

## Ανάλυση Κύκλου Ζωής ηλεκτρικών διασυνδέσεων: Η περίπτωση της Κρήτης

Αλέξανδρος Καβράκος

Επιβλέπων καθηγητής  
Παπαευθυμίου Σπυρίδων

Χανιά, Ιανουάριος 2023

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Ευχαριστίες.....	3
Συντομογραφίες.....	4
Περίληψη.....	7
Κεφάλαιο 1 : Εισαγωγή.....	8
1.1 Οριοθέτηση του προβλήματος.....	8
1.2 Κύκλος ζωής ηλεκτρικών διασυνδέσεων.....	10
1.3 Ηλεκτρική Διασύνδεση Κρήτης.....	13
1.4 Στόχος.....	15
Κεφάλαιο 2 : Βιβλιογραφική ανασκόπηση ΑΚΖ σε ηλεκτρικές διασυνδέσεις και Μεθοδολογία.....	16
2.1 Βιβλιογραφική ανασκόπηση.....	16
Κεφάλαιο 3 : Μεθοδολογία Ανάλυσης Κύκλου Ζωής.....	37
3.1 Εισαγωγή.....	37
3.2 SimaPro.....	39

3.3 Καταγραφή δεδομένων Κύκλου ζωής (LCI).....	40
3.3.1 Υποθαλάσσια καλώδια 500 kV HVDC.....	41
3.3.2 GIS.....	42
3.3.3 Σταθμοί Ηλεκτροδίων.....	43
3.3.4 Σταθμοί Μετατροπής.....	45
3.3.5 Υπόγεια καλώδια.....	46
Κεφάλαιο 4 : Αποτελέσματα και Συμπεράσματα.....	47
4.1 Ερηνεία των αποτελεσμάτων.....	47
4.2 Συμπεράσματα.....	52
Βιβλιογραφία.....	55

## Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή μου Σπύρο Παπαευθυμίου, που μου έδωσε την ευκαιρία να εργαστώ πάνω στην συγκεκριμένη μελέτη και τον βοηθό επιβλέποντα Μανώλη Δουνδουλάκη, για την καθοδήγηση και βοήθειά τους.

## Συντομογραφίες

AKZ : Ανάλυση Κύκλου Ζωής

ΑΔΜΗΕ : Ανεξάρτητος Διαχειριστής Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας

CC : Climate change

COP26 : 26<sup>th</sup> Conference of the Parties

GHG : Αέρια του Θερμοκηπίου - GreenHouse Gas

COP21 : 21<sup>st</sup> Conference of the Parties

CO<sub>2</sub> : Carbon dioxide

IEA : International Energy Agency

ΔΕΗ : Δημόσια Επιχείρηση Ηλεκτρισμού

ΕΣΜΗΕ : Ελληνικό Σύστημα Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας

ΣΜ : Σταθμός Μετατροπής

GIS : Gas Insulated Substation

ΚΥΤ : Κέντρο Υπερυψηλής Τάσης

AC/DC : Alternating Current / Direct Current

HVDC : High Voltage Direct Current

VSC : Voltage Source Converter

MW : Megawatt

ITD20 : In the Deep 20%

GDv05 : Grand Design v05

GWP : Φαινόμενο του Θερμοκηπίου - Global Warming Potential

TWh : Terawatt-hour

kWh : kilowatt-hour

Mt : Megatonne

kt : kilotonne

CO<sub>2</sub> - Eq : Carbon dioxide - Equivalent

ΑΠΕ : Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας

IOA : Input-Output Analysis

km : kilometer

ENTSO-E : European Network of Transmission System Operators for Electricity

TYNDP : Ten-Year Network Development Plan

T&D : Transmission and Distribution

ΕΕ : Ευρωπαϊκή Ένωση

TSO : Transmission System Operators

CBA : Cost-Benefit Analysis

NDP : National Development Plan

PCI : Projects of Common Interest

EIB : European Investment Bank

WBIF : Western Balkan Investment Framework

PER : Primary Energy Requirement

GJ : GigaJoule

LHV : Lower Heating Value

CHP : Combined heat and power

LCSA : life cycle sustainability assessment

CCGT : Combined-cycle Gas Turbine

SF6 : Sulphur hexafluoride

ΛΕΕ : Λοιπός Ενεργειακός Εξοπλισμός

OH : Overhead cable

UG : Underground cable

ΥΘΚ : Υποθαλάσσιο Καλώδιο

ΣΗ : Σταθμός Ηλεκτροδίων

OF-HH : Ozone formation-Human health

FW-E : Freshwater eutrophication

M-E : Marine eutrophication

Φ/Β : Φωτοβολταϊκά

ΕΣΕΚ : Εθνικό Σχέδιο για την Ενέργεια και το Κλίμα

## Περίληψη

Στην παρούσα εργασία παρουσιάζονται οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις του έργου της ηλεκτρικής διασύνδεσης της Κρήτης με το ηπειρωτικό δίκτυο, που αποτελεί την μεγαλύτερη επένδυση για την μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας στην Ελλάδα. Πραγματοποιείται μία ποιοτική αλλά και ποσοτική καταγραφή των αρνητικών περιβαλλοντικών επιπτώσεων του παρόντος έργου, με την βοήθεια της μεθόδου (AKZ) Ανάλυσης Κύκλου Ζωής. Για την διεξαγωγή της και την παραγωγή ενός αξιόπιστου αποτελέσματος, χρειάζεται να παρθούν τα απαραίτητα στοιχεία εκπόνησης του έργου από τον ΑΔΜΗΕ. Η AKZ βοηθάει τόσο στην κατανόηση των περιβαλλοντικών επιβαρύνσεων της ηλεκτροδότησης της Κρήτης όσο και μελλοντικά τους εκάστοτε υπεύθυνους να πάρουν κατάλληλες ενεργειακές αποφάσεις. Αυτό επιτυγχάνεται καθώς εξετάζονται οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις σε ολόκληρο τον κύκλο ζωής του έργου. Έτσι, αίρεται οριστικά ο ενεργειακός αποκλεισμός της Κρήτης και καθίσταται πράσινη η ηλεκτροδότηση του νησιού διότι θα μπει τέλος στην εξάρτηση της Κρήτης από τους αυτόνομους ρυπογόνους σταθμούς παραγωγής που θα κλείσουν.

# Κεφάλαιο 1

## Εισαγωγή

### 1.1 Οριοθέτηση του προβλήματος

Η κλιματική αλλαγή (CC) και η υποβάθμιση του περιβάλλοντος αποτελεί μακροπρόθεσμη αλλά πραγματική απειλή τόσο για την ανθρώπινη ύπαρξη όσο και για την επιβίωση του πλανήτη. Με στόχο την αποτροπή της κλιματικής αλλαγής οι κυβερνήσεις σε παγκόσμιο επίπεδο οδηγήθηκαν στο συνέδριο COP26 climate change conference που πήρε μέρος στην Γλασκώβη. Αποτελεί το σώμα αποφάσεων των Ηνωμένων Εθνών σε σχέση με το πλαίσιο γύρω από την κλιματική αλλαγή. Σκοπός του η μείωση των εκπομπών των αερίων του θερμοκηπίου (GHG) σε παγκόσμια κλίμακα ακολουθώντας την Συμφωνία του Παρισιού (COP21) που τέθηκε σε εφαρμογή τον Νοέμβριο του 2016. Απώτερος στόχος του συνεδρίου είναι η διατήρηση της παγκόσμιας ανοδου της θερμοκρασίας κατω απο τους 1.8 °C έως το 2100. (Biol, 2021) (UNFCCC, 2020) (IEA, 2021)

Ακολουθώντας την παγκόσμια πρωτοβουλία για την καταπολέμηση της κλιματικής αλλαγής μέσω της Ευρωπαϊκής Πράσινης Συμφωνίας, τα 27 κράτη μέλη της Ευρωπαϊκής ένωσης δεσμεύτηκαν να μετατρέψουν την Ευρώπη στην πρώτη κλιματικά ουδέτερη ήπειρο έως το 2050. (European Comission, 2021)

Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι μεγάλο μέρος των εκπομπών των GHG ανήκει στον τομέα της ενέργειας, που οφείλεται για το 80% των ανθρωπογενών εκπομπών της Ευρώπης. Πάνω από το 40% των εκπομπών CO<sub>2</sub> προέρχεται από την καύση των ορυκτών καυσίμων κατα την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Η πανδημία Covid-19 σε συνδυασμό με την κλιματική αλλαγή αύξησαν την παγκόσμια ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας περισσότερο από 6% το 2021, τη μεγαλύτερη αύξηση από την οικονομική κρίση του 2010. (WEO, 2021) (WNA, 2022)

