματος παραγωγής και μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας

Η ανάλυση κύκλου ζωής που ακολουθεί, για το ηλεκτρικό δίκτυο της Ελλάδας, έχει ως στόχο αφενός την καταγραφή του δικτύου παραγωγής και μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας και, αφετέρου την εκτίμηση των αρνητικών περιβαλλοντικών επιπτώσεων καθ' όλο τον κύκλο ζωής των δύο συστημάτων. Επίσης, στοχεύει στην περιβαλλοντική αξιολόγηση των τεχνολογιών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας (συμβατικών και ΑΠΕ) της χώρας. Για να επιτευχθεί αυτό είναι αναγκαία η συλλογή διάφορων ποσοτικών δεδομένων για το λογισμικό SimaPro, το οποίο και χρησιμοποιείται για την εξαγωγή ποσοτικών και ποιοτικών αποτελεσμάτων ως προς τις εκπομπές CO_{2eq}. Τελικός σκοπός της εργασίας είναι η καταγραφή των εκπομπών των αερίων του θερμοκηπίου (GHG) από το ελληνικό σύστημα ηλεκτροπαραγωγής, η εξαγωγή ποιοτικών και ποσοτικών αποτελεσμάτων για την περιβαλλοντική του αξιολόγηση, και η σύγκριση των αποτελεσμάτων με αντίστοιχες εργασίες άλλων χωρών.

Με βάση προηγούμενες εργασίες ανάλυσης κύκλου ζωής (δες κεφάλαιο 2) για το ηλεκτρικό ενεργειακό δίκτυο μιας χώρας, προκύπτει ότι η δομή της ΑΚΖ παίζει καθοριστικό ρόλο τόσο για τη συλλογή των στοιχείων όσο και για την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων της. Έτσι, για την περιβαλλοντική αξιολόγηση του ελληνικού δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας, θα πρέπει να μελετηθεί ξεχωριστά το δίκτυο παραγωγής και το δίκτυο μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας της χώρας. Επιπλέον, εξαιτίας της μορφολογίας της χώρας, το ηλεκτρικό δίκτυο χωρίζεται στο Διασυνδεδεμένο (ηπειρωτικό) και στο Μη Διασυνδεδεμένο (απομονωμένο), όπου συμπεριλαμβάνονται τα νησιά τα οποία ακόμα δεν έχουν συνδεθεί με το ηπειρωτικό δίκτυο. Για τους παραπάνω λόγους, θα πρέπει να γίνει μοντελοποίηση (bottom-up) (α) των κύριων συστημάτων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, ώστε να δημιουργηθεί ένα σύστημα που να προσομοιάζει το δίκτυο παραγωγής της χώρας και (β) των κύριων στοιχείων απ'τα οποία αποτελείται μια τυπική γραμμή μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας, στην ελληνική επικράτεια. Επιπλέον, για τον τελικό καθορισμό των ορίων του συστήματος της ΑΚΖ, πρέπει να αναφερθούν και τυχόν περιορισμοί που εμφανίζονται στην προσομοίωση του δικτύου, στο υπολογιστικό περιβάλλον του SimaPro και τέλος να ξεκαθαριστούν ποια στάδια του κύκλου ζωής θα συμπεριληφθούν στη μελέτη και ποια όχι.

Τα Μη Διασυνδεδεμένα Νησιά (ΜΔΝ) κατέχουν το 10% περίπου της συνολικής παραγωγής ενέργειας ενώ, το Διασυνδεδεμένο δίκτυο της χώρας το υπόλοιπο 90% (Εικόνα 4.2). Αντίστοιχα, το ενεργειακό μίγμα του απομονωμένου δικτύου αποτελείται από 4 τύπους καυσίμων [(α)-(δ)] ενώ του διασυνδεδεμένου δικτύου από 9 τύπους καυσίμου [(α)-(θ)] (Εικόνες 4.4 και 4.3, αντίστοιχα). Πιο συγκεκριμένα, οι μονάδες απ'τις οποίες απαρτίζεται το ελληνικό δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας είναι (Εικόνα 4.1):

- a. μικροί Υ/Η σταθμοί (ΜΥΗΣ)
- b. θερμικοί σταθμοί πετρελαίου (μαζούτ, diesel)

- c. φωτοβολταϊκά
- d. ανεμογεννήτριες
- e. μονάδες Βιοαερίου/Βιομάζας
- f. φυσικό αέριο
- g. λιγνίτης
- h. μεγάλα Υ/Η και
- i. μονάδες συνδυασμένου κύκλου

Η προσέγγιση που ακολουθήθηκε για τη συλλογή των στοιχείων για το δίκτυο παραγωγής, διασυνδεδεμένου και μη, είναι: (α) καταγραφή της εγκατεστημένης ισχύος ανά τύπο τεχνολογίας και (β) καταγραφή του ενεργειακού μίγματος της χώρας, ανά τεχνολογία. Όλα τα στοιχεία προήλθαν από δημοσιευμένα αρχεία των διαχειριστών του δικτύου (ΑΔΜΗΕ, ΔΕΔΔΗΕ, ΛΑΓΗΕ) και αναφέρονται στο έτος 2012, για την παραγωγή από συμβατικές μονάδες του ηπειρωτικού δικτύου καθώς και για το σύνολο της παραγωγής στο απομονωμένο δίκτυο, ενώ για το έτος 2015 για τις μονάδες ΑΠΕ του ηπειρωτικού δικτύου. Έτσι, για την ετήσια παραγωγή ενέργειας από κάθε μονάδα, καταγράφηκε για το Διασυνδεδεμένο δίκτυο συνολική παραγωγή άνω των 50 TWh, ενώ για το Μη Διασυνδεδεμένο δίκτυο κοντά στις 6 TWh. Πιο αναλυτικά στους πίνακες 4.2-4.4, παρουσιάζεται η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, από κάθε τεχνολογία ξεχωριστά. Τα τελικά αριθμητικά δεδομένα εισόδου στο λογισμικό SimaPro, αναφέρονται στις kWh παραγόμενης ενέργειας και τη διάθεσή της στο ηλεκτρικό δίκτυο μεταφοράς.

Για το δίκτυο μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας της Ελλάδας, ελήφθησαν υπόψη οι γραμμές μεταφοράς μόνο του ηπειρωτικού δικτύου, στο οποίο λαμβάνει χώρα και το μεγαλύτερο μέρος της παραγωγής και μεταφοράς της. Έτσι, συμπεριλήφθηκαν οι γραμμές μεταφοράς υψηλής τάσης 150 kV και υπερυψηλής τάσης 400 kV, οι οποίες

απαρτίζονται από τους αγωγούς μεταφοράς (που αποτελούν το μέσο μεταφοράς της ηλεκτρικής ενέργειας) από τους πυλώνες στήριξης και από τους μονωτήρες που είναι απαραίτητοι για την ασφαλή μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας, για κάθε έναν από τους 6 τύπους γραμμών μεταφοράς που υπάρχουν στην ελληνική επικράτεια. Επιπλέον, το δίκτυο μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας έως το 2012, στο Διασυνδεδεμένο σύστημα, αποτελείται από 331 Κέντρα Υπερ/Υψηλής Τάσης (ΚΥΤ). Στα ΚΥΤ περιέχονται οι μετασχηματιστές (των 150 και 400 kV) και τα μεταλλικά (χαλύβδινα) ικρνώματα στήριξης καθώς και κάποια χάλκινα εξαρτήματα. Στη μελέτη δεν συμπεριλαμβάνονται άλλα εξαρτήματα. Τα στοιχεία που συλλέχθηκαν από τους διαχειριστές του δικτύου (Διεύθυνση Νέων Έργων Μεταφοράς - ΔΝΕΜ), αφορούν τα χιλιόμετρα του δικτύου αλλά και το βάρος όλων των υλικών από τα οποία αποτελούνται οι γραμμές μεταφοράς ανά χιλιόμετρο δικτύου. Τα στοιχεία αυτά, τα οποία αποτελούν και τη βάση δεδομένων για το λογισμικό SimaPro, θεωρούνται εμπιστευτικά και δεν επιτρέπεται η δημοσίευσή τους. Ωστόσο, ο διαχωρισμός που έγινε, για να μοντελοποιηθεί το δίκτυο μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας και τα στοιχεία από τα οποία αποτελείται, ακολουθεί την παραπάνω προσέγγιση και τα τελικά αριθμητικά δεδομένα εισόδου στο λογισμικό είναι το βάρος, (σε kg), των υλικών από τα οποία είναι κατασκευασμένοι οι πυλώνες στήριξης, οι αγωγοί μεταφοράς και οι μονωτήρες καθώς και τα εξαρτήματα από τα οποία αποτελείται ένα τυπικό ΚΥΤ των 150kV και 400kV.

Ανακεφαλαιώνοντας, για τα όρια του συστήματος ως προς το δίκτυο παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας της Ελλάδας, ελήφθη υπόψη ένα στατικό ενεργειακό μίγμα ενός έτους, ενώ ως προς το δίκτυο μεταφοράς μια σταθερή υποδομή με τη διάρκεια ζωής του δικτύου να είναι η διάρκεια ζωής των εξαρτημάτων από τα οποία αποτελείται. Είναι σημαντικό να καταγραφεί ότι σε αυτήν την ΑΚΖ δεν συμπεριλαμβάνονται οι εισαγωγές ενέργειας που κάνει η Ελλάδα, αν και κατέχουν το 10% της συνολικής κάλυψης της

ενεργειακής ζήτησης της χώρας [33]. Οι περιορισμοί που εμφανίστηκαν στην εργασία αφορούν κυρίως το Μη Διασυνδεδεμένο δίκτυο. Επειδή αποτελείται από αυτόνομα ενεργειακά συστήματα ήταν δύσκολο να μοντελοποιηθεί το δίκτυο μεταφοράς και για το λόγο αυτό προτιμήθηκε η αξιολόγηση μόνο των ενεργειακών συστημάτων που καλύπτουν τη ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας των νησιών. Άλλο ένα σημαντικό εμπόδιο στην κατασκευή της μεθόδου, είναι η περιορισμένη (προεγκατεστημένη) βάση δεδομένων του SimaPro 7.1, με το οποίο έγινε η περιβαλλοντική αξιολόγηση. Συγκεκριμένα, από τους 9 τύπους καυσίμων, βρέθηκε συγκεκριμένη βάση δεδομένων για την Ελλάδα και τις μονάδες παραγωγής από λιγνίτη και πετρέλαιο, καθώς επίσης και για τις Υ/Η μονάδες, τους μικρούς Υ/Η σταθμούς (ΜΥΗΣ) και για τους σταθμούς φωτοβολταϊκών. Για τις μονάδες φυσικού αερίου χρησιμοποιήθηκε μια βάση δεδομένων που περιλαμβάνει στοιχεία για το μέσο όρο παραγωγής από μονάδες Φ/Α των ευρωπαϊκών χωρών, συμπεριλαμβανομένης και της Ελλάδας. Τέλος για τις άλλες δύο τεχνολογίες, των μονάδων συνδυασμένου κύκλου και των αιολικών πάρκων, χρησιμοποιήθηκαν οι βάσεις δεδομένων που αφορούν ένα μέσο όρο της ευρωπαϊκής παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, για την κάθε τεχνολογία ξεχωριστά. Μόνο για την περίπτωση των μονάδων βιοαερίου/βιομάζας χρησιμοποιήθηκε η βάση δεδομένων για σταθμό παραγωγής στην Κίνα, μιας και δεν βρέθηκε κάτι αντίστοιχο σε χώρα της Ευρώπης που να προσομοιάζει τα ελληνικά συστήματα βιομάζας, που έχουν ως κύριο καύσιμο εισόδου γεωργικά κατάλοιπα.

Η λειτουργική μονάδα που επιλέχθηκε είναι οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις στο φαινόμενο του θερμοκηπίου, για κάθε kWh παραγόμενης ενέργειας από το ελληνικό δίκτυο παραγωγής, η οποία διαχύθηκε και μεταφέρθηκε από το δίκτυο μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας, σε ένα χρόνο.

Τα στάδια του κύκλου ζωής, των δύο δικτύων, που περιλαμβάνονται στην ΑΚΖ είναι: (α) παραγωγή και μεταφορά των υλικών, (β) κατασκευή και εγκατάσταση εξαρτημάτων, (γ) λειτουργία και συντήρηση των σταθμών παραγωγής και (δ) τελική διάθεση/ανακύκλωση εξαρτημάτων και υλικών. Πρέπει να τονιστεί ότι στις περιπτώσεις που στο λογισμικό SimaPro 7.1 δεν συμπεριλαμβάνονται και τα τέσσερα στάδια του κύκλου ζωής, θα επισημαίνεται. Ο βασικός κανόνας που ακολουθείται όμως για την επιλογή της εκάστοτε βάσης δεδομένων, είναι να τηρούνται τα βασικά συμπεράσματα από την βιβλιογραφία [9] τα οποία καταγράφουν πως το στάδιο με τις μεγαλύτερες επιπτώσεις στον άνθρωπο και στο περιβάλλον, από τις μονάδες ηλεκτροπαραγωγής με ορυκτά καύσιμα, είναι το στάδιο λειτουργίας (operation) των σταθμών. Όσον αφορά τις μονάδες ΑΠΕ, το στάδιο που επιβαρύνει περισσότερο είναι αυτό της εξόρυξης και επεξεργασίας (manufacturing and processing) των πρώτων υλών, καθώς και το στάδιο της κατασκευής των σταθμών (construction and installation) [39].

5.2. Καταγραφή διεργασιών παραγωγής και μεταφοράς Η.Ε. και είσοδος δεδομένων στο υπολογιστικό περιβάλλον του SimaPro 7.1

A. Δίκτυο Παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας

Αρχικά, δημιουργήθηκαν οι διεργασίες (processes), στο λογισμικό SimaPro, της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας για το Διασυνδεδεμένο και Μη Διασυνδεδεμένο δίκτυο. Όπως προαναφέρθηκε, οι διεργασίες είναι τα στοιχεία από τα οποία αποτελείται το σύστημα παραγωγής καθώς και τα στάδια του κύκλου ζωής τους. Τα στοιχεία αυτά είναι οι μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας που καλύπτουν το ενεργειακό μίγμα της Ελλάδας. Ακολουθούν αναλυτικά οι λεπτομέρειες για τις μονάδες συμβατικού καυσίμου και ΑΠΕ και τα στάδια τα οποία καταγράφονται μέσα από το περιβάλλον του SimaPro, για την κάθε τεχνολογία ξεχωριστά:

Λιγνίτης (lignite)

Για τους λιγνιτικούς σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, χρησιμοποιήθηκε η (προ)εγκατεστημένη βάση του SimaPro, η οποία λαμβάνει υπόψη τη θερμική απόδοση μιας μέσης λιγνιτικής μονάδας (35,2%), της Ελλάδας. Η βάση αυτή, αναφέρεται στο στάδιο λειτουργίας του σταθμού και την μέση παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Πιο συγκεκριμένα, αναφέρεται σε μονάδα με μέση δυναμικότητα φορτίου 6000 ώρες λειτουργίας σε πλήρη δυναμικότητα, για ένα έτος. Ο σταθμός, θεωρείται ότι λειτουργεί 200.000 ώρες κατά τη διάρκεια της ζωής του. Για την αξιολόγηση των κύριων χαρακτηριστικών των σταθμών (Low Heating Value – LHV, περιεκτικότητα τέφρας στον άνθρακα, απόδοση σταθμού) και των αντίστοιχων εκπομπών (CO₂, NO_x, SO₂) χρησιμοποιείται μια προσέγγιση bottom-up. Με την προσέγγιση αυτή γίνεται προσπάθεια καταμερισμού των εκπομπών, των διάφορων αερίων για το ελληνικό μίγμα άνθρακα, που χρησιμοποιείται στους σταθμούς αυτής της τεχνολογίας. Τέλος, τα γεωγραφικά χαρακτηριστικά της βάσης δεδομένων έχουν υπολογιστεί με βάση τα δεδομένα της Ελλάδας.

Πετρέλαιο (oil)

Για τους σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με χρήση ελαφρού τύπου (diesel) ή βαρύ τύπου (μαζούτ) πετρέλαιο, χρησιμοποιήθηκε η (προ)εγκατεστημένη βάση του SimaPro που λαμβάνει υπόψη συγκεκριμένη απόδοση μεταροπής του πετρελαίου σε ηλεκτρική ενέργεια, ενός μέσου σταθμού στην Ελλάδα. Η βάση αυτή, αναφέρεται στο στάδιο λειτουργίας του σταθμού και τη μέση παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Πιο συγκεκριμένα, σε συνολική παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από τους σταθμούς 7,4 TWh και 0,9 TWh από μονάδες συνδυασμένου κύκλου. Τέλος, τα γεωγραφικά χαρακτηριστικά της βάσης δεδομένων έχουν υπολογιστεί με βάση εκτίμηση των αντίστοιχων δεδομένων για την Ελλάδα.

Φυσικό αέριο (natural gas)

Για μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας που χρησιμοποιούν ως καύσιμο το φυσικό αέριο, χρησιμοποιήθηκε η (προ)εγκατεστημένη βάση του SimaPro που λαμβάνει υπόψη το στάδιο λειτουργίας του σταθμού και την μέση παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, δίνοντας έμφαση στα στάδια της εισαγωγής του καυσίμου υπό υψηλή πίεση, στις υποδομές του σταθμού, στις εκπομπές και σε όλα τα στοιχεία τα οποία είναι απαραίτητα για τη λειτουργία των μονάδων φυσικού αερίου. Τέλος, πρέπει να σημειωθεί πως για τη απόδοση του σταθμού ηλεκτροπαραγωγής, τα δεδομένα που χρησιμοποιούνται προέρχονται από τη μέση καθαρή απόδοση αντίστοιχων μονάδων ηλεκτροπαραγωγής φυσικού αερίου, 10 ευρωπαϊκών χωρών συμπεριλαμβανομένης και της Ελλάδας.

Μεγάλα υδροηλεκτρικά (hydropower)

Η λειτουργία των Υ/Η σταθμών εξαρτάται πολύ από τα γεωγραφικά και κλιματολογικά χαρακτηριστικά της κάθε περιοχής. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιήθηκε η (προ)εγκατεστημένη βάση του SimaPro που αναφέρεται στην Ελλάδα και συγκεκριμένα σε Υ/Η μονάδες με δεξαμενή νερού και run-of-river. Για τους πρώτους σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής, λαμβάνεται υπόψη ότι χρησιμοποιούν την πτώση των υδάτων από τη δεξαμενή αποθήκευσης για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας ενώ, χρησιμοποιείται και για την κάλυψη φορτίων αιχμής και ως «μπαταρία» για αποθήκευση ενέργειας. Στη δεύτερη περίπτωση, της μονάδας ΜΥΗΣ, λαμβάνεται υπόψη ότι χρησιμοποιούν τη ροή των υδάτων κατά μήκος του ποταμού για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Στη βάση δεδομένων, υπολογίζεται η συμμετοχή των Υ/Η μονάδων στην ηλεκτροπαραγωγή της χώρας, με βάση τα επίπεδα της μέσης καθαρής παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας ενώ, για τον υπολογισμό των εκπομπών από το στάδιο της κατασκευής τους, λαμβάνονται υπόψη δεδομένα για την Ελλάδα. Τα στάδια του κύκλου ζωής που υπολογίζει είναι αυτά της κατασκευής φράγματος και

σύραγγας, της κατασκευής των εξαρτημάτων όπως για τις τουρμπίνες και τις γεννήτριες, το στάδιο της λειτουργίας τους και τέλος το στάδιο της αποσυναρμολόγησης της Υ/Η μονάδας και της απόθεσης ή ανακύκλωσης των εξαρτημάτων της.

Μονάδες συνδυασμένου κύκλου (Combined Heat and Power, CHP)

Οι μικροί ηλεκτροπαραγωγικοί σταθμοί συνδυασμένου κύκλου, που υπάρχουν στην ελληνική επικράτεια, μπορούν να προσομοιαστούν με την αντίστοιχη (προ)εγκατεστημένη βάση του SimaPro που αναφέρεται σε ευρωπαϊκές μονάδες CHP 160 kW_e, για τις οποίες περιγράφεται το στάδιο της λειτουργία τους καθώς και ο τύπος καυσίμου που χρησιμοποιούν. Πιο συγκεκριμένα, λαμβάνει υπόψη την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και θερμότητας με χρήση αεριοστροβίλου. Ο κινητήρας λειτουργεί με καύσιμο φυσικό αέριο ενώ, συμπεριλαμβάνονται μία αντλία θερμότητας, δύο λέβητες για κάλυψη φορτίων αιχμής, μονάδα αποθήκευσης (βραστού) νερού για να επιτρέπει περισσότερες ώρες λειτουργίας του αεριοστροβίλου και τέλος μια γεννήτρια. Ο κινητήρας, όπως προαναφέρθηκε έχει ηλεκτρική απόδοση 160 kW_e (electrical capacity) και θερμική 360 kW_e (thermal capacity). Τέλος, η μέση ετήσια συνολική απόδοση του σταθμού είναι της τάξης του 76% και 86%.

Φωτοβολταϊκά (Photovoltaic)

Για φωτοβολταϊκούς σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας χρησιμοποιήθηκε η (προ)εγκατεστημένη βάση του SimaPro, που λαμβάνει υπόψη συγκεκριμένη απόδοση των Φ/Β για τη μεταροπή της ηλιακής ακτινοβολίας σε ηλεκτρική ενέργει στην Ελλάδα, καθώς και συγκεκριμένες τιμές προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας. Η βάση αυτή, αναφέρεται στο στάδιο της κατασκευής των στοιχείων των πανέλων ενώ, λαμβάνει υπόψη τη βέλτιστη τοποθεσία τους για το στάδιο της λειτουργία του σταθμού. Επίσης,

για το στάδιο της λειτουργίας των σταθμών, λαμβάνει υπόψη τη μέση ετήσια παραγωγή σε 1175 kWh και τέλος, τη διάρκεια ζωής της εγκατάστασης στα 30 χρόνια.

Ανεμογεννήτριες (wind turbine)

Το αιολικό πάρκο που βρέθηκε στην (προ)εγκατεστημένη βάση του SimaPro, αναφέρεται σε εγκατάσταση σε μια πόλη της Γερμανίας η οποία τροφοδότησε συνολικά το δίκτυο με ενέργεια 99.964 kWh, σε ένα έτος. Τα χαρακτηριστικά των Α/Γ, του αιολικού πάρκου, προσομοιάζονται αρκετά με αυτές που είναι εγκατεστημένες στο ελληνικό δίκτυο. Ο ρότορας της Α/Γ έχει τρία πτερύγια με συνολική διάμετρο 23,8 μέτρα ενώ, ο πύργος έχει ύψος 23,8 μέτρα και είναι κατασκευασμένος από χάλυβα. Τέλος, η διάρκεια ζωής των σταθερών στοιχείων του αιολικού πάρκου είναι 50 χρόνια ενώ, για τα μηχανικά (κινούμενα) εξαρτήματα 20 χρόνια.

Βιομάζα / Βιοαέριο (biomass / biogas)

Στις (προ)εγκατεστημένες βάσεις του SimaPro, υπάρχει μία μόνο μονάδα βιομάζας η οποία αναφέρεται σε σταθμό παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στην Κίνα, με καύσιμο εισόδου γεωργικά κατάλοιπα. Επίσης έχει τη δυνατότητα για συμπαραγωγή θερμότητας (CCS), η οποία λαμβάνεται υπόψη για τα δεδομένα της Ελβετίας. Τα στάδια που περιλαμβάνει στον κύκλο ζωής είναι αυτά της λειτουργίας της μονάδας, της κατασκευής των υποδομών του σταθμού, της τελικής απόθεσης των εξαρτημάτων μετά τον κύκλο ζωής τους, καθώς και τις εκπομπές από την κατανάλωση βιοαερίου από τη μονάδα. Πρέπει να επισημανθεί ότι ο σταθμός χρησιμοποιείται και για τη συμπαραγωγή θερμότητας και έτσι, συμπεριλαμβάνονται και οι επιπτώσεις από τα παραπροϊόντα της καύσης. Τέλος, η μονάδα βιομάζας αναφέρεται σε βαθμούς απόδοσης, για ηλεκτρική ενέργεια 33% και για θερμότητα 67%. Συνολικά παρήχθησαν 15,1 GWh από αυτή τη μονάδα ηλεκτροπαραγωγής.

Μικροί υδροηλεκτρικοί σταθμοί (small hydro)

Η λειτουργία των Υ/Η σταθμών εξαρτάται πολύ από τα γεωγραφικά και κλιματολογικά χαρακτηριστικά της κάθε περιοχής. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιήθηκε η (προ)εγκατεστημένη βάση του SimaPro που αναφέρεται στην Ελλάδα και συγκεκριμένα σε Υ/Η μονάδες με δεξαμενή νερού και run-of-river. Για τις μονάδες ΜΥΗΣ (run-of-river), λαμβάνεται υπόψη ότι χρησιμοποιούν τη ροή των υδάτων κατά μήκος του ποταμού για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Στη βάση δεδομένων, υπολογίζεται η συμμετοχή των Υ/Η μονάδων στην ηλεκτροπαραγωγή της χώρας, με βάση τα επίπεδα της μέσης καθαρής παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας ενώ, για τον υπολογισμό των εκπομπών από το στάδιο της κατασκευής τους, λαμβάνονται υπόψη δεδομένα για την Ελλάδα. Τα στάδια του κύκλου ζωής που υπολογίζει είναι αυτά της κατασκευής των εξαρτημάτων, όπως για τις τουρμπίνες και τις γεννήτριες, και το στάδιο της λειτουργίας και αποσυναρμολόγησης των ΜΥΗΣ καθώς και της απόθεσης ή ανακύκλωσης των εξαρτημάτων του σταθμού μετά το τέλος του κύκλου ζωής.

B. Δίκτυο Μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας

Στη συνέχεια, για την κατασκευή της δομής και τη μοντελοποίηση των στοιχείων του δικτύου μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας στην Ελλάδα, δημιουργήθηκαν οι αντίστοιχες διεργασίες (processes) στο λογισμικό SimaPro, για το Διασυνδεδεμένο δίκτυο. Όπως προαναφέρθηκε, οι διεργασίες είναι τα στοιχεία από τα οποία αποτελείται το δίκτυο μεταφοράς καθώς και τα στάδια του κύκλου ζωής τους στα οποία αναφέρεται η συγκεκριμένη διεργασία. Τα στοιχεία αυτά είναι οι γραμμές μεταφοράς υψηλής (150 kV) και υπερυψηλής (400kV) τάσης και τα κέντρα υπερ/υψηλής τάσης (KYT). Οι γραμμές μεταφοράς μοντελοποιήθηκαν στο περιβάλλον του SimaPro, με στοιχεία για το βάρος των βασικών υλικών από τα οποία είναι κατασκευασμένα τα εξαρτήματα των γραμμών. Έτσι, χρησιμοποιήθηκε για τους πυλώνες στήριξης, ως βασικό υλικό, ο χάλυβας (Steel), για τους αγωγούς μεταφοράς τα κράματα αλουμινίου (Aluminum

alloy) και για τους μονωτήρες το γυαλί (Glass). Τέλος, μοντελοποιήθηκαν τα KYT ανάλογα με το αν αναφέρονται σε σταθμούς των 150 kV ή των 400kV και με στοιχεία για το βάρος των βασικών υλικών, από τα οποία είναι κατασκευασμένα, όπως είναι ο χάλυβας, το αλουμίνιο και κάποιες ποσότητες χαλκού (Copper).

Οι γραμμές μεταφοράς που αναφέρονται στο ελληνικό δίκτυο μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας, είναι αυτές των τύπων E, B, 2B για τις γραμμές 150 kV και B'B', 2B'B', B'B'B' για τις γραμμές των 400 kV. Έτσι, μοντελοποιήθηκαν τα δύο δίκτυα υψηλής και υπερυψηλής τάσης ξεχωριστά, αθροίζοντας τους διάφορους τύπους γραμμών για την κάθε μία γραμμή του ελληνικού δικτύου.

Στον πίνακα 5.1 που ακολουθεί παρουσιάζονται τα δεδομένα για τα βάρη (σε tn) των υλικών από τα οποία αποτελείται μια τυπική γραμμή μεταφοράς των 150 kV και 400 kV (πυλώνες από χάλυβα, αγωγοί μεταφοράς από κράματα αλουμινίου και μονωτήρες από γυαλί), καθώς και ενός αντίστοιχου τυπικού KYT (υλικά χάλυβας, αλουμίνιο και χαλκός).