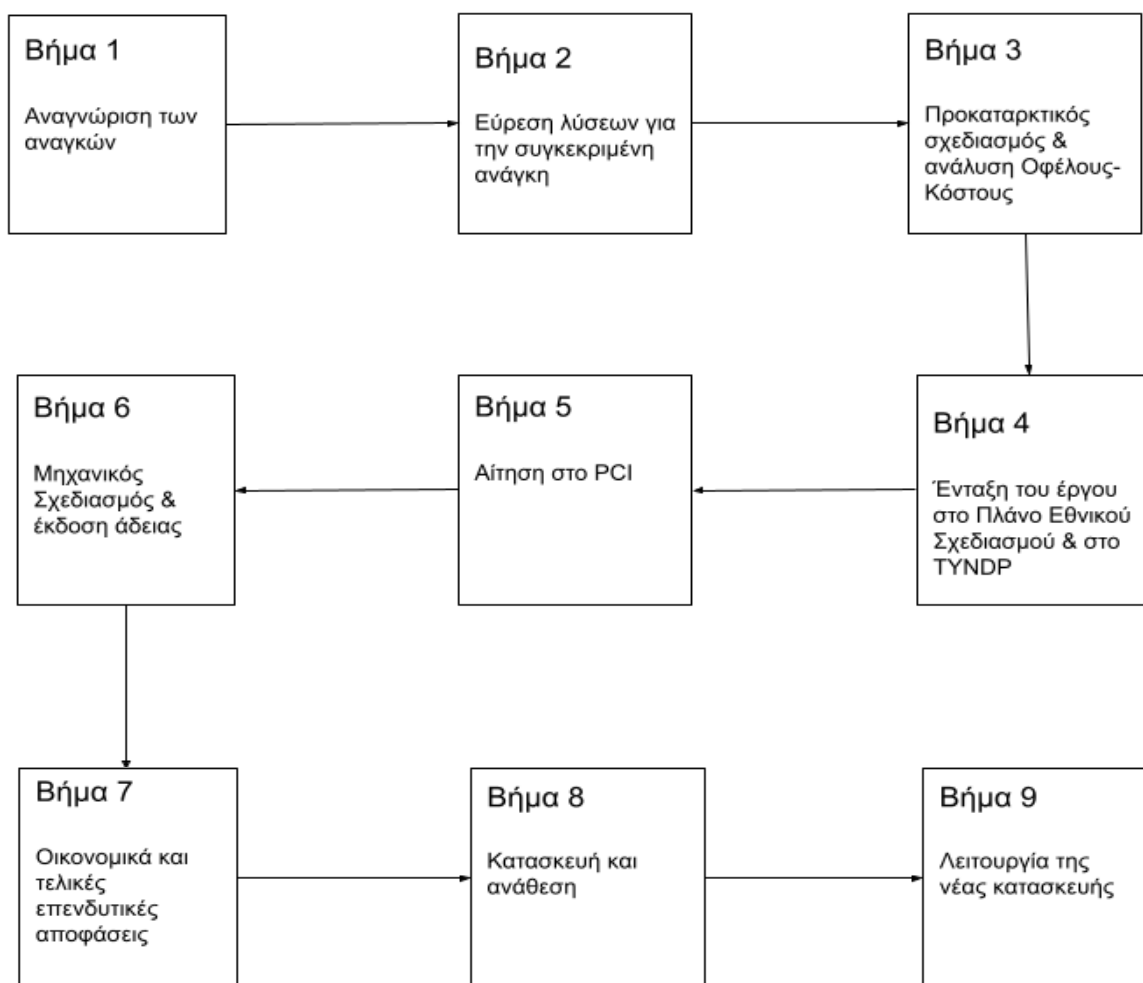
Σημείο κλειδί του ενεργειακού συστήματος πέρα από την παραγωγή ενέργειας, αποτελεί και το ηλεκτρικό δίκτυο. Η δημιουργία των ηλεκτρικών διασυνδέσεων είναι συνέπεια της ανάγκης κατανάλωσης ενέργειας σε διαφορετικό μέρος από την παραγωγή της. Η μεταφορά και διανομή (T&D) ενέργειας που αποτελείται από γραμμές ρεύματος, καλώδια, μετασχηματιστές, υποσταθμούς και άλλο ενεργειακό εξοπλισμό παράγει ένα μεγάλο εύρος περιβαλλοντικών επιπτώσεων.

Η ανάπτυξη και αναδιαμόρφωση του ηλεκτρικού δικτύου είναι επομένως ένας βασικός παράγοντας που θα καθορίσει την επίτευξη των ενεργειακών στόχων της Ευρωπαϊκής Ένωσης. Το 10ετές σχέδιο ανάπτυξης δικτύου (TYNDP) που δημοσιεύει το ENTSO-E παρουσιάζει τον τρόπο ανάπτυξης του ευρωπαϊκού ηλεκτρικού δικτύου με χρονικό ορίζοντα 10 - 20 ετών. Μεγάλο μέρος του αναπτυξιακού σχεδίου αποτελούν οι ηλεκτρικές διασυνδέσεις, η σύνδεση δηλαδή συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας τόσο διασυνοριακά όσο και εγχώρια. (TYNDP, 2019)

Τα έργα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας είναι έργα πολλαπλών χρήσεων. Κύριος στόχος των διασυνδέσεων, είναι η διατήρηση ασφαλούς παροχής εφοδιασμού ηλεκτρικού ρεύματος. Έτσι, κατασκευάζονται με τέτοιο τρόπο ώστε να επιτρέπουν την αμοιβαία υποστήριξη σε περίπτωση διακοπής της παροχής, προσδίδοντας σταθερότητα και αξιοπιστία.

## 1.2 Κύκλος ζωής ηλεκτρικών διασυνδέσεων

Όλα τα έργα που αναφέρονται στην κατασκευή ή αναδιαμόρφωση ηλεκτρικών διασυνδέσεων υπόκεινται σε μελέτη (σε μία σειρά από βήματα) ξεκινώντας από την εξέταση της αναγκαιότητας μέχρι και την λειτουργία του εκάστοτε έργου.



**Πίνακας 1.1 :** Βήματα κύκλου ζωής ηλεκτρικής διασύνδεσης

- Βήμα 1, Αναγνώριση των αναγκών:

Το 1ο βήμα πριν την ανάπτυξη του έργου είναι η αναγνώριση των αναγκών για την ενίσχυση του ηλεκτρικού δικτύου, όπως αλλαγές στο ενεργειακό μίγμα της χώρας, η σταθερότητα του δικτύου, υποδομές κ.α. Ο εκάστοτε εγχώριος οργανισμός που είναι

υπεύθυνος για την μεταφορά ηλεκτρικού ρεύματος (TSO) αξιολογεί τις ανάγκες σε εθνικό επίπεδο. Η αξιολόγηση αυτή οριστικοποιείται σε ευρωπαϊκό επίπεδο από την ENTSO-E εντός διετίας.

- Βήμα 2, Εύρεση λύσεων για την συγκεκριμένη ανάγκη :

Μόλις η ανάγκη αναγνωριστεί είναι σημαντικό να βρεθούν οι πιθανές λύσεις που απευθύνονται στην συγκεκριμένη ανάγκη, συμπεριλαμβανομένου όχι μόνο διαφορετικών τεχνολογιών μεταφοράς, συνδέσεων ή διαδρομών αλλά και την δυνατότητα αποθήκευσης του ηλεκτρικού ρεύματος, τον ρόλο των αγοραστών και τον τρόπο παραγωγής ενέργειας. Οι αποφάσεις που θα παρθούν σε σχέση με την ενίσχυση του ηλεκτρικού δικτύου αξιολογούνται σύμφωνα με το κόστος και τα συνολικά πλεονεκτήματα που θα δώσουν στο ενεργειακό σύστημα.

- Βήμα 3, Προκαταρκτικός σχεδιασμός & ανάλυση Οφέλους-Κόστους :

Στην συνέχεια πραγματοποιείται η ανάλυση Οφέλους-Κόστους (CBA). Είναι ουσιαστικά μία αξιολόγηση του έργου. Εξετάζει τον βαθμό που προσφέρει το έργο στο κοινωνικό σύνολο, τα πλεονεκτήματα του δηλαδή σε σχέση με την άμβλυνση του κόστους παραγωγής και των εκπομπών CO<sub>2</sub>, την βελτίωση της ασφάλειας παροχής κ.α. Έπειτα, τα πλεονεκτήματα συγκρίνονται με τα αναμενόμενα κόστη του έργου. Τα κόστη προκύπτουν από τον προκαταρκτικό σχεδιασμό που συμπεριλαμβάνει έρευνες σε μηχανικό και περιβαλλοντικό επίπεδο. Η CBA και ο προκαταρκτικός σχεδιασμός πραγματοποιούνται σε εθνικό επίπεδο υπό τις οδηγίες του TYNDP.

- Βήμα 4, Ένταξη του έργου στο Πλάνο Εθνικού Σχεδιασμού & στο TYNDP :

Οι περισσότερες Ευρωπαϊκές χώρες παρουσιάζουν σε συχνή βάση το Εθνικό Σχέδιο Ανάπτυξης (NDP), περιγράφοντας τις αναμένουσες επενδύσεις στο εθνικό δίκτυο μεταφοράς συμπεριλαμβάνοντας είτε νέες υποδομές είτε αντικαθιστώντας τις ήδη υπάρχουσες. Έτσι, αναμένεται η ένταξη του έργου στο NDP και η εναρμόνιση του με τις μεθοδολογίες του TYNDP.

- Βήμα 5, Αίτηση στο PCI :

Το PCI αναφέρεται σε ευρωπαϊκά διασυνοριακά έργα που ενώνουν τα ενεργειακά συστήματα των χωρών της ΕΕ. Για να μπορέσει ένα έργο να μπει στο PCI υποχρεούται να έχει ήδη εξεταστεί από το ΤΥΝΔΡ. Από την στιγμή που ένα έργο ανήκει στο PCI λαμβάνει ευνοϊκή μεταχείριση όπως πιο εύκολη έκδοση αδειών, προώθηση σε επενδυτές κλπ.

- Βήμα 6 Μηχανικός Σχεδιασμός & έκδοση άδειας:

Μετά τον προκαταρκτικό σχεδιασμό ακολουθεί ο ορισμός των τεχνικών χαρακτηριστικών. Σε αυτό το βήμα καθορίζονται η διαδρομή του έργου έχοντας υπόψη προστατευόμενες και κατοικημένες περιοχές με όσο το δυνατόν μικρότερο κοινωνικό και περιβαλλοντικό αποτύπωμα. Παράλληλα με τον μηχανικό σχεδιασμό ξεκινά και η διαδικασία έκδοσης άδειας, μία χρονοβόρα διαδικασία συνήθως, διαφορετική ανά χώρα με στόχο την εύρεση κατάλληλης τοποθεσίας, διαδρομής αλλά και την παρουσίαση τυχόν προβλημάτων που πρέπει να διευθετηθούν.