ΤΥΠΟΣ ΓΡΑΜΜΗΣ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ	ΜΗΚΟΣ Γ.Μ. (km)	ΠΥΛΩΝΕΣ (tn)	ΑΓΩΓΟΙ (tn)	ΜΟΝΩΤΗΡΕΣ (kg)
E	24826	5213	471694	1886776
B	26913	8074	393338	1573352
2B	122737	53186	2625200	10500798
B'B'	7158	2648	85896	515376
2B'B'	207257	83656	2411712	14470272
B'B'B'	17046	6307	174248	1045488

KYT	ΧΑΛΥΒΑΣ (kg)	ΑΛΟΥΜΙΝΙΟ (kg)	ΧΑΛΚΟΣ (kg)
400 kV	656708	27126	25448
150 kV	288982	22220	25448

Πίνακας 5.1: Στοιχεία γραμμών μεταφοράς και βάρος υλικών [51]

Οι πρότυποι περιβαλλοντικοί δείκτες που χρησιμοποιούνται και τα αποτελέσματα του λογισμικού SimaPro 7.1, είναι αριθμοί που εκφράζουν το συνολικό περιβαλλοντικό φορτίο ενός προϊόντος ή μιας διεργασίας. Με αυτούς, κάθε σχεδιαστής ή διαχειριστής προϊόντος (product manager) έχει τη δυνατότητα να αναλύσει τα περιβαλλοντικά φορτία των προϊόντων κατά τον κύκλο ζωής τους. Ως μέθοδος είναι προσανατολισμένη στις επιπτώσεις (damage-oriented method) και λύνει τα προβλήματα αυτά, περιλαμβάνοντας μια μέθοδο για τον υπολογισμό των βαρών των εκάστοτε συντελεστών. Έτσι, υπολογίζεται ένα μοναδικό αποτέλεσμα (single score) για τις συνολικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Ταυτόχρονα, δεδομένα για τις συνηθέστερες διεργασίες και προϊόντα έχουν συλλεγεί εκ των προτέρων και βρίσκονται στις βάσεις δεδομένων του λογισμικού [17]. Οι περιβαλλοντικοί δείκτες που χρησιμοποιούνται για την καταγραφή των επιπτώσεων από το ελληνικό δίκτυο ηλεκτροπαραγωγής είναι οι CML 2 Baseline 2000 [14] και Eco-Indicator 95 [11]. Τα αναμενόμενα αποτελέσματα από την ανάλυση κύκλου ζωής, είναι οι εκπομπές CO₂ από το δίκτυο παραγωγής και μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας και η αντίστοιχη κατανάλωση ενέργειας (σε Joule) απ'όλα τα στάδια του κύκλου ζωής τους, με σεβασμό στους εκάστοτε περιορισμούς που εμφανίζονται από τη βάση δεδομένων του SimaPro 7.1. Με απλά λόγια, σκοπός είναι ο προσδιορισμός της πιο ρυπογόνου μονάδας παραγωγής στο ελληνικό ηλεκτρικό δίκτυο και η σύγκριση των ρύπων από τα δύο δίκτυα μεταφοράς και παραγωγής.

5.3. Αποτελέσματα ΑΚΖ και εκτίμηση επιπτώσεων από εκπομπές GHG του ελληνικού ηλεκτρικού δικτύου

Τα αποτελέσματα, όπως παρουσιάζονται στη συνέχεια, αποτυπώνουν τις εκπομπές CO_{2eq} από όλες τις διεργασίες που περιγράφηκαν παραπάνω, καθώς και τις αντίστοιχες ποσότητες ενέργειας που καταναλώθηκαν στα στάδια του κύκλου ζωής που λαμβάνονται υπόψη στη μελέτη.

Στους πίνακες 5.2 και 5.3 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για το Διασυνδεδεμένο και Μη Διασυνδεδεμένο δίκτυο παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από το πρόγραμμα SimaPro 7.1. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται για τους περιβαλλοντικούς δείκτες CML 2 Baseline 2000 και Eco-Indicator 95, αντίστοιχα. Η περιβαλλοντική αξιολόγηση βασίζεται στις εκπομπές CO₂ (gr/kWh, Πίνακας 5.2) και στην κατανάλωση ενέργειας (TJ, Πίνακας 5.3), λόγω των βασικών υλικών και των απαιτούμενων για την παραγωγή τους διαδικασιών, οι οποίες καταχωρούνται στις βάσεις δεδομένων του προγράμματος. Στη συνέχεια, στον πίνακα 5.4 (α,β), παρουσιάζονται τα αθροιστικά αποτελέσματα εκπομπών CO_{2eq} (kg - CML 2 Baseline 2000) και ενέργειας (TJ - Eco-Indicator 95), για το δίκτυο παραγωγής (α) και μεταφοράς (β) ηλεκτρικής ενέργειας της Ελλάδας.

ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΔΙΚΤΥΟ	ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΠΑΡΑΓΩΓΗ (MWh)
Μη Διασυνδεδεμένο Δίκτυο	5.826.315
Διασυνδεδεμένο Δίκτυο	50.286.000

a) Μη Διασυνδεδεμένο Δίκτυο

	CML 2 Baseline 2000	CML 2 Baseline 2000	Eco-Indicator 95

Μονάδα παραγωγής	Εκπομπές (kg CO ₂)	Εκπομπές (gr / kWh)	Εκπομπές (gr / kWh)
ΜΥΗΣ	3,79E+03	4,01	3,87
Πετρέλαιο	4,37E+09	882,41	874,33
Φωτοβολταϊκά	1,00E+07	54,45	50,80
Ανεμογεννήτριες	1,96E+07	28,43	26,98
ΣΥΝΟΛΟ	4,40E+09	755,19	746,61

b) Διασυνδεδεμένο Δίκτυο

	CML 2 Baseline 2000	CML 2 Baseline 2000	Eco-Indicator 95
Μονάδα παραγωγής	Εκπομπές (kg CO ₂)	Εκπομπές (gr / kWh)	Εκπομπές (gr / kWh)
ΜΥΗΣ	2,84E+06	4,02	3,88
Πετρέλαιο	6,66E+07	882,94	873,66
Φωτοβολταϊκά	1,73E+08	54,55	50,77
Ανεμογεννήτριες	1,10E+08	28,53	26,97
Βιοαέριο/Βιομάζα	2,52E+07	113,59	113,59
Φυσικό Αέριο	8,57E+09	640,46	621,77
Λιγνίτης	3,38E+10	1296,10	1288,43
Υ/Η	4,04E+07	10,98	7,47
Συνδυασμένου Κύκλου	6,29E+07	334,55	317,53
ΣΥΝΟΛΟ	4,29E+10	853,12	843,18

Πίνακας 5.2: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα εκπομπών CO₂ (kg) για Διασυνδεδεμένο Δίκτυο Παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας (SimaPro 7.1, “CML 2 Baseline 2000”, “Eco-Indicator 95”)

c) Αποτελέσματα από τον περιβαλλοντικό δείκτη Eco-Indicator 95, για την κατανάλωση ενέργειας σε TJ, από τα στάδια του κύκλου ζωής του Μη Διασυνδεδεμένου και Διασυνδεδεμένου Δικτύου παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.

	Μη Διασυνδεδεμένο Δίκτυο	Διασυνδεδεμένο Δίκτυο
Μονάδες παραγωγής	Ενέργεια (TJ LHV)	Ενέργεια (TJ LHV)
ΜΥΗΣ	4,39	3280
Πετρέλαιο	61300	933
Φωτοβολταϊκά	192	3310
Ανεμογεννήτριες	327	1830
Βιοαέριο/Βιομάζα		124
Φυσικό Αέριο		150000
Λιγνίτης		530000
Υ/Η		14100
Συνδυασμένου Κύκλου		868
ΣΥΝΟΛΟ	61800	705000

Πίνακας 5.3: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα (κατανάλωσης) ενέργειας (TJ), για Διασυνδεδεμένο και Μη δίκτυο παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας (SimaPro 7.1, “Eco-Indicator 95”)

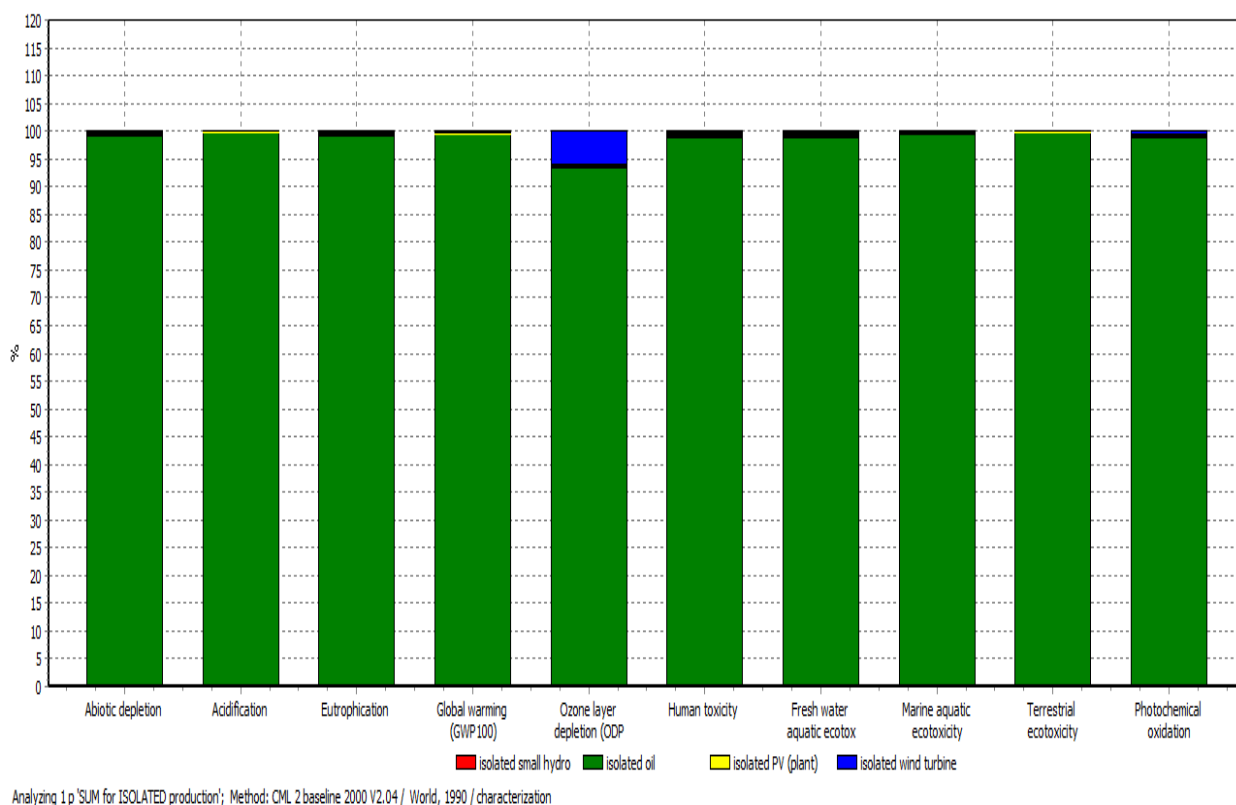
Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται τα αθροιστικά αποτελέσματα των εκπομπών (CO_{2eq} - CML 2 baseline 2000 για Διασυνδεδεμένο και Μη δίκτυο) και της ενέργειας (MJ - Eco-Indicator 95 για το Διασυνδεδεμένο δίκτυο), από το δίκτυο παραγωγής και μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας της Ελλάδας.

	CML 2 baseline 2000	Eco-Indicator 95
(α) Δίκτυο παραγωγής	Εκπομπές (gr/kWh)	Ενέργεια (TJ LHV)
Μη Διασυνδεδεμένο Δίκτυο	755,19	61800
Διασυνδεδεμένο Δίκτυο	853,12	705000
ΑΘΡΟΙΣΤΙΚΟ ΣΥΝΟΛΟ	843	766000
(β) Δίκτυο Μεταφοράς Διασυνδεδεμένου Δικτύου	Εκπομπές (gr/kWh)	Ενέργεια (TJ LHV)
Γραμμές Μεταφοράς	33,81	24500
ΚΥΤ	7,68	6350
ΑΘΡΟΙΣΤΙΚΟ ΣΥΝΟΛΟ	41,48	30800

Πίνακας 5.4 (α,β): Συγκεντρωτικά αποτελέσματα εκπομπών CO_{2eq} (kg - CML 2 Baseline 2000) και ενέργειας (TJ - Eco-Indicator 95), για το δίκτυο παραγωγής (α) και μεταφοράς (β) ηλεκτρικής ενέργειας της Ελλάδας (SimaPro 7.1)

5.4. Ερμηνεία αποτελεσμάτων AKZ και Περιβαλλοντική αξιολόγηση

Η ερμηνεία των αποτελεσμάτων της ανάλυσης κύκλου ζωής, ακολουθεί τη δομή και τη μοντελοποίηση που επιλέχθηκε στα όρια του συστήματος της εργασίας. Έτσι, στις εικόνες 5.1-5.7, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από το περιβάλλον του SimaPro 7.1 για τις κατηγορίες επιπτώσεων που αναφέρονται στο δείκτη CML Baseline 2000, ανά τύπο καυσίμου για το δίκτυο παραγωγής (5.1, 5.2), ανά στοιχείων δικτύου μεταφοράς (5.3, 5.4), ανά γραμμές μεταφοράς (5.5, 5.6) και τέλος, αθροιστικά οι επιπτώσεις από το ελληνικό ηλεκτρικό δίκτυο (5.7). Τα δεδομένα που λαμβάνει υπόψη ο συγκεκριμένος περιβαλλοντικός δείκτης αξιολόγησης είναι μία βασική τιμή (baseline) που στηρίζεται στην αρχή των βέλτιστων διαθέσιμων πρακτικών, για κάθε κατηγορία επιπτώσεων. Οι βασικοί αυτοί δείκτες αντιπροσωπεύουν τις εκπομπές από τις εκάστοτε διεργασίες, σε έδαφος, νερό και αέρα [35].

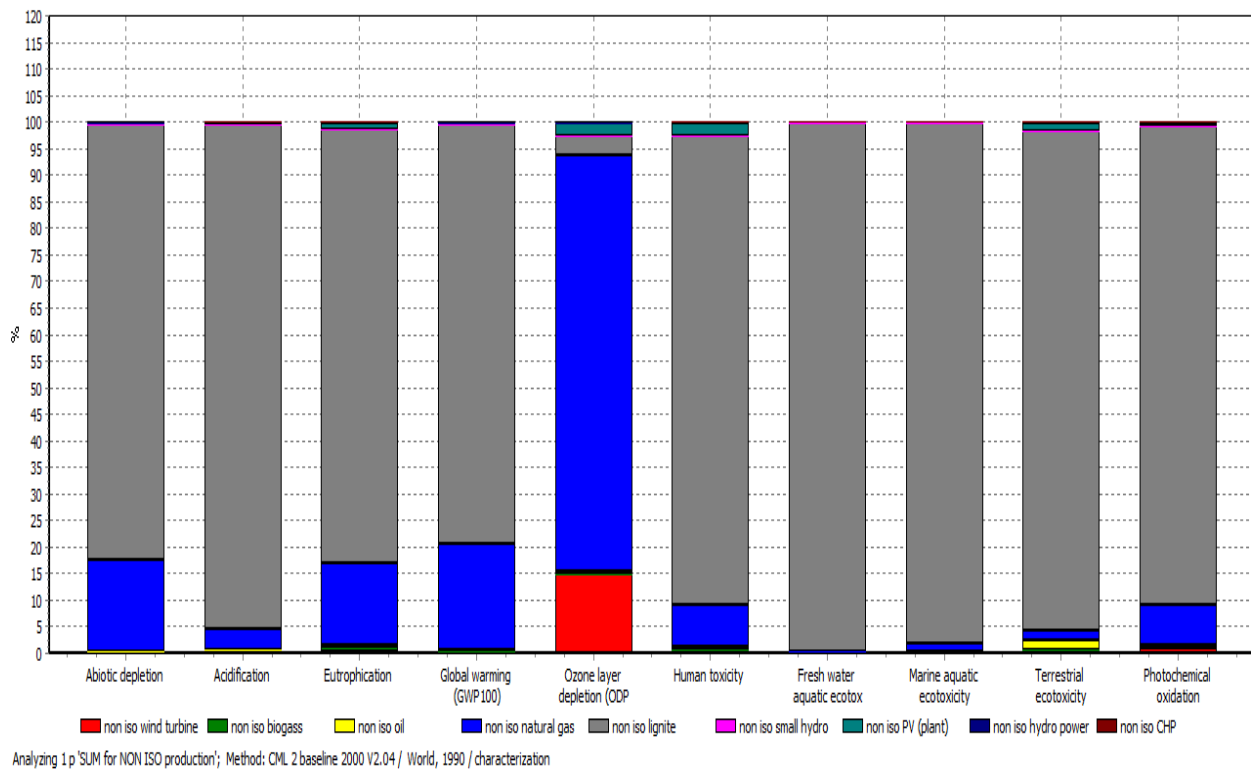


Εικόνα 5.1: Περιβαλλοντική αξιολόγηση δικτύου παραγωγής για το απομονωμένο δίκτυο (SimaPro 7.1.)

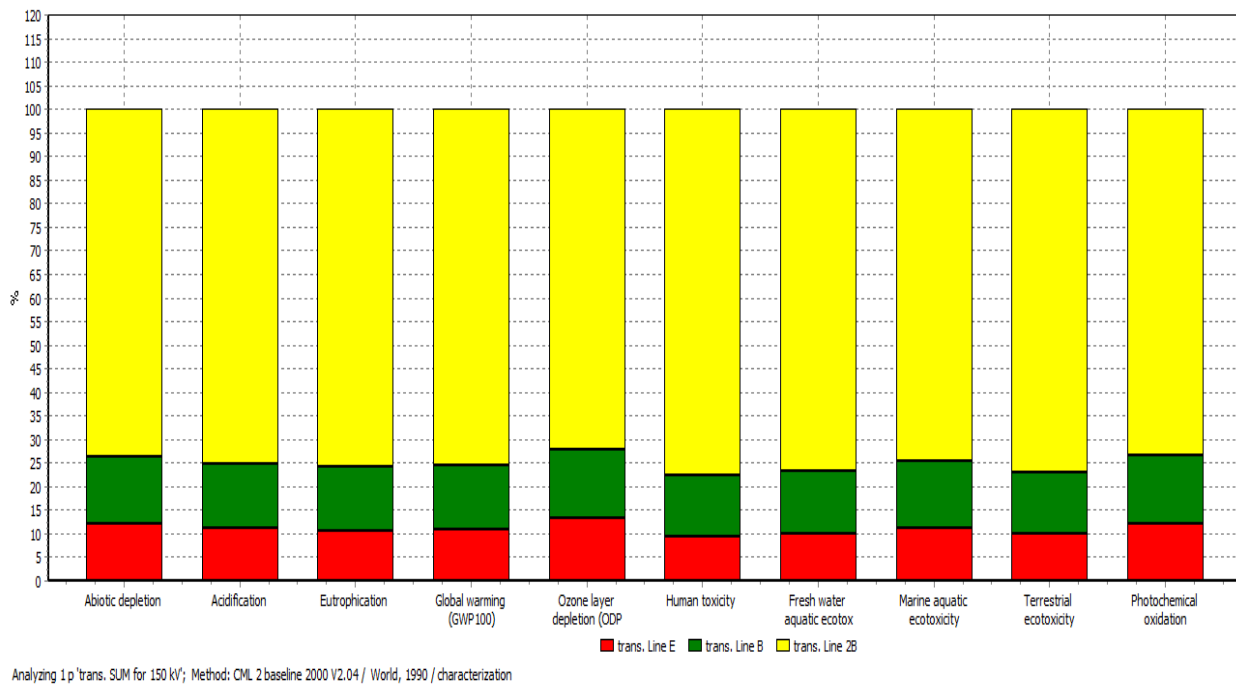
Στην εικόνα 5.1 αποτυπώνεται η υπεροχή στις περιβαλλοντικές επιπτώσεις, από τη χρήση πετρελαιομηχανών για την παραγωγή ενέργειας στα μη διασυνδεδεμένα νησιά (ΜΔΝ), σε όλες τις κατηγορίες επιπτώσεων. Το στάδιο του κύκλου ζωής που συνεισφέρει περισσότερο σε αέρια του θερμοκηπίου, είναι αυτό της λειτουργίας του σταθμού ενώ, το φάσμα των εκπομπών GHG και των αντίστοιχων κατηγοριών περιβαλλοντικών επιπτώσεων (GWP 100) που καταγράφεται, οφείλεται αφενός στον τύπο της τεχνολογίας του σταθμού παραγωγής και στην απόδοση μεταροπής του πετρελαίου σε ηλεκτρική ενέργεια και αφετέρου στον τρόπο λειτουργίας του σταθμού για την κάλυψη των φορτίων βάσης των νησιών.

Στην εικόνα 5.2 φαίνονται οι αντίστοιχες αρνητικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις, από το διασυνδεδεμένο δίκτυο παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Καταγράφεται σημαντική συνεισφορά, στην συντριπτική πλειοψηφία των κατηγοριών, από τη χρήση λιγνιτικών σταθμών για την κάλυψη της ενεργειακής ζήτησης της χώρας ενώ, σημαντικές καταγράφονται και οι επιπτώσεις από τις μονάδες φυσικού αερίου, ειδικά για την κατηγορία του σχηματισμού του αερίου όζον (Ozone Depletion - περίπου το 80% των συνολικών εκπομπών γι' αυτή την κατηγορία επιπτώσεων), λόγω των εκπομπών μεγάλων ποσοτήτων μεθανίου από τον κύκλο ζωής του καυσίμου. Οι εκπομπές αυτές καθώς και CO₂ που είναι υπεύθυνες για το φαινόμενο της υπερθέρμανσης του πλανήτη, προέρχονται από την επεξεργασία του φυσικού αερίου, από τη λειτουργία του αγωγού μεταφοράς (κυρίως από τους συμπιεστές) και από τις διαρροές κατά τη μεταφορά του. Για του σταθμούς παραγωγής από λιγνίτη, η πλειοψηφία των εκπομπών (GWP 100 – περίπου το 80%), προέρχεται από τη λειτουργία του ίδιου του σταθμού και λόγω του

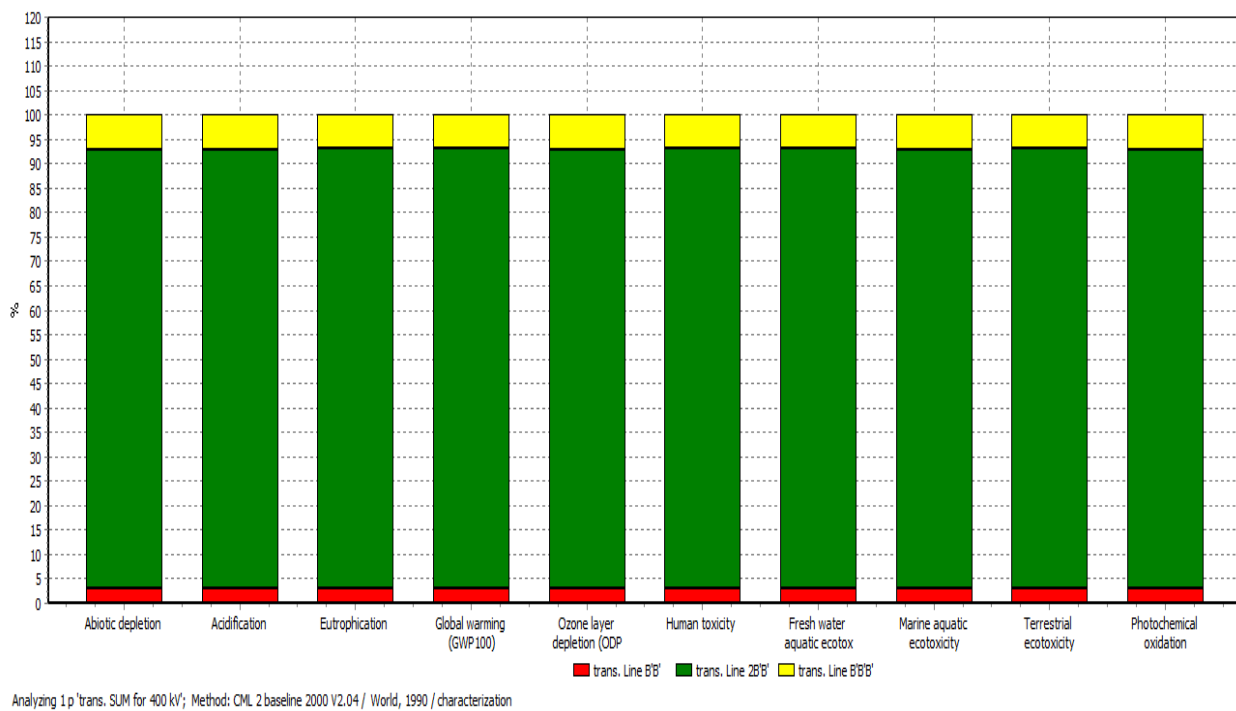
ότι η μέση θερμική απόδοση της μονάδας είναι χαμηλή (35,2%), Έτσι, το καύσιμο έχει μεγάλη περιεκτικότητα σε άνθρακα και άρα το καθιστά πιο ρυπογόνο, σε σχέση με όλες τις άλλες μονάδες παραγωγής του δικτύου. Επιπλέον, οι λιγνιτικές μονάδες, χρειάζονται ορυχεία για την εξόρυξη του λιγνίτη, όμως συνηθίζεται η θέση των σταθμών να είναι δίπλα στα ορυχεία και έτσι δεν υπάρχει σημαντική συνεισφορά από τη μεταφορά της πρώτης ύλης (καυσίμων). Τέλος, σημαντική καταγράφεται η συνεισφορά των μονάδων φυσικού αερίου, σε σχέση με τις υπόλοιπες, στην κατηγορία της υπερθέρμανσης του πλανήτη (GWP 100 – περίπου 20%), της οξίνισης (Acidification – 5%) και του ευτροφισμού (Eutrophication – πάνω από 15%) ενώ, σημαντική είναι (και στα δύο δίκτυα) η συνεισφορά των Α/Γ στο σχηματισμό όζοντος (15% και 6%, αντίστοιχα για διασυνδεδεμένο και μη), λόγω κυρίως των εκπομπών κατά τα στάδια της επεξεργασίας των πρώτων υλών και από το στάδιο της κατασκευής των υποδομών των αιολικών πάρκων.



Εικόνα 5.2: Περιβαλλοντική αξιολόγηση δικτύου παραγωγής για το διασυνδεδεμένο δίκτυο στο γραφικό περιβάλλον του SimaPro 7.1.



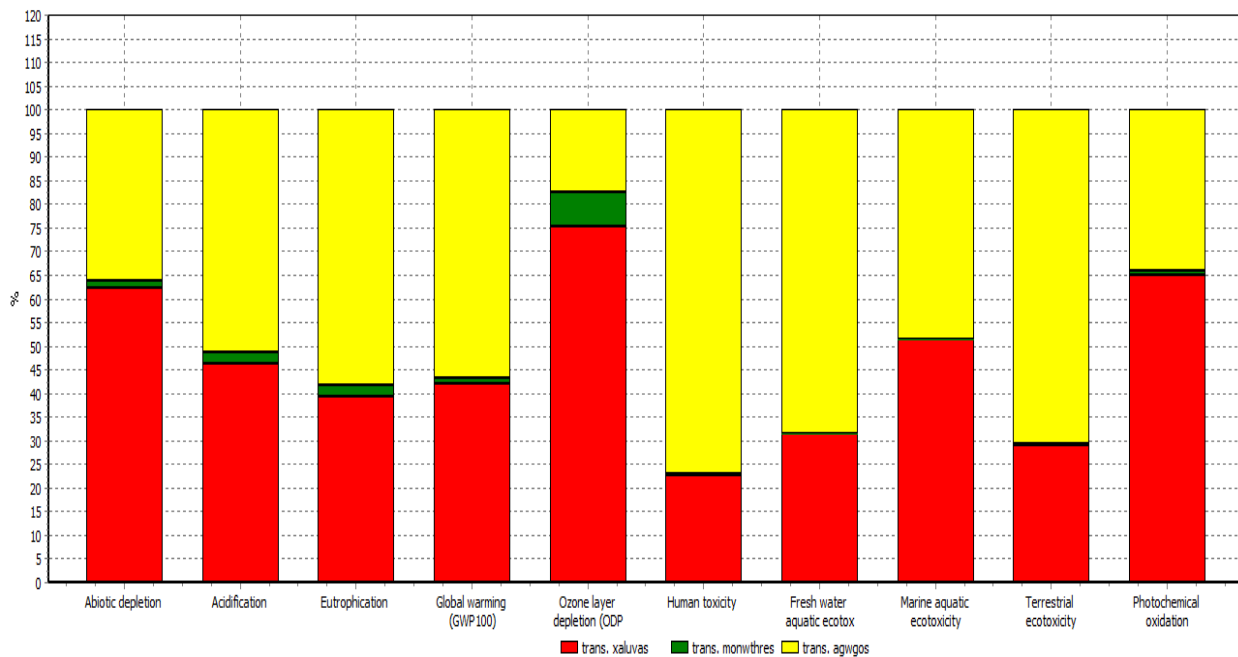
Εικόνα 5.3: Περιβαλλοντική αξιολόγηση γραμμής μεταφοράς 150kV για το διασυνδεδεμένο δίκτυο (SimaPro 7.1.)



Εικόνα 5.4: Περιβαλλοντική αξιολόγηση γραμμής μεταφοράς 400kV για το διασυνδεδεμένο δίκτυο (SimaPro 7.1.)