- Βήμα 7 Οικονομικά και τελικές επενδυτικές αποφάσεις :

Οι επενδύσεις μπορεί να προέρχονται είτε από ιδιωτικούς είτε από δημόσιους φορείς. Πολλοί οργανισμοί έχουν την δυνατότητα επιχορήγησης όπως η Ευρωπαϊκή Τράπεζα Επενδύσεων (ΕΙΒ) ή το Επενδυτικό Πλαίσιο Δυτικών Βαλκανίων (WBIF). Τα έργα που έχουν επικυρωθεί από το PCI μπορούν λάβουν επιχορήγηση και από το CEA, ένα ευρωπαϊκό επενδυτικό πρόγραμμα 30 δισεκατομμυρίων σχετικό με τους τομείς της ενέργειας, της μεταφοράς και των ψηφιακών υποδομών.

- Βήμα 8 Κατασκευή και ανάθεση :

Βαδίζοντας στα τελικά στάδια, ακολουθεί η ανάθεση και κατασκευή του έργου. Ξεκινούν οι εργασίες, η τοποθέτηση των καλωδίων και μόλις η κατασκευή έχει ολοκληρωθεί ακολουθεί η δοκιμαστική περίοδος. Σε αυτήν εξετάζεται η αντοχή της τάσης, ελέγχεται η

σταθερότητα του δικτύου μέσω προγραμματισμένων διακοπών λειτουργίας και προτείνονται διορθωτικές λύσεις.

- Βήμα 9, Λειτουργία της νέας κατασκευής :

Όταν η κατασκευή του έργου ολοκληρωθεί, εξετάζεται η λειτουργία του. Αναλύονται οι επιπτώσεις του στο ενεργειακό σύστημα και αν τα πλεονεκτήματα που υπολογίστηκαν αντικατοπτρίζουν την πραγματικότητα. Επιπροσθέτως ελέγχεται η τιμή του ρεύματος πριν και μετά την κατασκευή του έργου, η εξέλιξη στην ποσότητα ανταλάσσουσας ενέργειας της νέας διασύνδεσης κ.α. Τέλος συγκρίνονται τα πραγματικά αποτελέσματα με εκείνα της CBA για τυχόν επαναπροσδιορισμό της μεθοδολογίας και βελτίωση της. (TYNDP, 2020)

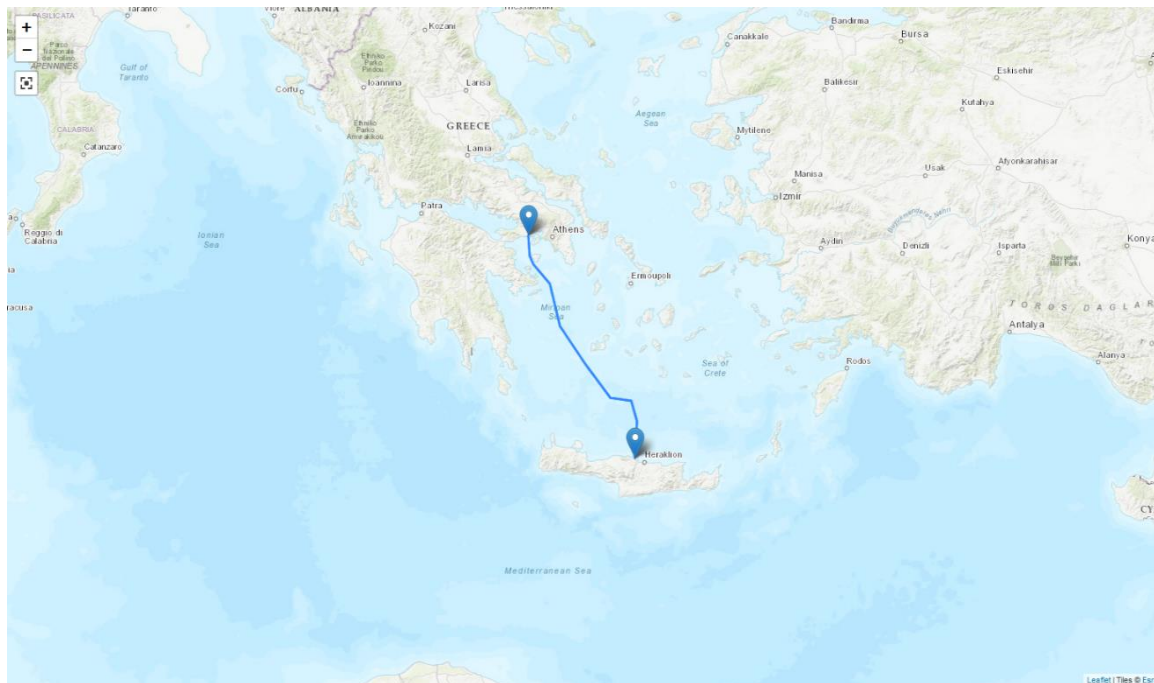
### 1.3 Ηλεκτρική Διασύνδεση Κρήτης

Μια από τις χώρες που έχουν στόχο την ενεργειακή μετάβαση και την μείωση του περιβαλλοντικού τους αποτυπώματος είναι η Ελλάδα, εφαρμόζοντας μεταρρυθμίσεις στον ενεργειακό τομέα προσπαθώντας να απαλλαγεί από τις εκπομπές άνθρακα. Η Ελλάδα έχει θέσει στόχους για μείωση των εκπομπών των αερίων του θερμοκηπίου κατά περισσότερο από 56% έως το 2030 σε σύγκριση με το 2005 με στόχο μια κλιματικά ουδέτερη οικονομία. (IEA Greece, 2021)

Μία από τις μεταρρυθμίσεις αυτές είναι η δημιουργία ηλεκτρικών διασυνδέσεων με στόχο την ενεργειακή μετάβαση των λιγνιτικών περιοχών της Δυτικής Μακεδονίας και της Μεγαλόπολης αλλά και των νησιών του Αιγαίου και της Κρήτης στα οποία λειτουργούν οι πετρελαϊκοί σταθμοί της ΔΕΗ. (ΑΔΜΗΕ, 2021)

Λύση στο παραπάνω πρόβλημα έρχεται να δώσει το έργο της Ηλεκτρικής Διασύνδεσης της Κρήτης με το ΕΣΜΗΕ. Αποτελεί επί του παρόντος τη μεγαλύτερη επένδυση για την μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας που διεξάγεται στην χώρα με στόχο τον τερματισμό της «ηλεκτρικής απομόνωσης» της Κρήτης από το ηλεκτρικό δίκτυο της ηπειρωτικής Ελλάδας και την κάλυψη των αυξημένων μελλοντικών αναγκών του νησιού. Αποτελείται από δύο

υποέργα. Διασύνδεση Κρήτης-Αττικής & διασύνδεση Κρήτης-Πελοποννήσου. Η παρούσα εργασία εστιάζει στην πρώτη και μεγαλύτερη διασύνδεση.



**Σχήμα 1.1 :** Σύνδεση Κρήτης με την Αττική (ΑΔΜΗΕ, 2021)

Η ηλεκτρική διασύνδεση Κρήτης-Αττικής συμπεριλαμβάνεται στην κορυφαία πεντάδα των πιο καινοτόμων έργων διασύνδεσης συνεχούς ρεύματος πανευρωπαϊκά. Περιλαμβάνει δύο Υποθαλάσσια Καλώδια (ΥΘΚ) μήκους 335 χλμ., τάσης 500 kV και συνολικής μεταφορικής ισχύος 1.000 MW που ποντίζονται σε βάθος έως 1.200 μέτρων στον πυθμένα του Αιγαίου. Δύο κέντρα υπερυψηλής τάσης -ο ΣΜ Κουμουνδούρου και ο ΣΜ Δαμάστας- που συνδέονται με τα ΥΘΚ με τη βοήθεια δύο υπόγειων καλωδίων τάσης 500 kV, δύο σταθμούς ηλεκτροδίων καθώς και έναν υποσταθμό GIS 150 kV.

Η διαδρομή της Ηλεκτρικής Διασύνδεσης ξεκινά από τον ΣΜ AC/DC Αττικής, κοντά στο ΚΥΤ Κουμουνδούρου. Από εκεί δύο Υπόγεια Καλώδια (ΥΚ) HVDC φτάνουν στο σημείο προσαιγιάλωσης στην Πάχη Μεγάρων.

Στην Πάχη Μεγάρων, τα δύο καλώδια συναντούν τη θάλασσα και συνεχίζουν την υποθαλάσσια διαδρομή τους έως το σημείο προσαιγιάλωσης της Κορακιάς στην Κρήτη.

Από την Κορακιά, τα δύο καλώδια οδεύουν προς τον τερματικό ΣΜ AC/DC Δαμάστας και τελικά η διασύνδεση με το δίκτυο της Κρήτης ολοκληρώνεται μέσω του νέου υποσταθμού GIS Δαμάστας.