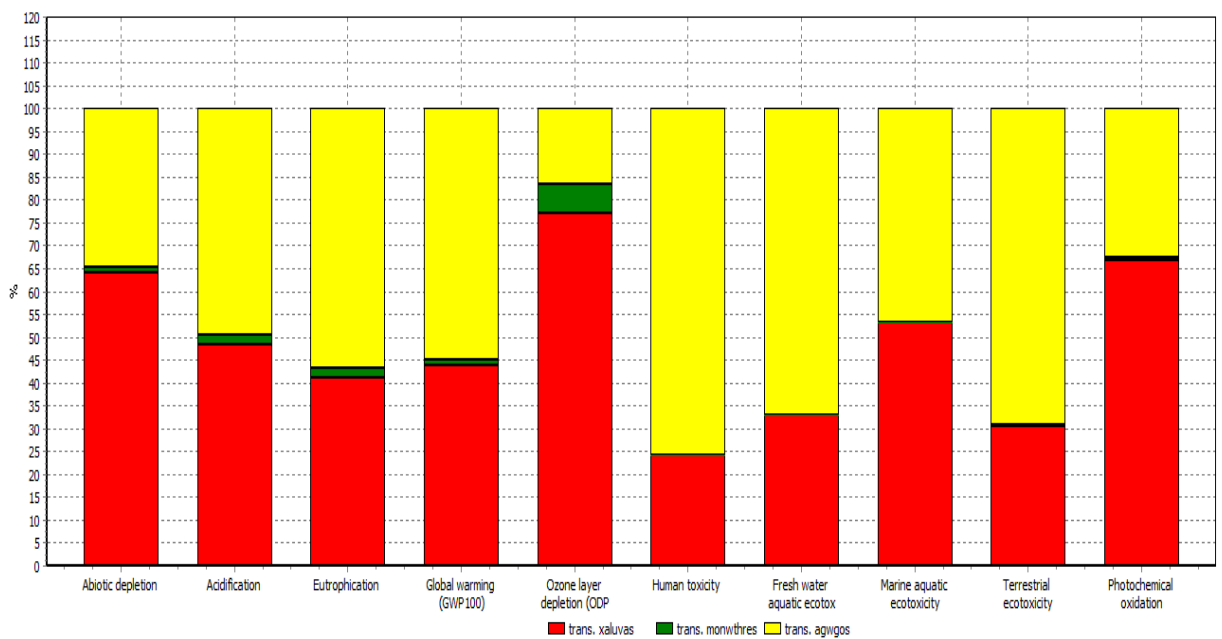
Στις εικόνες 5.3 και 5.4 αποτυπώνεται η περιβαλλοντική αξιολόγηση του δικτύου μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας, για το διασυνδεδεμένο δίκτυο της Ελλάδας. Σε αυτό βλέπουμε πώς για κάθε τύπο γραμμής μεταφοράς (150 kV, 400 kV) υπερಿಸχύνει ένας τύπος πυλώνα, σε όλους τους περιβαλλοντικούς δείκτες. Με δεδομένο ότι όλοι οι πυλώνες μοντελοποιήθηκαν με τα ίδια υλικά, τότε η διαφορά αυτή οφείλεται στο μήκος γραμμών που καλύπτει ο κάθε τύπος. Πράγματι, η γραμμή μεταφοράς 2B καλύπτει, σχεδόν, πενταπλάσια χιλιόμετρα απόστασης στο δίκτυο και αντίστοιχα η γραμμή μεταφοράς 2B'Β' καλύπτει πάνω από 10 φορές περισσότερα χιλιόμετρα από την κάθε άλλη γραμμή της κατηγορίας της.

Στις εικόνες 5.5 και 5.6 βλέπουμε τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις από τα υλικά από τα οποία αποτελούνται οι αντίστοιχες γραμμές μεταφοράς, όπως μοντελοποιήθηκαν. Οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις είναι σαφώς μεγαλύτερες για τους αγωγούς μεταφοράς (GWP 100 – 55%) σε σχέση με του χαλύβδινους πυλώνες στήριξης (GWP 100 – 43%), σχεδόν σε όλες τις κατηγορίες. Τα αποτελέσματα αυτά οφείλονται, κυρίως, στις πολύ ρυπογόνες διεργασίες που ακολουθούνται σε όλο τον κύκλο ζωής του αλουμινίου, σε σχέση με αυτές από τον κύκλο ζωής του χάλυβα.



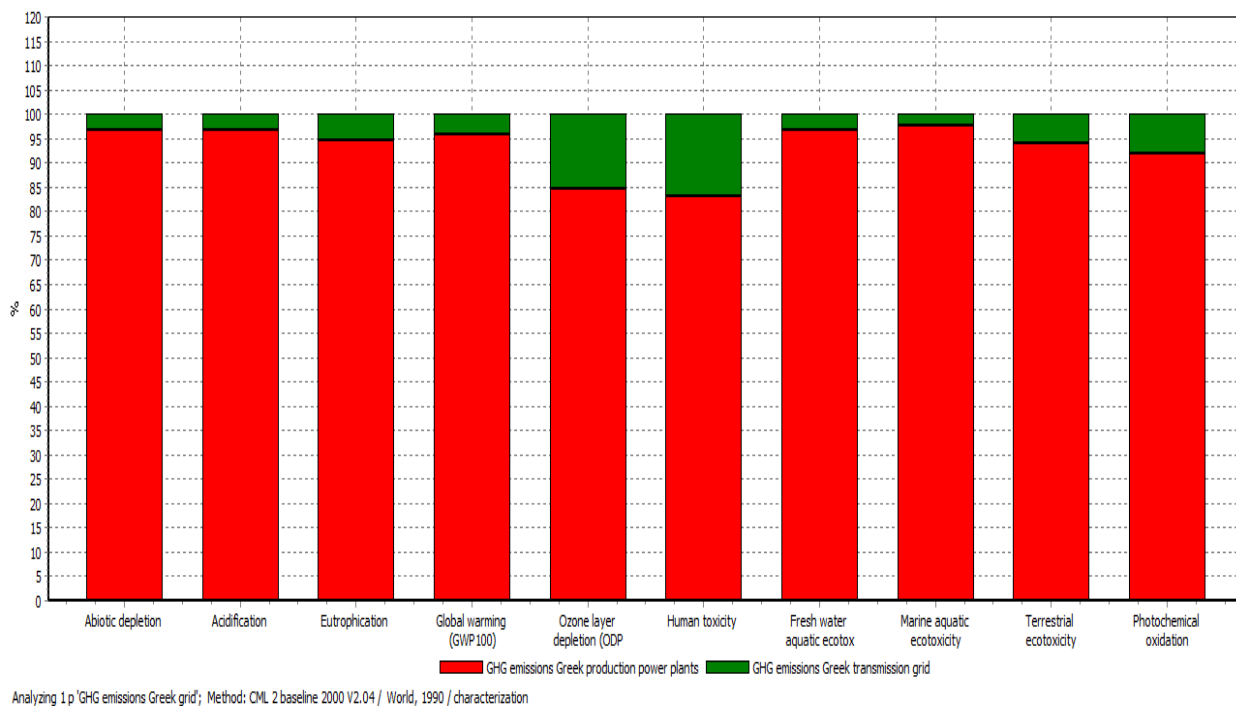
Analyzing 1 p'trans. Line 2B; Method: CML 2 baseline 2000 V2.04 / World, 1990 / characterization

Εικόνα 5.5: Περιβαλλοντική αξιολόγηση στοιχείων γραμμής μεταφοράς 2B για το διασυνδεδεμένο δίκτυο (SimaPro 7.1.)



Analyzing 1 p'trans. Line 2B'; Method: CML 2 baseline 2000 V2.04 / World, 1990 / characterization

Εικόνα 5.6: Περιβαλλοντική αξιολόγηση στοιχείων γραμμής μεταφοράς 2B'B' για το διασυνδεδεμένο δίκτυο (SimaPro 7.1.)



Εικόνα 5.7: Περιβαλλοντική αξιολόγηση του δικτύου παραγωγής και μεταφοράς της Ελλάδας (SimaPro 7.1.)

Στην εικόνα 5.7. βλέπουμε τις επιπτώσεις από τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου, για το ελληνικό δίκτυο παραγωγής και μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας. Οι εκπομπές από το δίκτυο μεταφοράς αναμένονται [31] μεταξύ 3-12% και πράγματι για την Ελλάδα κατέχουν το 4,86% των συνολικών εκπομπών GHG του ηλεκτρικού δικτύου (41 gr CO_{2eq}/kWh). Ωστόσο, οι υποδομές του δικτύου και τα υλικά από τα οποία είναι κατασκευασμένα τα καλώδια, είναι τα πιο ρυπογόνα στοιχεία των ελληνικών δικτύων μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας. Στη μελέτη δεν συμπεριλαμβάνονται καθόλου τα υποβρύχια καλώδια, που κυρίως συνδέουν τα απομονωμένα νησιά και γενικά το δίκτυο μεταφοράς των ΜΔΝ. Ενδιαφέρον ερευνητικά, θα είχε μια ξεχωριστή ΑΚΖ για το

δίκτυο μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας των ΜΔΝ. Για το δίκτυο παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, η ΑΚΖ δείχνει ότι η πιο ρυπογόνα τεχνολογία του δικτύου είναι οι λιγνιτικές μονάδες ηλεκτροπαραγωγής ενώ, οι σταθμοί παραγωγής ενέργειας με χρήση πετρελαίου είναι η αμέσως επόμενη. Οι μονάδες φυσικού αερίου έρχονται στην τρίτη θέση στη συντριπτική πλειοψηφία των περιβαλλοντικών επιπτώσεων. Από την ανάλυση φαίνεται, χωρίς όμως να θεωρηθεί ότι ακολουθείται γενικά αυτή η κατανομή, πώς οι εκπομπές από το διασυνδεδεμένο και μη δίκτυο πάνε ανάλογα και με τη συμμετοχή τους στο ενεργειακό μίγμα της χώρας, δηλαδή συνεισφορά 10% για τα ΜΔΝ και 90% για το ηπειρωτικό δίκτυο. Αν συγκρίνουμε, όμως, μεμονωμένα τα δύο δίκτυα παραγωγής, τότε συμπεραίνουμε ότι το δίκτυο παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στα νησιά (755 gr CO_{2eq}/kWh) είναι εξίσου ρυπογόνο με το αντίστοιχο του ηπειρωτικού δικτύου (853 gr CO_{2eq}/kWh), λαμβάνοντας κιάλας υπόψη ότι το ενεργειακό μίγμα καλύπτεται στην πρώτη περίπτωση μόνο με 4 τύπους σταθμών παραγωγής ενώ στη δεύτερη από 9 συνολικά σταθμούς.

Θα πρέπει να τονιστεί στο σημείο αυτό ότι ο κάθε περιβαλλοντικός δείκτης (GWP, OD, AD, Acidification, Eutrophication κ.α.) αξιολογείται αυτόνομα διότι αναφέρεται σε συγκεκριμένες εκπομπές και επιπτώσεις και, δεν μπορεί να γίνει σύγκριση καλύτερης ή χειρότερης επίδοσης σε σχέση με διαφορετικούς περιβαλλοντικούς δείκτες ως βάση αναφοράς, για οποιαδήποτε συγκριτική ΑΚΖ μεταξύ δύο τεχνολογιών.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 – ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΜΕ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟ ΔΙΚΤΥΟ ΚΑΙ ΑΛΛΩΝ ΧΩΡΩΝ

Στο κεφάλαιο 6 γίνεται αξιολόγηση και έλεγχος των αποτελεσμάτων της ΑΚΖ, του ελληνικού δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας, με τα αποτελέσματα από αντίστοιχες μελέτες ΑΚΖ. Γίνεται σύγκριση των εκπομπών του δικτύου από τις μονάδες ηλεκτροπαραγωγής με τη βιβλιογραφία, καθώς και των εκπομπών των χωρών Αγγλία, Ιταλία, Μεξικό και Πορτογαλία με αυτές της Ελλάδας. Παρουσιάζεται επίσης, η σύσταση του ενεργειακού μίγματος της κάθε χώρας ξεχωριστά και γίνεται σύγκριση με το ελληνικό ενεργειακό μίγμα. Τέλος, δίνεται ερμηνεία για τις όποιες διαφορές εμφανίζονται στα αποτελέσματα.

6.1. Εκπομπές GHG από το ηλεκτρικό δίκτυο άλλων χωρών

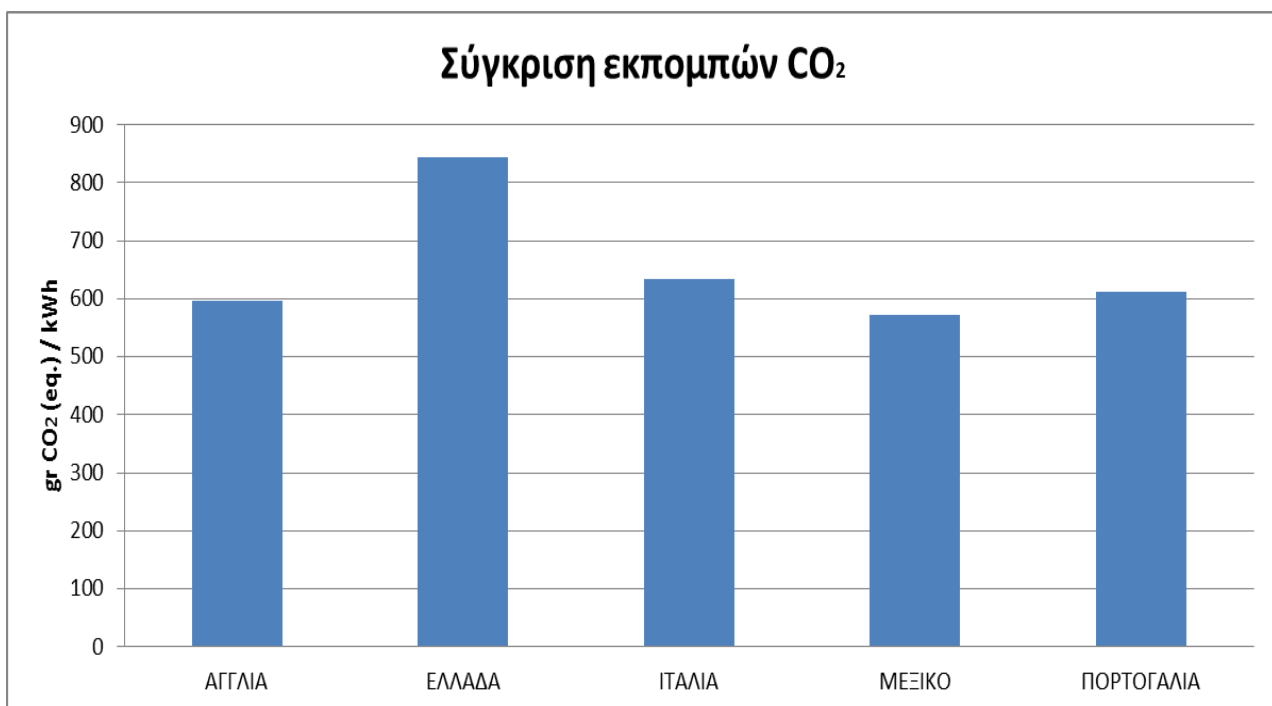
Για τους σκοπούς της πληρότητας των αποτελεσμάτων της ΑΚΖ, σε επίπεδο τεχνολογιών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας καθώς και ενεργειακού μίγματος καυσίμων που χρησιμοποιούνται στην Ελλάδα, παρουσιάζονται και οι αντίστοιχες εκπομπές από ανάλογη μελέτη ΑΚΖ [13], στην οποία μελετά το δίκτυο παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας των χωρών Αγγλία, Ιταλία, Μεξικό και Πορτογαλία (διάγραμμα 6.1). Οι εκπομπές CO_{2eq}/kWh από τις ηλεκτροπαραγωγικές μονάδες των παραπάνω χωρών καταγράφονται ως Αγγλία (597 gr CO_{2eq}/kWh), Ιταλία (634 gr CO_{2eq}/kWh), Μεξικό (571 gr CO_{2eq}/kWh) και Πορτογαλία (611 gr CO_{2eq}/kWh). Λόγω της υψηλής κάλυψης, του ελληνικού ενεργειακού μίγματος, με μονάδες ηλεκτροπαραγωγής που βασίζουν τη λειτουργία τους σε ορυκτά καύσιμα, προτιμήθηκαν, για την αξιολόγηση και τον έλεγχο των αποτελεσμάτων της ΑΚΖ, οι χώρες που έχουν παρόμοια εικόνα ενεργειακού μίγματος. Στον πίνακα 6.1 παρουσιάζονται οι τεχνολογίες που καλύπτουν τη ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας των χωρών και τα ποσοστά κάλυψής της.