Για την ασφαλή λειτουργία του συστήματος, θα λάβει χώρα η εγκατάσταση δύο σταθμών ηλεκτροδίων, ο ένας στη νησίδα Σταχτορρόη Αττικής και ο δεύτερος στην Κορακιά Ηρακλείου. Χρονικός ορίζοντας ολοκλήρωσης όλων των τμημάτων της ηλεκτρικής διασύνδεσης είναι το 2024. (Ariadne, 2021)

## 1.4 Στόχος

Ο στόχος της παρούσας εργασίας είναι η διερεύνηση των περιβαλλοντικών επιβαρύνσεων που σχετίζονται με την ηλεκτρική διασύνδεση της Κρήτης με την Αττική, με την μέθοδο της ΑΚΖ. Στο πρώτο μέρος της διπλωματικής πραγματοποιείται μία βιβλιογραφική ανασκόπηση από έρευνες που σχετίζονται με την συγκεκριμένη ανάλυση, παρουσιάζεται η μεθοδολογία ΑΚΖ και το λογισμικό που θα χρησιμοποιηθεί για την διεκπεραίωση της ανάλυσης, Simapro. Στη συνέχεια εξετάζονται τα στοιχεία της διασύνδεσης και καταγράφονται τα δεδομένα του κύκλου ζωής από τα υλικά και την ενέργεια που έχουν δαπανηθεί για την ολοκλήρωση του έργου. Τέλος παρουσιάζονται και αναλύονται τα αποτελέσματα από το περιβάλλον του λογισμικού και παρατίθενται συμπεράσματα.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

### Βιβλιογραφική ανασκόπηση ΑΚΖ σε ηλεκτρικές διασυνδέσεις και Μεθοδολογία

Για την διεξαγωγή ποιοτικού και ρεαλιστικού συμπεράσματος, πριν τον υπολογισμό των αποτελεσμάτων, πραγματοποιείται μία βιβλιογραφική ανασκόπηση. Παρουσιάζονται 16 βιβλιογραφικές αναφορές από προηγούμενες ΑΚΖ που αναφέρονται στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας καθώς και σε δίκτυα μεταφοράς και διανομής (T&D) και στον εξοπλισμό τους, και τα αποτελέσματα παρατίθενται στον συγκεντρωτικό πίνακα 2.1.

#### 2.1 Βιβλιογραφική ανασκόπηση

(Roorda, 2016) ΑΚΖ του Ελληνικού ηλεκτρικού δικτύου

Πραγματοποιείται μια ποσοτική και ποιοτική καταγραφή των αρνητικών επιπτώσεων κατά την παραγωγή και μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας στην Ελλάδα, με την βοήθεια της μεθόδου ΑΚΖ. Παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα της μεθόδου, ενώ για την αξιολόγηση των δύο δικτύων χρησιμοποιήθηκε ως βασικός δείκτης περιβαλλοντικής αξιολόγησης, η υπερθέρμανση του πλανήτη για την οποία ευθύνονται οι εκπομπές GHG. Το ελληνικό δίκτυο χωρίζεται σε τρεις κατηγορίες, στο Ηπειρωτικό ή διασυνδεδεμένο δίκτυο παραγωγής, στο μη διασυνδεδεμένο ή ΜΔΝ δίκτυο παραγωγής και στο δίκτυο μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας. Από την ανάλυση προκύπτει ότι οι εκπομπές από το ηπειρωτικό δίκτυο παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας ανέρχονται στα 853 gCO<sub>2</sub>-Eq/kWh, από το ΜΔΝ ανέρχονται στα 755 gCO<sub>2</sub>-Eq/kWh ενώ για το δίκτυο μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας και μόνο για τις γραμμές υψηλής και υπερυψηλής τάσης οι εκπομπές αγγίζουν τα 41 gCO<sub>2</sub>-Eq/kWh, σύμφωνα με το Σχήμα 2.1. Προκύπτει ότι για την ετήσια παραγωγή και μεταφορά απελευθερώνονται συνολικά στην ατμόσφαιρα περίπου 55 TWh ηλεκτρικής ενέργειας και 47.300.00 τόνοι CO<sub>2</sub>, ενώ για να "ισοφαριστεί" η ενέργεια που δαπανήθηκε από όλο τον κύκλο ζωής των δικτύων, είναι απαραίτητο οι σταθμοί να λειτουργούν για

παραπάνω από τέσσερα χρόνια. Τέλος, παραθέτονται τόσο προτάσεις για την βελτίωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων, όσο και προτάσεις για μελλοντικές ΑΚΖ που θα εστιάσουν στις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου από το σύστημα παραγωγής και μεταφοράς της χώρας.

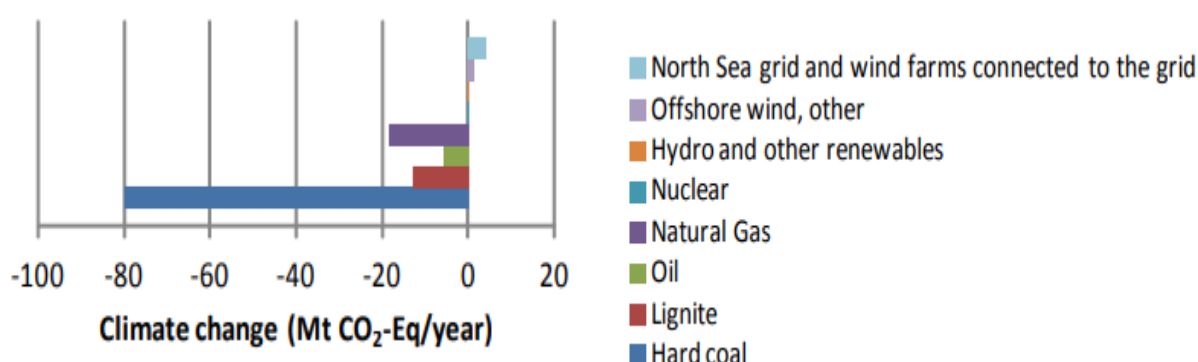


**Σχήμα 2.1 :** Εκπομπές CO<sub>2</sub> από το ελληνικό διασυνδεδεμένο και μη διασυνδεδεμένο δίκτυο παραγωγής και από το δίκτυο μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας

(Arvesen et al., 2014) Life cycle assessment of an offshore grid interconnecting wind farms and customers across the North Sea

Σκοπός της παραπάνω έρευνας είναι η αποτύπωση και κατανόηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων της ανάπτυξης ενός παραθαλάσσιου δικτύου παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, με την βοήθεια αιολικών πάρκων, στην Βόρεια θάλασσα. Αυτό επιτυγχάνεται σε δύο στάδια. Αρχικά με την διερεύνηση και καταγραφή των αρνητικών επιπτώσεων του ηλεκτρικού δικτύου μέσω μιας Υβριδικής ΑΚΖ, με λειτουργική μονάδα αναφοράς την 1 kWh. Στη συνέχεια πραγματοποιείται συγκριτική ανάλυση μεταξύ δύο ενεργειακών σεναρίων βέλτιστης τοποθέτησης του δικτύου στην Βόρεια Θάλασσα, λαμβάνοντας υπόψη και τις κοντινές χώρες. Από την ανάλυση προκύπτει ότι για την ανάπτυξη, λειτουργία και απεγκατάσταση του δικτύου απελευθερώνονται συνολικά 36 Mt CO<sub>2</sub> - Eq/kWh και ότι οι συνδέσεις των καλωδίων συνεχούς ρεύματος υψηλής τάσης (HVDC) είναι το πιο ρυπογόνο κομμάτι του δικτύου. Από την σύγκριση των δύο σεναρίων

προκύπτουν σημαντικά περιβαλλοντικά πλεονεκτήματα στην ανάπτυξη δικτύου με την βοήθεια της αιολικής ενέργειας (GDn05), σε σχέση με την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας με χρήση ορυκτών καυσίμων (ITD20). Συγκεκριμένα, υπολογίστηκε ότι οι τόνοι CO<sub>2</sub> που θα εκπέμπονται από το GDn05 είναι πολλοί λιγότεροι λόγω της χρήσης αιολικής ενέργειας και της μείωσης εκμετάλλευσης ορυκτών καυσίμων, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.2. Υπερέχει σε όλες τις κατηγορίες επιπτώσεων όπως η CC αλλά χρησιμοποιείται σημαντική ποσότητα μετάλλου.



**Σχήμα 2.2 :** Πλεονεκτήματα του GDn05 έναντι του ITD20 στην CC σε 8 τεχνολογίες παραγωγής-μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας ανα έτος

(Weber et al., 2010) Life Cycle Assessment and Grid Electricity\_What Do We Know and What Can We Know

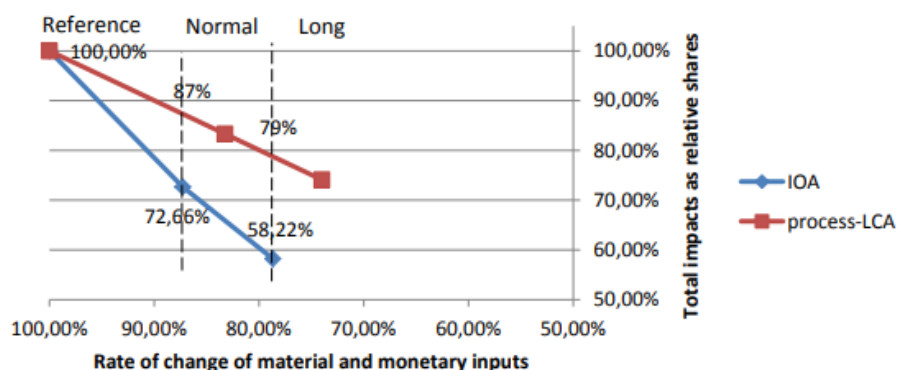
Η παρούσα έρευνα προσδιορίζει ποιά η είναι γνώση και ποια τα όρια γύρω από την Ανάλυση Κύκλου Ζωής ενός οποιοδήποτε ηλεκτρικού δικτύου εξετάζοντας το ανθρακικό αποτύπωμα του Αμερικάνικου ηλεκτρικού δικτύου. Ο στόχος της ανάλυσης είναι διττός. Αρχικά υπολογίζεται το περιβαλλοντικό κόστος του Αμερικάνικου δικτύου παραγωγής και μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας και αναλύεται κατα πόσο ο υπολογισμός των εκπομπών που προκύπτουν από τα διάφορα μέρη του είναι ακριβής και αν υπάρχει