countries energy mix (%)	ΑΓΓΛΙΑ	ΕΛΛΑΔΑ	ΙΤΑΛΙΑ	ΜΕΞΙΚΟ	ΠΟΡΤΟΓΑΛΙΑ
	(2006)	(2012)	(2004)	(2004)	(2004)
Fossil fuels	78,70%	79,62%	78,90%	71,70%	76,80%
Coal / Lignite*	14,00%	46,81%	15,10%	33,00%	33,60%
Oil	21,60%	8,96%	16,10%	12,70%	1,10%
Gas	42,60%	23,85%	47,60%	26,00%	42,10%
Biomass / Biogas	-	0,40%	50,00%	2,80%	1,00%
Nuclear	4,80%	-	-	-	19,70%
Hydro	13,50%	6,56%	19,90%	23,50%	2,00%
Geothermal	3,00%	-	-	-	-
Solar PV	-	5,98%	0,00%	0,00%	-
Wind	0,02%	8,10%	0,70%	1,90%	0,50%

Πίνακας 6.1: Ενεργειακό μίγμα των χωρών Αγγλία, Ελλάδα, Ιταλία, Μεξικό και Πορτογαλία

[13]

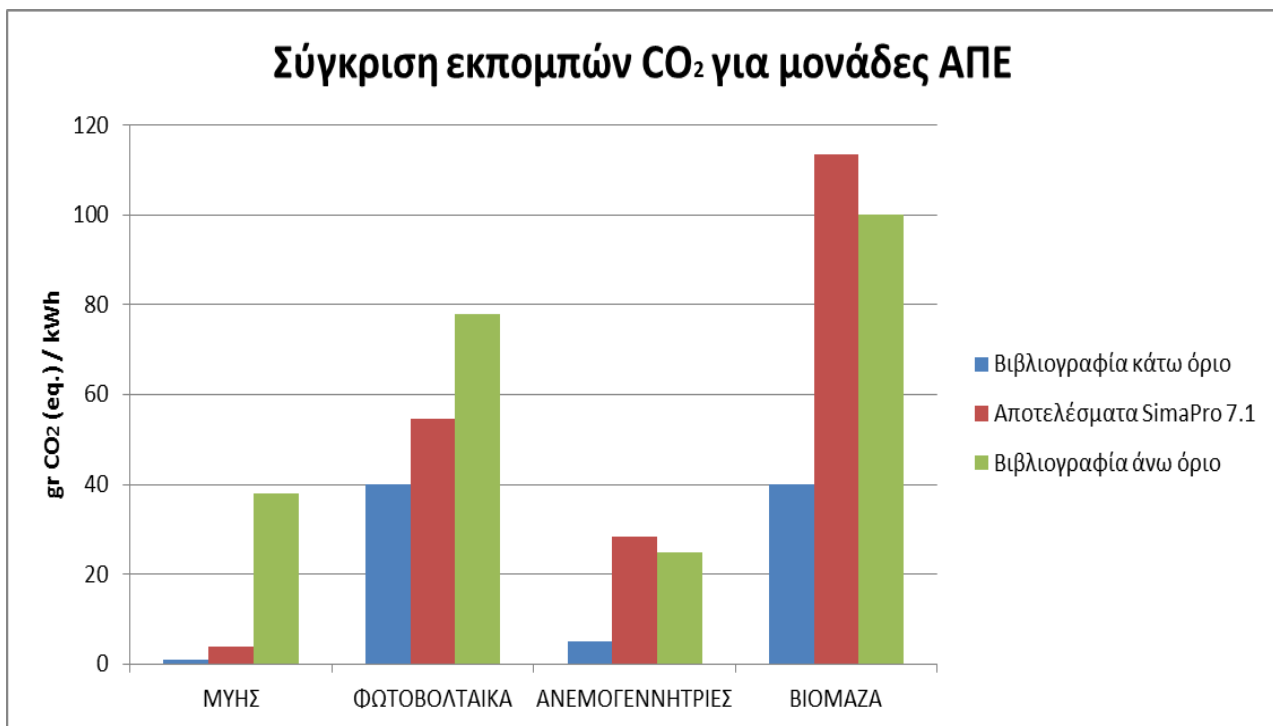
*Ο λιγνίτης αναφέρεται μόνο στην Ελλάδα



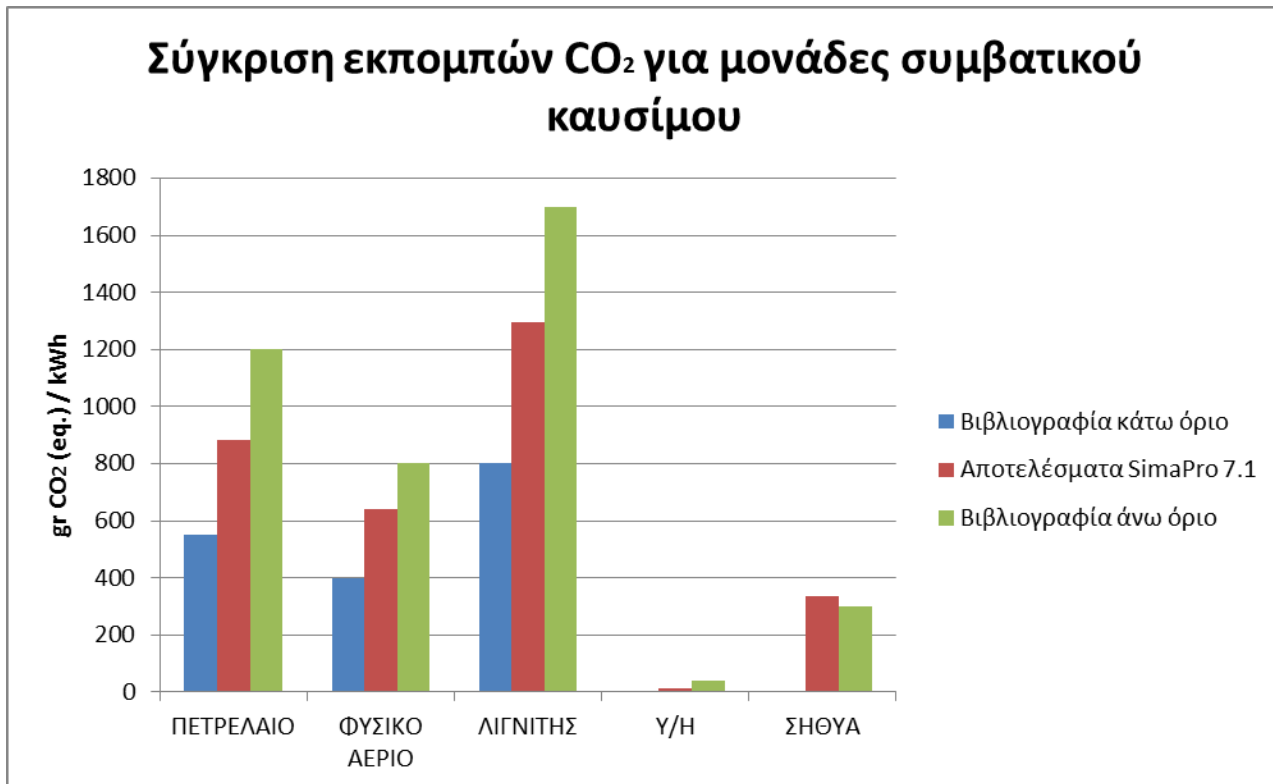
Διάγραμμα 6.1: Σύγκριση εκπομπών CO₂ (σε gr/kWh) ελληνικού δικτύου παραγωγής και μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας [35] με βιβλιογραφία [9]

6.2. Σύγκριση εκπομπών GHG με το ελληνικό ηλεκτρικό δίκτυο

Αρχικά, στα διαγράμματα 6.2 και 6.3, γίνεται σύγκριση των αποτελεσμάτων της ΑΚΖ για τις εκπομπές CO_{2eq}/kWh από τις ηλεκτροπαραγωγικές μονάδες της χώρας (ΑΠΕ και συμβατικού καυσίμου, αντίστοιχα), με αυτές που βρέθηκαν στην βιβλιογραφία [9]. Από τα διαγράμματα βλέπουμε ότι τα αποτελέσματα είναι εντός των ορίων της βιβλιογραφίας στη συντριπτική πλειοψηφία ενώ, δεν εμφανίζονται μεγάλες αποκλίσεις για όσες μονάδες ξεπερνούν τα άνω όρια αυτής. Στη συνέχεια, στο διάγραμμα 6.4 γίνεται αποτύπωση των εκπομπών CO_{2eq}/kWh από το ελληνικό δίκτυο παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και από το δίκτυο μεταφοράς της.

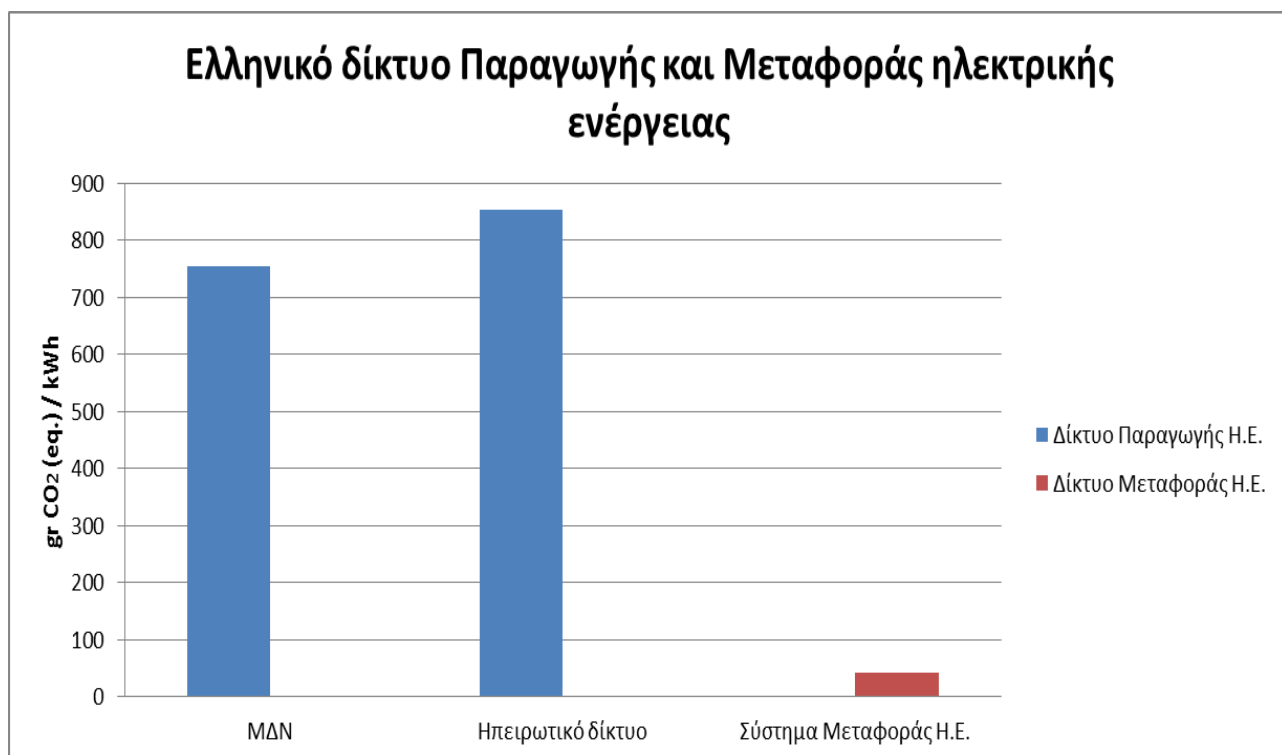


Διάγραμμα 6.2: Σύγκριση εκπομπών CO₂ (σε gr/kWh) μονάδων ΑΠΕ με βιβλιογραφία [9]



Διάγραμμα 6.3: Σύγκριση εκπομπών CO₂ (σε gr/kWh) μονάδων συμβατικού καυσίμου με βιβλιογραφία [9]

Οι τυχόν αποκλίσεις που παρατηρούνται με τη βιβλιογραφική αναφορά, σε ορισμένες τεχνολογίες (Α/Γ, μονάδες βιομάζας και συνδυασμένου κύκλου), μπορεί να οφείλεται στις εκάστοτε μεθοδολογικές προσεγγίσεις που χρησιμοποιήθηκαν για την μοντελοποίηση των συστημάτων αυτών αλλά και στην αντίστοιχη συλλογή των στοιχείων. Επίσης, σημαντικός παράγοντας για τις αποκλίσεις αυτές είναι η περιορισμένη βάση δεδομένων, του λογισμικού που χρησιμοποιήθηκε για την ανάλυση, με αποτέλεσμα να επιλεγούν βάσεις δεδομένων που προσομοιάζουν στις μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας τις ελληνικής επικράτειας. Επομένως, εισέρχεται και ένας άλλος παράγοντας στον οποίο μπορεί να οφείλονται οι αποκλίσεις, στις περιπτώσεις αυτές, όπως η υποκειμενική σκοπιά του ερευνητή για τα όρια και τη δομή του υπό εξέταση συστήματος.

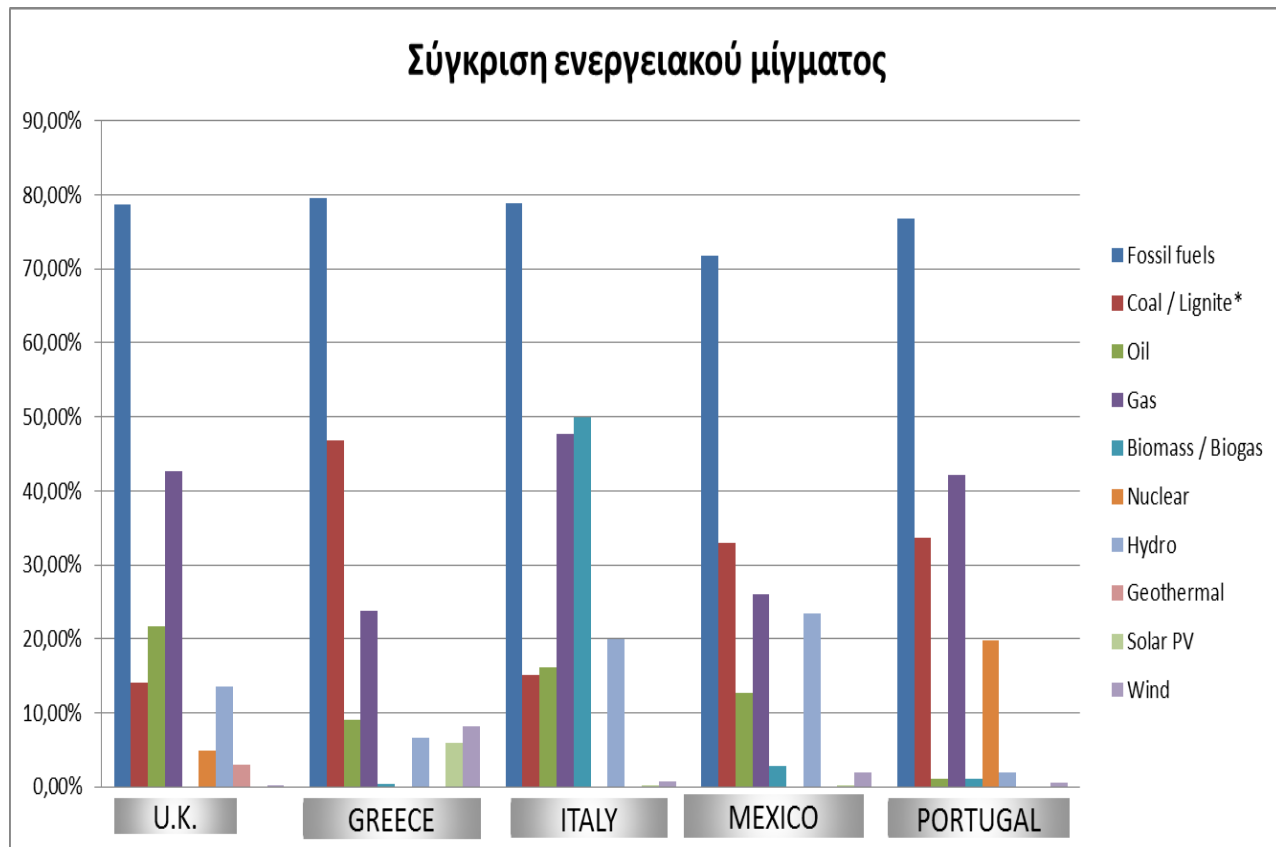


Διάγραμμα 6.4: Εκπομπές CO₂ (σε gr/kWh) ελληνικού δικτύου παραγωγής (Μη Διασυνδεδεμένο και Διασυνδεδεμένο) και μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας [35]

Τέλος, στο διάγραμμα 6.1 συγκρίνονται οι εκπομπές από τις μονάδες ηλεκτροπαραγωγής του ελληνικού δικτύου, με αυτές των χωρών Αγγλία, Ιταλία, Μεξικό και Πορτογαλία [13].

Τα αποτελέσματα της περιβαλλοντικής αξιολόγησης, από την ανάλυση κύκλου ζωής του ηλεκτρικού δικτύου, εκφρασμένα σε εκπομπές GHG δείχνουν ότι, για την Ελλάδα, οι εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου είναι 843 gr CO_{2eq}/kWh. Τα αποτελέσματα δείχνουν πως η Ελλάδα έχει τις υψηλότερες εκπομπές, συγκριτικά με τις άλλες χώρες, πράγμα αναμενόμενο λόγω της μεγάλης συμμετοχής των ορυκτών καυσίμων στο ενεργειακό μίγμα (διάγραμμα 6.6) της χώρας αλλά κυρίως λόγω της (υπερ)κάλυψης της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας (φορτία βάσης), από τις λιγνιτικές και πετρελαϊκές μονάδες. Άλλες διαφορές που παρατηρούνται μεταξύ των χωρών μπορεί να οφείλονται στις προσεγγιστικές μεθόδους που ακολουθήθηκαν στις δύο μελέτες. Για παράδειγμα, για το ελληνικό δίκτυο παραγωγής ακολουθήθηκε μια “bottom-up” ανάλυση για τα στοιχεία από τα οποία αποτελείται το δίκτυο. Δηλαδή, μελετήθηκε ο κύκλος ζωής των μονάδων ηλεκτροπαραγωγής για να παράξουν συγκεκριμένη ποσότητα ενέργειας, σε ένα χρόνο. Σε αντίθεση με την AKZ των άλλων χωρών όπου χρησιμοποιήθηκε μια “top-down” ανάλυση, δηλαδή διαιρέθηκαν οι συνολικές εκπομπές GHG, από την κάθε μονάδα ηλεκτροπαραγωγής, με τη συνολική ετήσια παραγωγή της κάθε χώρας [13]. Άλλη αιτία είναι ότι στη μελέτη του ελληνικού συστήματος λαμβάνονται υπόψη οι εκπομπές από το δίκτυο παραγωγής και μεταφοράς ενέργειας. Συνεπώς, η ενεργειακή αυτονομία των νησιών και η ύπαρξη Διασυνδεδεμένου και Μη δικτύου συντελεί στις υψηλές εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου που καταγράφονται. Η μικρή σχετικά καταγεγραμμένη συμμετοχή των ΑΠΕ στην κάλυψη φορτίων ζήτησης, παρ’όλο την

ικανοποιητική διείσδυσή τους στο ενεργειακό μίγμα της χώρας, προσφέρει άλλη μία αιτιολόγηση των αποτελεσμάτων.



Διάγραμμα 6.6: Σύγκριση ενεργειακού μίγματος ελληνικού ηλεκτρικού δικτύου [δες κεφ. 5] με βιβλιογραφία [13]

*Ο λιγνίτης αναφάιρται μόνο στην Ελλάδα

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7 – ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Τα συμπεράσματα που ακολουθούν στο κεφάλαιο 7 παρουσιάζουν συγκεντρωτικά όλα τα αποτελέσματα της Ανάλυσης Κύκλου Ζωής που διεξήχθη για το ελληνικό σύστημα παραγωγής και μεταφοράς της ηλεκτρικής ενέργειας. Παράλληλα, προτάσεις για τη βελτίωση των περιβαλλοντικών επιδόσεων και τέλος, κάποιες προτάσεις για μελλοντικές έρευνες AKZ, που θα εστιάσουν στις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου, από το σύστημα παραγωγής και μεταφοράς της χώρας.

7.1. Συγκεντρωτικά αποτελέσματα

Στην παρούσα εργασία παρουσιάστηκε μια ανάλυση κύκλου ζωής (AKZ), με την οποία γίνεται προσπάθεια για μια ποιοτική και ποσοτική καταγραφή των αρνητικών επιπτώσεων κατά τη παραγωγή και μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας στην Ελλάδα. Η υπερθέρμανση του πλανήτη (GWP), για την οποία ευθύνονται οι εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου (GHG), χρησιμοποιήθηκε ως ο βασικός δείκτης περιβαλλοντικής αξιολόγησης των δύο δικτύων. Από την ανάλυση προκύπτει ότι οι εκπομπές από το διασυνδεδεμένο δίκτυο παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας ανέρχονται στα 853 gr CO_{2eq}/kWh ενώ για το αντίστοιχο δίκτυο των μη διασυνδεδεμένων νησιών στα 755 gr CO_{2eq}/kWh. Για το δίκτυο μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας και μόνο για τις γραμμές μεταφοράς υπερυψηλής και υψηλής τάσης (400 kV, 150 kV) του διασυνδεδεμένου δικτύου, οι εκπομπές προκύπτουν από την ανάλυση ότι είναι 41 gr CO_{2eq}/kWh. Τα αποτελέσματα της AKZ μπορούν να μεταφραστούν και διαφορετικά. Από την ανάλυση προκύπτει ότι για την ετήσια παραγωγή και μεταφορά περίπου 55 TWh ηλεκτρικής ενέργειας, χρειάζεται να απελευθερωθούν στην ατμόσφαιρα, από όλες τις διεργασίες συνολικά, 47.300.00 τόνοι CO₂, ενώ δαπανήθηκε απ'όλο τον κύκλο ζωής των δικτύων, ενέργεια της τάξης των 796.800 TJ (LHV). Σημειώνεται ότι 1 TJ αντιστοιχεί σε 0,000278 TWh, οπότε 796.800 TJ σε 221,52 TWh, επομένως για να “ισοφαριστεί” η

ενέργεια που καταναλώθηκε θα πρέπει οι σταθμοί να λειτουργούν για πάνω από τέσσερα χρόνια.

Το δίκτυο παραγωγής της Ελλάδας βασίζεται κατά 84,56% σε συμβατικά καύσιμα (στοιχεία 2012) [43] και κατά 15,44% σε μονάδες Α.Π.Ε (στοιχεία 2015) [48]. Επίσης το 10% της συνολικής παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας λαμβάνει χώρα στα μη διασυνδεδεμένα νησιά. Όπως αναμένεται λοιπόν, το μεγαλύτερο μερίδιο στις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου καταλαμβάνει το διασυνδεδεμένο δίκτυο παραγωγής σε σχέση με τα ΜΔΝ και αντίστοιχα, η συμμετοχή του δικτύου μεταφοράς ανέρχεται στο 4,86% των συνολικών εκπομπών του ηλεκτροπαραγωγικού τομέα της χώρας. Αν συγκρίνουμε, όμως, μεμονωμένα τα δύο δίκτυα παραγωγής, τότε συμπεραίνουμε ότι το δίκτυο παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στα νησιά είναι εξίσου ρυπογόνο με το αντίστοιχο του ηπειρωτικού, αν ληφθεί υπόψη ότι για το ενεργειακό μίγμα του μη διασυνδεδεμένου δικτύου χρησιμοποιούνται μόνο 4 τύποι σταθμών παραγωγής ενώ για το διασυνδεδεμένο 9 σταθμοί. Με δεδομένο ότι οι εκπομπές των ΜΔΝ φθάνουν να συνεισφέρουν έως και 10% στις συνολικές εκπομπές GHG της χώρας, καταλαβαίνουμε ότι με πιο σωστή διαχείριση της εποχικότητας που εμφανίζεται στην κάλυψη της ενεργειακής ζήτησης των νησιών, ίσως και με μερική απόσυρση των μηχανών diesel και ενίσχυση των ΑΠΕ, υπάρχουν προοπτικές μείωσης των συνολικών εκπομπών της χώρας. Βέβαια, τα μεγαλύτερα περιθώρια βελτίωσης παρουσιάζονται στο ηπειρωτικό δίκτυο όπου κατέχει και το 90% σχεδόν των συνολικών εκπομπών GHG. Για την ολοκλήρωση της ανάλυσης, η πιο ρυπογόνος τεχνολογία στο ενεργειακό μίγμα της Ελλάδας είναι οι λιγνιτικές μονάδες ηλεκτροπαραγωγής (1.296 gr CO_{2eq}/kWh) ενώ, οι σταθμοί παραγωγής ενέργειας με χρήση πετρελαίου (883 gr CO_{2eq}/kWh) είναι η αμέσως επόμενη. Οι μονάδες φυσικού αερίου (640 gr CO_{2eq}/kWh) έρχονται στην τρίτη θέση ενώ, από τις ΑΠΕ οι μονάδες βιομάζας (114 gr CO_{2eq}/kWh) έχουν το υψηλότερο

σκορ ως προς τις εκπομπές και ακολουθούν τα φωτοβολταϊκά (55 gr CO_{2eq}/kWh), με διπλάσιες σχεδόν εκπομπές από τις Α/Γ (28 gr CO_{2eq}/kWh).

7.2. Προτάσεις βελτίωσης περιβαλλοντικής απόδοσης

Οι πιο κάτω προτάσεις βασίζονται μόνο στις προφανείς περιβαλλοντικές επιπτώσεις που εξάγονται από την ΑΚΖ και όχι σε οικονομοτεχνικά στοιχεία, που μια ρεαλιστική μελέτη θα πρέπει να περιλαμβάνει οπωσδήποτε. Από την άλλη πλευρά κάθε μελέτη αντικατάστασης, βελτίωσης ή σημαντικής συντήρησης των ρυπογόνων μονάδων του δικτύου, θα πρέπει να συνοδεύεται από μία ΑΚΖ που να δείχνει και τις αντίστοιχες περιβαλλοντικές επιπτώσεις (θετικές ή αρνητικές).