αβεβαιότητα , σε τι βαθμό επηρεάζεται το αποτέλεσμα. Στη συνέχεια εξετάζονται οι τυποποιημένες προσεγγίσεις για τον καθορισμό των εκπομπών του δικτύου στον κύκλο ζωής του. Τονίζεται πως οι διαφορές στα πρωτόκολλα και στην τυποποίηση των εργαλείων που συμπεριλαμβάνονται σε μια ΑΚΖ μπορούν να οδηγήσουν στην διεξαγωγή διαφορετικού αποτελέσματος, όσον αφορά τον καθορισμό της ποσότητας εκπομπών των CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub> και NO<sub>x</sub> στην ατμόσφαιρα. Προκύπτει ως μέση τιμή εκπομπών CO<sub>2</sub> σε εθνικό επίπεδο (χωρίς να συμπεριληφθούν οι απώλειες ενέργειας) τα 690 gCO<sub>2</sub>/kWh. Για την ελαχιστοποίηση του σφάλματος και την εγκυρότητα του αποτελέσματος προτείνεται ως βέλτιστη λειτουργική μονάδα αναφοράς η CO<sub>2</sub>/kWh και η συμπερίληψη του εκάστοτε εθνικού ενεργειακού μίγματος στην έρευνα για τον υπολογισμό των εκπομπών από την παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος.

#### (Saitov, 2014) Environmental Assessment of Electricity Transmission Grid Upgrades Triggered by the Increasing Utilization of Variable and Remote Renewable Energy

Σκοπός της παραπάνω έρευνας είναι η παρουσίαση μιας υβριδικής ΑΚΖ για την πιθανή επέκταση ενός αναβαθμισμένου δικτύου μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας. Η αναβάθμιση έγκειται στην ενσωμάτωση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στο δίκτυο προσθέτοντας δύο γραμμές ενέργειας διπλού κυκλώματος και ενός υποσταθμού 400 kV, εξετάζοντας τα περιβαλλοντικά οφέλη που προκύπτουν. Συγκεκριμένα, η έρευνα έδειξε ότι οι συνολικές εκπομπές όσον αφορά την CC αγγίζουν τα 2.23E+08 kg CO<sub>2</sub>-Eq, με τη παραγωγή σιδήρου και αλουμινίου να είναι η πιο ρυπογόνος διαδικασία του εγχειρήματος. Βέβαια είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι από την έρευνα έχουν παραληφθεί οι απώλειες ενέργειας, οι οποίες μπορεί να οδηγήσουν σε ένα αρκετά διαφορετικό συμπέρασμα. Τα συνολικά αποτελέσματα έδειξαν ότι μια “συμβατική” ΑΚΖ υποτιμά τις εκπομπές αερίων μέχρι και ως ένα τρίτο της συνολικής τους παραγωγής. Επιπλέον, από το Σχήμα 2.3 συμπεραίνεται ότι η IOA είναι πιο ευαίσθητη σε αλλαγές δεδομένων σε σχέση με την ΑΚΖ αφού παρατηρείται μία απότομη κλίση στο γράφημα ανάλυσης της ευαισθησίας. Πράγματι, αν

αναλύσουμε την εξέλιξη της τάσης στα επιλεγμένα σημεία του σχήματος με σταθερό ποσοστό αλλαγής δεδομένων παρατηρείται ότι τα αποτελέσματα της IOA (72,6% και 58,2%) επηρεάζονται περισσότερο συγκριτικά με αυτά του κανονικού σεναρίου AKZ (87% και 79%). Προκύπτει ότι η διαφορά σε ευαισθησία είναι 14,4% με την IOA να εμφανίζει υψηλότερη ευαισθησία που γίνεται ακόμα πιο έντονη όταν εξετάζεται το μακροχρόνιο σενάριο. Στην ανάλυση πρέπει συμπεριληφθεί και το γεγονός ότι στην υβριδική διαδικασία υπάρχουν οικονομικοί δείκτες που επηρεάζουν σημαντικά το αποτέλεσμα. Παρόλα αυτά τονίζεται η σημασία της σχέσης μεταξύ οικονομικών και περιβαλλοντικών επιπτώσεων για τη διεξαγωγή του αποτελέσματος.



(1) IO impacts towards changes in monetary inventory

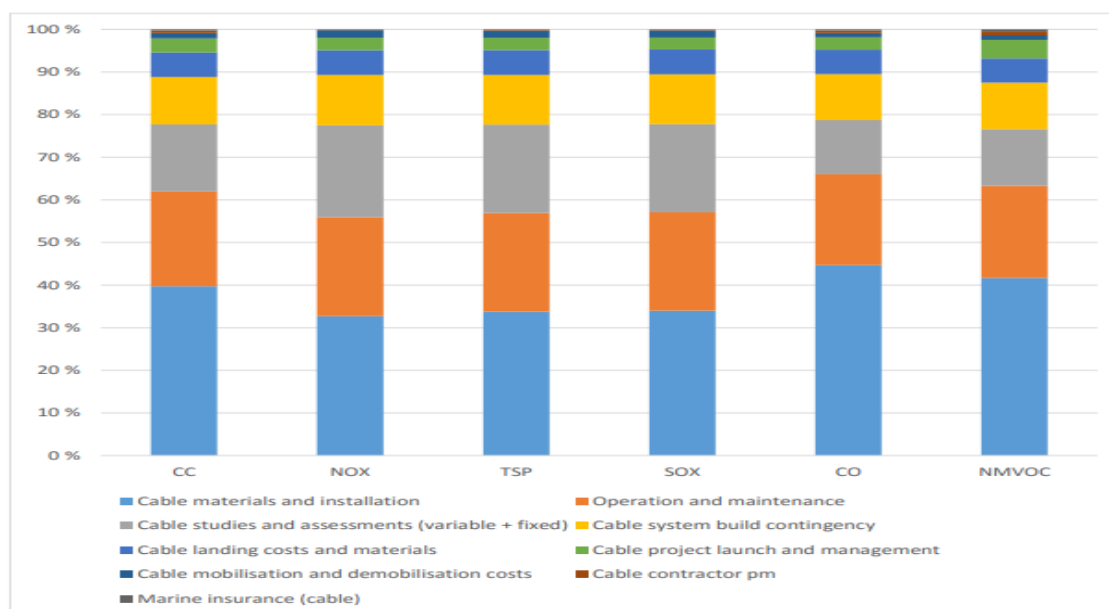
(2) process-LCA impacts towards changes in physical inventory, for the climate change category

**Σχήμα 2.3** : Sensitivity analysis of average tower span with physical and monetary trends for climate change impact category

(Valheim, 2016) Environmental Assessment of electricity transmission using input-output analysis

Παρουσιάζεται μια ανάλυση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων σχετική με την μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας και την υποδομή δύο διαφορετικών δικτύων με την βοήθεια της μεθόδου Ανάλυσης Εισροών-Εκροών (IOA). Η πρώτη περίπτωση αναφέρεται σε ένα συγκεκριμένο έργο που λαμβάνει χώρα στην Γερμανία με την πρόθεση να συνδέσει δύο

πόλεις με μία επίγεια γραμμή 380 kV και 163 km εναλλασσόμενου ρεύματος. Στην ανάλυση προστίθενται και δύο υποσταθμοί με μόνωση αέρα που εξυπηρετούν το έργο. Η δεύτερη περίπτωση αναφέρεται στην ανάπτυξη του Ευρωπαϊκού ηλεκτρικού δικτύου με στόχο την ενσωμάτωση ΑΠΕ σε αυτό. Σε αντίθεση με την πρώτη περίπτωση, εκτός από επίγειες, υπάρχουν υποθαλάσσιες και υπόγειες γραμμές ρεύματος, καθώς και 40 υποσταθμοί συνολικού μήκους 26555 km. Και στις δύο περιπτώσεις λειτουργική μονάδα αναφοράς είναι το εκάστοτε σύστημα, ενώ ο κύκλος ζωής των δικτύων θεωρείται 40 έτη. Οι περιβαλλοντικές εκπομπές που προέκυψαν είναι 0.25 Mt CO<sub>2</sub>-Eq στην πρώτη και 92.5 Mt CO<sub>2</sub>-Eq στην δεύτερη περίπτωση αντίστοιχα. Η χρήση τόσο του σιδήρου όσο και του ατσάλιου, όπως επίσης και η παραγωγή ηλεκτρισμού από άνθρακα φαίνεται ότι είναι οι πιο επιβλαβείς περιβαλλοντικοί παράγοντες. Όσον αφορά τον τρόπο σύνδεσης των γραμμών ρεύματος, οι περισσότερες εκπομπές αερίων προκύπτουν από τις υπόγειες με 12 kt CO<sub>2</sub>-Eq/km. Ακολουθούν οι υποθαλάσσιες με 5 kt CO<sub>2</sub>-Eq/ km και τέλος οι επίγειες με 2 kt CO<sub>2</sub>-Eq/km. Όσον αφορά τα ΥΘΚ παρατηρούμε ότι μεγαλύτερη περιβαλλοντική επίπτωση από τις διεργασίες έχει η κατασκευή και η τοποθέτηση του καλωδίου, ενώ δεύτερη έρχεται η λειτουργία και η συντήρηση του σύμφωνα με το Σχήμα 2.4.