Η μελέτη έδειξε ότι οι μονάδες με συμβατικά καύσιμα σαφώς υπερτερούν ως προς τις αρνητικές περιβαλλοντικές επιβαρύνσεις, σε σχέση με τις Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ). Υπάρχουν και θα πρέπει να αξιοποιηθούν οι δυνατότητες για αύξηση της συμμετοχής των ΑΠΕ στο ηλεκτρικό δίκτυο της Ελλάδας. Σενάριο πολύ πιο ρεαλιστικό σε σχέση με την είσοδο πυρηνικών σταθμών στο ενεργειακό μίγμα της χώρας. Η στροφή προς την βιώσιμη ανάπτυξη απαιτεί σχεδιασμό για την ομαλή μετάβαση σε πιο καθαρές μονάδες ηλεκτροπαραγωγής. Για την μείωση των εκπομπών από τις θερμικές μονάδες, οι οποίες καλύπτουν το μεγαλύτερο μέρος της ζήτησης, θα πρέπει να γίνουν βελτιώσεις πρωτίστως στις θερμικές αποδόσεις των μηχανών αυτών. Σε δεύτερο επίπεδο, θα πρέπει να γίνει μια στροφή προς ορυκτά καύσιμα χαμηλής περιεκτικότητας σε άνθρακα ενώ, τέλος, θα πρέπει να μετριασθούν οι εκπομπές από τις μονάδες συνδυασμένου κύκλου με χρήση κατάλληλων φίλτρων που δεν θα επιτρέπουν τη διάχυση ανθρακικών αερίων, στο περιβάλλον. Για τη μείωση των εκπομπών από το δίκτυο μεταφοράς της χώρας, θα πρέπει να επεκταθεί η διάρκεια ζωής του εξοπλισμού του δικτύου, να περιοριστούν οι εκπομπές GHG από τις απώλειες ενέργειας κατά τη

μεταφορά της, καθώς και από άλλα στάδια όπως η εγκατάσταση, η συντήρηση και η αποσυναρμολόγηση των δικτύων, μετά το τέλος του κύκλου ζωής.

7.3. Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα

Η έρευνα που διεξήχθη για τις εκπομπές από το Διασυνδεδεμένο και Μη ηλεκτροπαραγωγικό δίκτυο της χώρας, θα μπορούσε να αποτελέσει μια βάση αναφοράς και περαιτέρω εξέλιξής της, για μελλοντικές ΑΚΖ που θέλουν να μελετήσουν αντίστοιχες περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Το κρίσιμο ερώτημα στο οποίο θα πρέπει να δοθεί απάντηση και δεν ήταν στα πλαίσια της παρούσας εργασίας, είναι για τις εκπομπές GHG από το δίκτυο μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας στα Μη Διασυνδεδεμένα Νησιά. Για την ολιστική προσέγγιση της μελέτης, όμως, θα πρέπει να συμπεριληφθούν και οι εισαγωγές ενέργειας διότι καλύπτουν το 10% της συνολικής ζήτησης της χώρας. Ενδιαφέρον, ερευνητικά, θα είχε και μια μελέτη ΑΚΖ για τη σχεδιαζόμενη σύνδεση των ΜΔΝ με το ηπειρωτικό δίκτυο και την αξιολόγηση των θετικών ή αρνητικών επιδράσεων που θα είχε αυτό, στις συνολικές εκπομπές της χώρας. Επιπλέον, σε αυτό το σενάριο, θα μπορούσαν να μελετηθούν και τα σενάρια για την μελλοντική ανάπτυξη του δικτύου (2020), με ένταξη και απόσυρση κάποιων μονάδων παραγωγής, όπως αυτή έχει καταγραφεί σε σχετική μελέτη επάρκειας από τον ΑΔΜΗΕ [43]. Άλλες προτάσεις για ανάλογες μελέτες ΑΚΖ, θα μπορούσαν να είναι η αξιολόγηση των επιπτώσεων από μια διαφορετική μοντελοποίηση των απωλειών ενέργειας του δικτύου μεταφοράς και, η εξέταση των όποιων διαφορών καταγραφούν στις συνολικές εκπομπές από το δίκτυο. Επίσης, πιθανή πρόταση για περαιτέρω έρευνα είναι η εξέταση των πιο ρυπογόνων στοιχείων του δικτύου (υποθαλάσσια καλώδια ή εναέρια) και τέλος, μια συγκριτική με την παρούσα ΑΚΖ όπου θα μελετάται ένα σενάριο με τη μερική αντικατάσταση των πετρελαιομηχανών από μονάδες φυσικού αερίου ή συνδυασμένου κύκλου για την κάλυψη των φορτίων βάσης των Μη

Διασυνδεδεμένων Νησιών. Τα αποτελέσματα από μια τέτοια μελέτη, ίσως, είναι χρήσιμα στους εμπλεκόμενους με τον κλάδο της ενέργειας στην Ελλάδα.

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- 1) A. Nishimura, Y. Hayashi, K. Tanaka, M. Hirota, S. Kato, M. Ito, K. Araki, E.J. Hud, (2009), *Life cycle assessment and evaluation of energy payback time on high-concentration photovoltaic power generation system*
- 2) Alsema EA. (2000), *Energy pay back time and CO2 emissions of PV systems*. Progress in Photovoltaics Research and Applications; 8:17–25
- 3) Amit Thakur, Christina E. Canter, Amit Kumar, (2013), *Life-cycle energy and emission analysis of power generation from forest biomass*
- 4) C.M. Sastre, E. Maletta, Y. González-Arechavala, P. Ciria, A.M. Santos, A. del Val, P. Pérez, J. Carrasco, (2013), *Centralised electricity production from winter cereals biomass grown under central-northern Spain conditions: Global warming and energy yield assessments*
- 5) Carpentieri M, Corti A, Lombardi L. (2005), *Life cycle assessment (LCA) of an integrated biomass gasification combined cycle (IGBCC) with CO2 removal*. Energy Conversion and Management; 46:1790–808
- 6) Corti A, Lombardi L. (2004), *Biomass integrated gasification combined cycle with reduced CO2 emissions: performance analysis and life cycle assessment (LCA)*. Energy; 29: 2109–24
- 7) Craig I. Jones, Marcelle C. McManus, (2010), *Life-cycle assessment of 11 kV electrical overhead lines and underground cables*, Journal of Cleaner Production 18 1464e1477
- 8) E. Martínez, E. Jiménez, J. Blanco, F. Sanz, (2008), *LCA sensitivity analysis of a multi-megawatt wind turbine*
- 9) Daniel Weisser, (2007), *A guide to life-cycle greenhouse gas (GHG) emissions from electric supply technologies*. Energy 32, 1543–1559

- 10) Dones R, Heck T, Emmenegger MF, Jungbluth N., (2005), *Life-cycle inventories for the nuclear and natural gas energy systems, and examples of uncertainty analysis*. Int J Life Cycle Anal;10(1): 10–23
- 11) Dones R, Heck T, Hirschberg S. (2004), *Greenhouse gas emissions from energy systems, comparison and overview*. Encyclopaedia Energy; 3: 77–95
- 12) E. Martínez, E. Jiménez, J. Blanco, F. Sanz, (2008), *LCA sensitivity analysis of a multi-megawatt wind turbine*
- 13) E. Santoyo-Castelazo, H. Gujba, A. Azapagic, (2011), *Life cycle assessment of electricity generation in Mexico*, Energy 36; 1488e1499
- 14) European Environment Agency, *emissions (CO₂, SO₂, NO_x) from public electricity and heat production— explanatory indicators (ENER009)—Assessment published Aug 2011; 2011*
- 15) Finnveden G, Hauschild MZ, Ekvall T, Guinée J, Heijungs R, Hellweg S, et al. (2009), *Recent developments in life cycle assessment*. Journal of Environmental Management; 91:1–21
- 16) Gareth P. Harrison n, Edward (Ned). J. Maclean, Serafeim Karamanlis, Luis F. Ochoa, (2010), *Life cycle assessment of the transmission network in Great Britain*, Energy Policy 383622–3631
- 17) Goedkoop, M., Effting, S., Collignon, M. (2000), *The Eco-indicator 99 – Manual for Designers, PRé Consultants B.V.*
- 18) Guinée J.B., (2002), *Handbook on Life Cycle Assessment Operational Guide to the ISO Standards*, Springer, Netherlands
- 19) International Energy Agency (2010), *Electricity information; 2010*

- 20) ISO 14040:2006, (2006), *Environmental management - Life cycle assessment - Principles and framework, Second edition, International Organization for Standardization*
- 21) Jin Yang, Bin Chen, (2013), *Global warming impact assessment of a crop residue gasification project—A dynamic LCA perspective*
- 22) Jungbluth N, Bauer C, Dones R, Frischknecht R. (2005), *Life cycle assessment for emerging technologies: case studies for photovoltaic and wind power*. International Journal of Life Cycle Assessment; 10(1):24–34
- 23) Kannan R, Leong KC, Osman R, Ho HK, Tso CP. (2006), *Life cycle assessment study of solar PV systems: an example of a 2.7 kWp distributed solar PV system in Singapore*. Solar Energy; 80(5):555–63
- 24) Kato K, Murata A, Sakuta K. (1997), *An evaluation on the life cycle of photovoltaic energy system considering production energy of off-grade silicon*. Solar Energy Materials and Solar Cells;47:95–100
- 25) Menzies G.F., Turan S., Banfill P.F., (2007), *Life-cycle assessment and embodied energy: a review, Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Construction Materials*, Volume 160/4, 135-143
- 26) Naser A. Odeh, Timothy T. Cockerill, (2006), *Life cycle analysis of UK coal fired power plants*
- 27) NL Agency, (2011) *Usability of Life Cycle Assessment for Cradle to Cradle purposes, Dutch Ministry of Economic Affairs: NL Agency, NL Environment and NL Energy and Climate, Agriculture and Innovation, Position Paper, Editor: Toby Adams, Utrecht, The Netherlands*

- 28) Ortiz O., Castells F., Sonnemann G., (2009), «*Sustainability in the construction industry: a review of recent developments based on LCA*», *Construction and Building Materials*, 23/1,28-39
- 29) Raquel S. Jorge, Edgar G. Hertwich, (2013), *Environmental evaluation of power transmission in Norway*, *Applied Energy* 101; 513–520
- 30) Rey F.J., Martin-Gil J., Velasco E., Pérez D., Varela F., Palomar J.M., Dorado M.P., (2004) *Life Cycle Assessment and External Environmental Cost Analysis of Heat Pumps*, *Environmental Engineering Science*, Volume 21(5), 591-605
- 31) Rita Garcia, Pedro Marques, Fausto Freire, (2014) , *Life-cycle assessment of electricity in Portugal*, *Applied Energy* 134; 563–572
- 32) Roberto Turconi , Alessio Boldrin, Thomas Astrup, (2013), *Life cycle assessment (LCA) of electricity generation technologies: Overview, comparability and limitations*, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 28:555–565
- 33) Sampo Soimakallio, Laura Saikku, (2012), *CO2 emissions attributed to annual average electricity consumption in OECD (the Organization for Economic Co-operation and Development) countries*, *Energy* 38, 13e20
- 34) Schleisner L. (2000), *Life cycle assessment of a wind farm and related externalities*. *Renewable Energy*; 20:279–88
- 35) SimaPro 7.1, *Data base “CML 2 Baseline 2000”*: *Baseline impact categories taken from Ecoinvent 2.0*
- 36) Spadaro V, Langlois L, Hamilton B., (2000), *Greenhouse gas emissions of electricity generation chains: assessing the difference*. *IAEA Bull*;42(2)
- 37) U.S. Department of Energy—Energy Information Administration. *Natural gas 1998: issues and trends*. Washington, D.C., USA; 1999

- 38) Umberto Desideri, Stefania Proietti, Francesco Zepparelli, Paolo Sdringola, Silvia Bini, (2011), *Life Cycle Assessment of a ground-mounted 1778 kWp photovoltaic plant and comparison with traditional energy production systems*
- 39) Varun, I.K. Bhat, Ravi Prakash, (2009), *LCA of renewable energy for electricity generation systems — A review*. Renewable and Sustainable Energy Reviews 13, 1067–1073
- 40) Vattenfall, (2012), *Life Cycle Assessment - Vattenfall's electricity generation in the Nordic countries*
- 41) Xunmin Ou, Yan Xiaoyu, Xiliang Zhang, (2011), *Life-cycle energy consumption and greenhouse gas emissions for electricity generation and supply in China*, Applied Energy 88; 289–297
- 42) Αβρααμίδης Μ., Κυθραιώτου Ν., Φάττα Δ., (2007), *Ανάλυση κύκλου ζωής ως υποστηρικτικό εργαλείο λήψης αποφάσεων για την οικολογική παραγωγή ελαιόλαδου, εργασία στο πλαίσιο του προγράμματος LIFE04 ENV/GR/110, Ελλάδα - Ισπανία – Κύπρος*
- 43) ΑΔΜΗΕ, 2013, *Μελέτη Επάρκειας Ισχύος, για την περίοδο 2013-2020*, Αθήνα, Οκτώβριος 2013
- 44) ΔΕΔΔΗΕ, 2012, *Πληροφοριακό Δελτίο Παραγωγής στα Μη Διασυνδεδεμένα Νησιά για το έτος 2012*
- 45) Ζυγούρας Γ., (2005), *Η Ανάλυση Κύκλου Ζωής ως Εργαλείο Εκτίμησης των Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων*, Εκδόσεις Πανεπιστημίου Πατρών
- 46) Καρβούνης Σωτήρης Κ., Γεωργακέλλος Δημήτριος Α. (2003), *Διαχείριση του περιβάλλοντος*
- 47) Κρητικός Σ., Ναλαντζή Μ., Σαγάνη Α., Στυλογιάννη Ε, Χρονόπουλος Χ., (2013) *Ανάλυση Κύκλου Ζωής του Οπλισμένου Σκυροδέματος*, Δ.Π.Μ.Σ. Οργάνωση &

Διοίκηση Βιομηχανικών Συστημάτων, Πανεπιστήμιο Πειραιώς - Εθνικό Μετσόβιο
Πολυτεχνείο, Αθήνα

- 48) ΛΑΓΗΕ, *Ανανεώσιμες Πηγές ενέργειας και ΣΗΘΥΑ*, (2015) *Συνοπτικό Πληροφοριακό Δελτίο* Δεκέμβρης 2015
- 49) Μαρούλης, Α., Χατζηαντωνίου Κ., Μάντζου Γ., Μπενέτου Π., Χαρίτου Α.Η., (2007), *Εκτίμηση του κύκλου ζωής (LCA) - Περιγραφή ενός σημαντικού περιβαλλοντικού εργαλείου πράσινης χημείας*, 2ο Πανελλήνιο Συμπόσιο Πράσινης Χημείας & Βιώσιμης Ανάπτυξης, Πανεπιστημίου Πατρών, Ρίο
- 50) Τήνου, Δ., 2011, *Τεχνική Έκθεση Προκαταρκτικού Ελέγχου με Ανάλυση Κύκλου Ζωής*, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
- 51) ΑΔΜΗΕ, 2016, διαθέσιμο εδώ: www.admie.gr
- 52) ΔΕΔΔΗΕ, 2016, διαθέσιμο εδώ: www.deddie.gr
- 53) ΔΕΗ, 2016, διαθέσιμο εδώ: www.dei.gr
- 54) ΛΑΓΗΕ, 2016, διαθέσιμο εδώ: www.lagie.gr
- 55) ΡΑΕ, 2016, διαθέσιμο εδώ: www.rae.gr