**Σχήμα 2.4 :** Συνεισφορά των συνολικών επιπτώσεων από κάθε δραστηριότητα σχετική με την υποδομή των υποθαλάσσιων καλωδίων

(Raquel Santos Jorge et al., 2012a) (Raquel Santos Jorge et al., 2012b)

## Life cycle assessment of transmission and distribution part 1: power lines and cables & part 2 : transformers and substation equipment

Η συγκεκριμένη έρευνα αξιολογεί τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις του εξοπλισμού και των επιμέρους στοιχείων ενός ηλεκτρικού δικτύου που χρησιμοποιούνται για την μεταφορά και την διανομή του ηλεκτρικού ρεύματος. Στόχος είναι η εξαγωγή δεδομένων και αποτελεσμάτων από την απογραφή του κύκλου ζωής τους, που θα βοηθήσουν τόσο το κοινωνικό σύνολο όσο και τους ερευνητές για μελλοντικές Αναλύσεις Κύκλου Ζωής (ΑΚΖ). Η έρευνα χωρίζεται σε δύο μέρη. Το πρώτο μέρος αναφέρεται στις περιβαλλοντικές επιβαρύνσεις που προκύπτουν από τις γραμμές ρεύματος (επίγειες, υπόγειες, υποθαλάσσιες) και από τα καλώδια, με λειτουργική μονάδα αναφοράς το 1 km της γραμμής ρεύματος (ή του καλωδίου) κατά την διάρκεια της ζωής του. Το δεύτερο μέρος από την άλλη, ασχολείται με τις περιβαλλοντικές επιβαρύνσεις που προκύπτουν από τους μετασχηματιστές και τον εξοπλισμό των υποσταθμών. Εδώ χρησιμοποιούνται δύο διαφορετικές λειτουργικές μονάδες αναφοράς. Όσον αφορά τον εξοπλισμό μεταγωγής, χρησιμοποιείται η μία μονάδα του υποσταθμού (ο υποσταθμός αποτελείται από 5-7 μονάδες), ενώ για τους μετασχηματιστές και τον υπόλοιπο εξοπλισμό χρησιμοποιείται μία αντίστοιχη λειτουργική συσκευή για την εκάστοτε περίπτωση στον κύκλο ζωής της. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι οι απώλειες ενέργειας είναι ο πιο επιβλαβής παράγοντας για τους μετασχηματιστές, τις γραμμές ρεύματος αλλά και τα καλώδια, με ποσοστό που ξεπερνά το 96% των συνολικών επιπτώσεων. Αυτό φαίνεται και στο Σχήμα 2.5 όπου διακρίνεται η μεγάλη συμβολή των απωλειών ενέργειας σχεδόν σε όλες τις κατηγορίες περιβαλλοντικών επιπτώσεων. Τέλος, για τον εξοπλισμό των υποσταθμών η χρήση του αερίου SF<sub>6</sub> ως μονωτικό υλικό οδηγεί σε διαρροές που αγγίζουν το 80% του συνολικού περιβαλλοντικού αποτυπώματος για την υπερθέρμανση του πλανήτη.

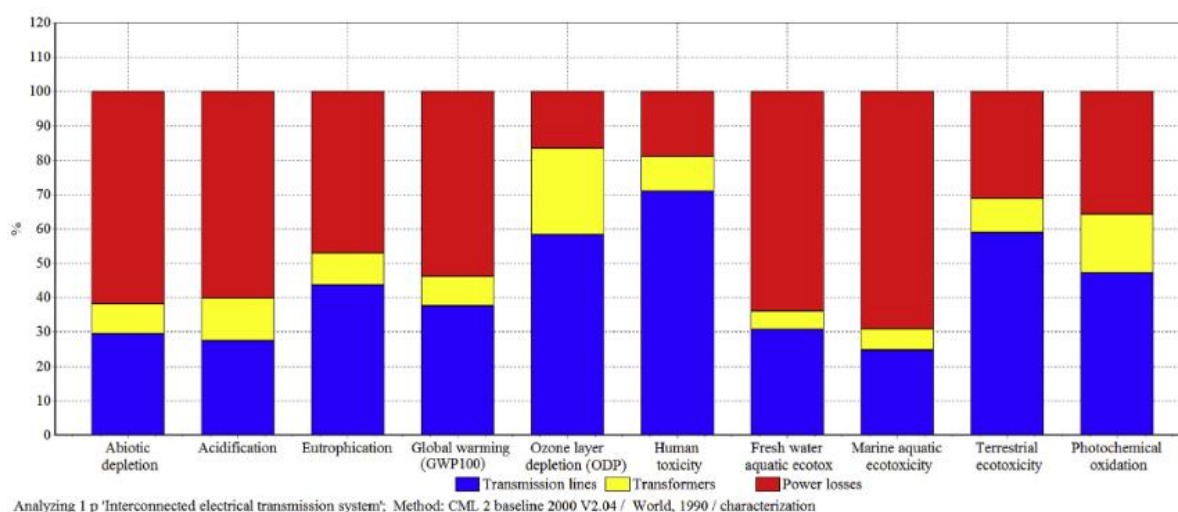
Impact category	150 kV overhead	150 kV land cable	150 kV sea cable
Climate change	99	96	97
Fossil depletion	99	84	96
Freshwater ecotoxicity	95	92	83
Freshwater eutrophication	>99	94	94
Human toxicity	99	84	83
Marine eutrophication	99	95	96
Metal depletion	34	7	5
Ozone depletion	98	71	92
Particulate matter form	98	90	90
Photochemical oxidant	99	88	93
Terrestrial acidification	98	89	92
Terrestrial ecotoxicity	98	84	88

**Σχήμα 2.5 :** Ποσοστό συνεισφοράς των απωλειών ενέργειας στις κατηγορίες των περιβαλλοντικών επιπτώσεων για τρεις τύπους καλωδίων

## (Orfanos et al., 2019) Life-cycle environmental performance assessment of electricity generation and transmission systems in Greece

Σκοπός της παραπάνω έρευνας είναι η παρουσίαση μιας ολοκληρωμένης ΑΚΖ του ηλεκτρικού δικτύου της Ελλάδας εξετάζοντας τις διαφορετικές τεχνολογίες παραγωγής ενέργειας και το διασυνδεδεμένο σύστημα μεταφοράς ενέργειας. Το λογισμικό που χρησιμοποιείται για την ενεργειακή και περιβαλλοντική αξιολόγηση είναι το SimaPro 7.1. Προκύπτει ότι πάνω από το 60% των περιβαλλοντικών ρύπων προέρχονται από τις τεχνολογίες παραγωγής ενέργειας. Η μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας συγκριτικά με την παραγωγή βρέθηκε να έχει 70-90% μικρότερες περιβαλλοντικές επιπτώσεις στον κύκλο ζωής της, με τις απώλειες κατά την μεταφορά της να συνεισφέρουν σε μεγαλύτερο βαθμό στα GHG. Η λειτουργική μονάδα αναφοράς είναι η 1 kWh της παραγόμενης ενέργειας και βασικός δείκτης περιβαλλοντικής αξιολόγησης είναι ο GWP σε 100 χρόνια (GWP100) που εκφράζεται σε t CO<sub>2</sub>-Eq. Συγκεκριμένα, οι θερμικοί σταθμοί παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας είναι υπεύθυνοι για το 99% του GWP, με το 61.5% να ανήκει στα λιγνιτικά εργοστάσια, και το υπόλοιπο 13% και 25.5% να ανήκει στο πετρέλαιο και στο φυσικό αέριο αντίστοιχα. Οι ΑΠΕ συνεισφέρουν μόλις στο 1% του GWP με τα Υδροηλεκτρικά εργοστάσια και τις Μονάδες Συνδυασμένου Κύκλου (CHP) να είναι σχεδόν αμελητέες.

Όσον αφορά τις ηλεκτρικές διασυνδέσεις και την παραγωγή ενέργειας, για 1 kWh ηλεκτρικής ενέργειας που μεταφέρεται στο ηπειρωτικό δίκτυο εκπέμπονται 97 gCO<sub>2</sub>-Eq και 685 gCO<sub>2</sub>-Eq αντίστοιχα. Οι απώλειες ενέργειας, η κατασκευή των ηλεκτρικών γραμμών και οι μετασχηματιστές κυριαρχούν στις περιβαλλοντικές επιπτώσεις του ηπειρωτικού δικτύου όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.6. Το συνολικό GWP για 46.6 TWh, δηλαδή για την συνολική κατανάλωση ενέργειας εξαιρουμένου των εισαγωγών/εξαγωγών, είναι 5 εκατομμύρια τόνοι CO<sub>2</sub>-Eq για το έτος 2016. Οι απώλειες ενέργειας συμμετέχουν στο 54%, η κατασκευή των υποδομών (καλώδια, αγωγοί) στο 38%, και τέλος οι μετασχηματιστές και ο βοηθητικός ηλεκτρολογικός εξοπλισμός και εξαρτήματα στο 8%.



**Σχήμα 2.6 :** Ποσοστό συνεισφοράς του ηπειρωτικού ηλεκτρικού δικτύου στις περιβαλλοντικές κατηγορίες επιπτώσεων

(Georgakellos, 2012) Climate change external cost appraisal of electricity generation systems from a life cycle perspective: the case of Greece

Στόχος της συγκεκριμένης έρευνας είναι ο υπολογισμός του ανθρακικού αποτυπώματος αναφορικά με την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας στην Ελλάδα. Αυτό πραγματοποιείται ποσοτικοποιώντας το εξωτερικό κόστος που σχετίζεται με τις εκπομπές άνθρακα που παράγονται από τον κύκλο ζωής των εργοστασίων ηλεκτρικής ενέργειας της χώρας. Για την επεξεργασία των δεδομένων χρησιμοποιήθηκε το εργαλείο EcoSenseLE μαζί με την

μέθοδο AKZ με περιβαλλοντικό δείκτη το GWP. Το εξεταζόμενο εξωτερικό κόστος υπολογίστηκε για επτά τύπους τεχνολογιών παραγωγής ενέργειας, λιγνίτης, πετρέλαιο, φυσικό αέριο, υδροηλεκτρισμός, αέρας, ήλιος (φωτοβολταϊκά) και βιομάζα. Επιπροσθέτως, η έρευνα παρουσιάζει και την πιθανή εξέλιξη του ανθρακικού αποτυπώματος (2012-2020) σύμφωνα με τις εθνικές αλλά και ευρωπαϊκές πολιτικές (CBA και άλλες περιβαλλοντικές προδιαγραφές). Το συνολικό ετήσιο εξωτερικό κόστος (2012) από τα παραπάνω εργοστάσια παραγωγής ενέργειας υπολογίστηκε στα 920.7 εκατομμύρια € που αντιστοιχούν προσεγγιστικά σε 50 εκατομμύρια τόνους από εκπομπές CO<sub>2</sub>, με μέσο κόστος 18.38 €/MWh - Σχήμα 2.7. Τέλος, σύμφωνα με τις ενεργειακές πολιτικές που είχαν ανακοινωθεί εκείνη την περίοδο το εξωτερικό μέσο κόστος υπολογίστηκε ότι μπορεί να μειωθεί από τα 18.38 €/MWh στα 11.36 €/MWh.

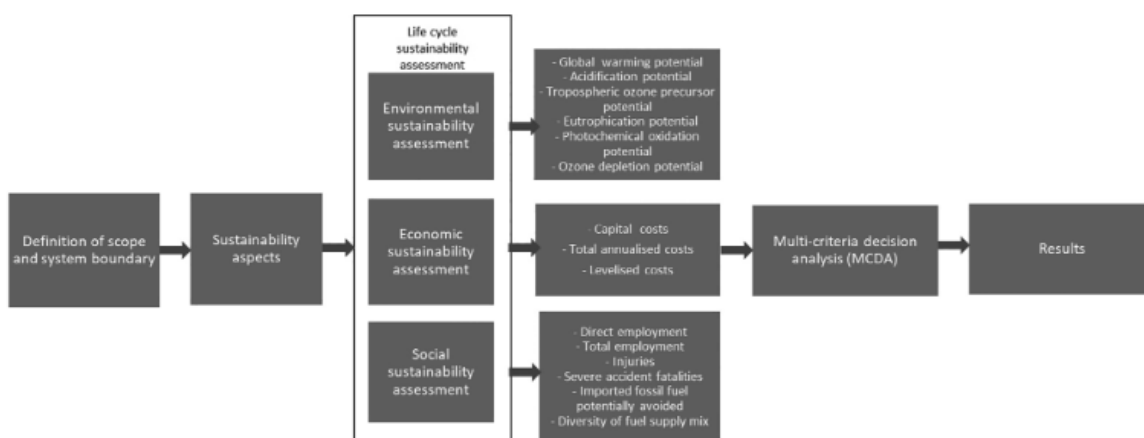
Type of power plant	Total external cost (thousand €/y)	Electricity production (MWh/y)	Marginal external cost (€/MWh)
Lignite-fired power plants	742,764.80	30,561,000.0	24.30
Oil-fired power plants	104,468.86	6,513,000.0	16.04
Natural gas-fired power plants	73,176.17	7,765,000.0	9.42
Hydro power plants	230.76	5,0105,000.0	0.05
Wind power plants	37.30	239,277.6	0.16
PV power plants	0.76	375.8	2.02
Biomass-fired power plants	25.71	10,846.7	2.37
Total	920,704.35	50,099,500.0	18.38

**Σχήμα 2.7** : Εκτίμηση εξωτερικού κόστους των σταθμών παραγωγής ενέργειας στον κύκλο ζωής τους

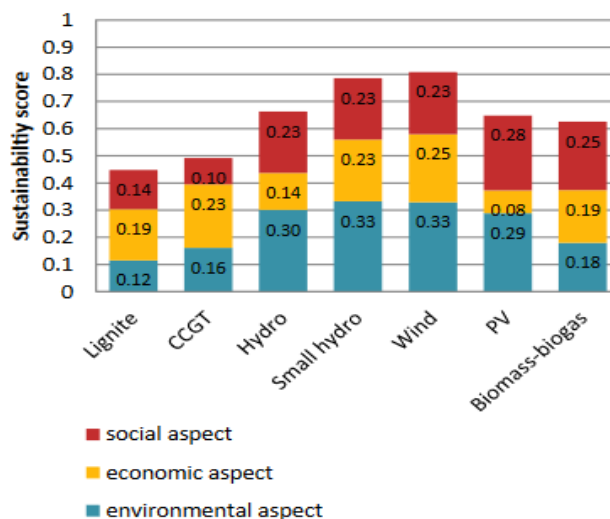
(Roinioti & Koroneos, 2019) Integrated life cycle sustainability assessment of the Greek interconnected electricity system

Η παραπάνω έρευνα πραγματοποιεί μία ολοκληρωμένη LCSA του Ελληνικού ηπειρωτικού δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας. Το οργανόγραμμα της μεθοδολογίας παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.8. Στην ανάλυση περιλαμβάνονται επτά τεχνολογίες παραγωγής ηλεκτρικής

ενέργειας με στόχο να αναδειχθεί η πιο βιώσιμη τεχνολογία. Η βιωσιμότητα καθορίζεται από περιβαλλοντικά, οικονομικά και κοινωνικά κριτήρια που κατατάσσονται μέσω μιας πολυκριτήριας ανάλυσης με δύο τρόπους. Αρχικά ώστε τα κριτήρια να έχουν το ίδιο βάρος και στην συνέχεια να διαφοροποιούνται υπό την προτίμηση των εκάστοτε αρμοδίων. Χρησιμοποιούνται δεκαπέντε δείκτες κύκλου ζωής για την αξιολόγηση, έξι περιβαλλοντικοί, τρεις οικονομικοί και έξι κοινωνικοί. Οι σταθμοί παραγωγής ενέργειας υπό εξέταση είναι λιγνιτικοί, CCGT, μικροί και μεγάλοι υδροηλεκτρικοί (Υ/Η), αιολικοί, φωτοβολταϊκά (PV), βιομάζας και CHP. Οι συνολικές εκπομπές CO<sub>2</sub> για τις παραπάνω τεχνολογίες ανέρχονται στα 1734.45 gCO<sub>2</sub>-Eq/kWh. Στη συνέχεια, με τη σύγκρισή τους υπό την προϋπόθεση ισότητας των βαρών -Σχήμα 2.9- η αιολική αναδείχθηκε ως η πιο βιώσιμη, με τους μικρούς υδροηλεκτρικούς σταθμούς να καταλαμβάνουν την δεύτερη θέση. Ακολουθούν με την σειρά οι μεγάλοι Υ/Η, PV, βιομάζας, CCGT και τέλος οι λιγνιτικοί. Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι ανάλογα με τις προτιμήσεις στα βάρη επηρεάζεται και το τελικό αποτέλεσμα της βιωσιμότητας, με τις RES να επικρατούν στις ενδεχόμενες εναλλαγές στην σπουδαιότητα των κριτηρίων.



**Σχήμα 2.8 :** Μεθοδολογία LCSA του ελληνικού ηπειρωτικού δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας

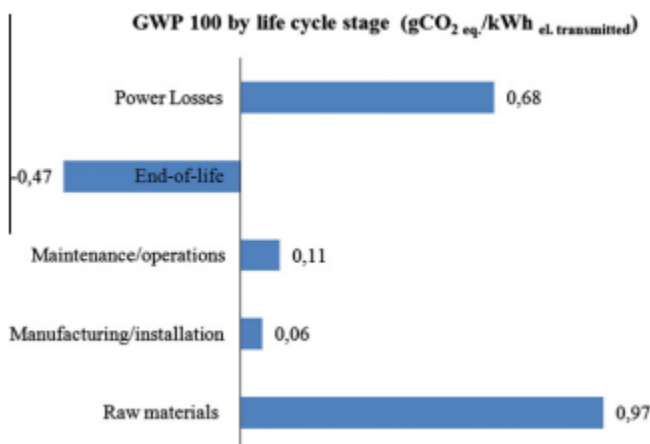


**Σχήμα 2.9 :** Κατάταξη σταθμών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας ως προς την βιωσιμότητα με ισότητα των βαρών

(Raquel S. Jorge & Hertwich, 2013) Environmental evaluation of power transmission in Norway

Η παραπάνω έρευνα συμβάλλει στην κατανόηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων που προέρχονται από την μεταφορά και διανομή ηλεκτρικής ενέργειας (T&D) του Νορβηγικού δικτύου. Η ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται είτε από συμβατικά καύσιμα είτε από ΑΠΕ μεταφέρεται από τα εργοστάσια παραγωγής στους καταναλωτές δημιουργώντας περιβαλλοντικούς ρύπους ενισχύοντας τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις του ενεργειακού τομέα. Γίνεται καταμέτρηση των επιπτώσεων του νορβηγικού δικτύου μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας με την βοήθεια της AKZ και των εργαλείων ReCiPe και Arda. Η λειτουργική μονάδα αναφοράς θεωρείται η 1 kWh που διατίθεται από το κεντρικό δίκτυο στο δίκτυο διανομής. Συνολικά εξετάζονται 11.097 km αγωγών και καλωδίων, 345 μετασχηματιστές και 121 υποσταθμοί που έχουν εγκατασταθεί στο δίκτυο μέχρι και το 2009. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι για κάθε kWh που καταναλώνεται παράγονται 1.3 - 1.5 g CO<sub>2</sub>-Eq. Το 50% των επιπτώσεων οφείλεται στις απώλειες ενέργειας ενώ το υπόλοιπο 50% οφείλεται σε διαδικασίες όπως η παραγωγή των υλικών, η εγκατάσταση, η συντήρηση και ο τρόπος αποικοδόμησης στο τέλος της ζωής της εκάστοτε κατασκευής.

Επιπλέον, αποδείχθηκε ότι η παραγωγή των υλικών και οι απώλειες ενέργειας, η κατασκευή των επίγειων καλωδίων και μετασχηματιστών, όπως επίσης και οι εκπομπές SF<sub>6</sub> από τους GIS αποτελούν τις πιο ρυπογόνες διαδικασίες όσον αφορά την κλιματική αλλαγή (CC) όπως αποδεικνύεται στο σχήμα 2.10. Τέλος, μέσω της μεθόδου ανάλυσης ευαισθησίας υπολογίστηκε ότι με την αντικατάσταση του νορβηγικού ενεργειακού μείγματος αρχικά με το σκανδιναβικό και στη συνέχεια με το ευρωπαϊκό, αυξάνεται το ποσοστό συμβολής των απωλειών ενέργειας στην CC σε 84% και 94% αντίστοιχα.

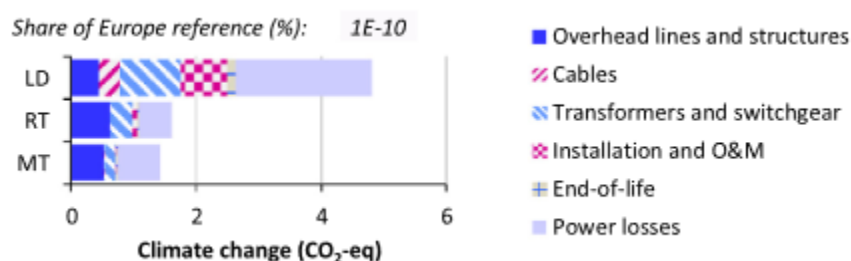


**Σχήμα 2.10 :** Συνεισφορά των σταδίων κύκλου ζωής του κεντρικού δικτύου ως προς το GWP 100

(Arvesen et al., 2015) Life cycle assessment of transport of electricity via different voltage levels: A case study for Nord-Trøndelag county in Norway

Εν συνεχεία της προηγούμενης, στόχος της ακόλουθης έρευνας είναι η κατανόηση και μέτρηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων που προέρχονται από την μεταφορά και διάθεση ηλεκτρικής ενέργειας στους καταναλωτές σε τρία επίπεδα. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω μιας ΑΚΖ του Νορβηγικού δικτύου μεταφοράς και διανομής (T&D) ηλεκτρικής ενέργειας σε τοπικό, περιφερειακό (επαρχία Nord-Trøndelag) και εθνικό επίπεδο. Το δίκτυο αποτελείται από επίγειες γραμμές ρεύματος, ΥΚ, μετασχηματιστές και άλλο ενεργειακό εξοπλισμό. Ως λειτουργική μονάδα αναφοράς χρησιμοποιείται η 1 MWh.

Επιπλέον, συγκρίνονται οι επιπτώσεις του δικτύου T&D με αυτές που προκύπτουν από την παραγωγή ενέργειας, με την βοήθεια του εργαλείου ReCiPe. Τα αποτελέσματα έδειξαν πως το συνολικό ανθρακικό αποτύπωμα του Νορβηγικού δικτύου T&D ηλεκτρικής ενέργειας είναι 7.8 kg CO<sub>2</sub>-Eq/MWh. Η τοπική διανομή ρεύματος αναδείχθηκε ως η πιο ρυπογόνα με ποσοστό 60% και ακολουθούν η περιφερειακή και εθνική μεταφορά με 20% αμφότερες. Συγκεκριμένα η μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας από το εθνικό δίκτυο έχει περιβαλλοντικό κόστος 1.4 kg CO<sub>2</sub>-Eq/MWh, από το περιφερειακό 1.6 kg CO<sub>2</sub>-Eq/MWh και από το τοπικό δίκτυο διανομής 4.8 kg CO<sub>2</sub>-Eq/MWh όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.11. Λαμβάνοντας υπόψη το Νορβηγικό ενεργειακό μείγμα οι υποδομές και οι απώλειες ενέργειας έχουν σημαντικό ρόλο στις συνολικές επιπτώσεις. Όσον αφορά την κλιματική αλλαγή, οι απώλειες ενέργειας φαίνεται να έχουν το μεγαλύτερο μερίδιο με ποσοστό που αγγίζει 44% των συνολικών επιπτώσεων. Ακολουθούν οι επίγειες γραμμές - υποδομές και οι μετασχηματιστές - λοιπός εξοπλισμός με ποσοστό που δεν ξεπερνά το 20% αντίστοιχα. Το υπόλοιπο ποσοστό οφείλεται στην εγκατάσταση-συντήρηση, στα καλώδια και στην αποικοδόμηση. Τέλος, η σύγκριση παραγωγής και T&D δείχνει πως η ηλεκτρική ενέργεια από το δίκτυο T&D προκαλεί λιγότερες περιβαλλοντικές επιβαρύνσεις, χωρίς όμως να θεωρούνται αμελητέες, ανεξάρτητα από το υποτιθέμενο ενεργειακό μείγμα.



**Σχήμα 2.11 :** Αποτελέσματα από την μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας σε εθνικό (MT), περιφερειακό (RT) και τοπικό (LD) επίπεδο

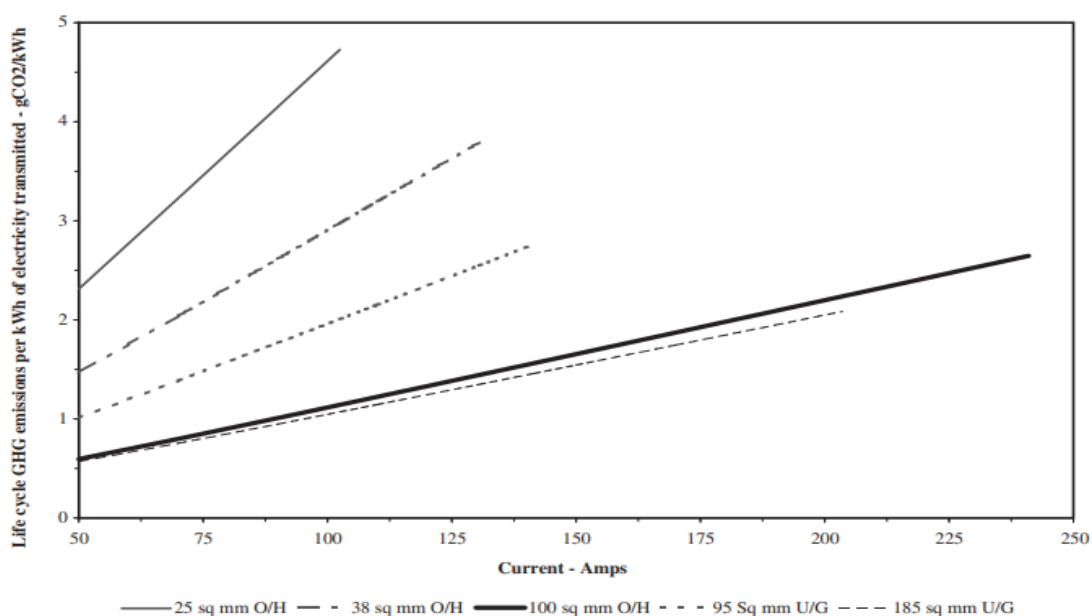
## (Gargiulo et al., 2017) LCA of electricity networks: a review

Στόχος του συγκεκριμένου άρθρου είναι η ανασκόπηση ερευνών που έχουν διεξαχθεί υπο την μεθοδολογία της AKZ είτε πάνω σε ηλεκτρικά δίκτυα είτε στον εξοπλισμό τους, με αποτέλεσμα να αναγνωριστούν τα σημαντικά μεθοδολογικά στοιχεία και τα μέρη εκείνα που χρειάζονται μεγαλύτερη εμβάθυνση. Συνολικά 16 έρευνες εξετάστηκαν και χωρίστηκαν σε τρεις κατηγορίες. Η πρώτη αναφέρεται σε οκτώ έρευνες με επίκεντρο συγκεκριμένα εξαρτήματα του ηλεκτρικού δικτύου, όπως επίγειες γραμμές, πύργοι, αγωγοί, καλώδια, μετασχηματιστές κ.α. Η δεύτερη ομάδα που αποτελείται από 6 έρευνες ασχολείται συνολικά με το δίκτυο μεταφοράς και διανομής ηλεκτρικής ενέργειας (T&D), ενώ η τελευταία εμπεριέχει 2 έρευνες που αναφέρονται στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Αποδείχθηκαν τα παρακάτω ως τα απολύτως καίρια μεθοδολογικά στοιχεία. Αρχικά ο σωστός καθορισμός της λειτουργικής μονάδας αναφοράς (functional unit), των ορίων του συστήματος (system boundaries), και των σταδίων του κύκλου ζωής με λεπτομέρεια και ακρίβεια καθίσταται αναγκαίο. Στη συνέχεια είναι η επιλογή των κατηγοριών των περιβαλλοντικών επιπτώσεων και η έγκυρη αποτύπωση του εκάστοτε ενεργειακού μείγματος ώστε να εξακριβωθούν οι απώλειες ενέργειας. Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι η μη συμπερίληψη των απωλειών ενέργειας στην έρευνα μπορεί να είναι παραπλανητικό. Τέλος ο τρόπος με τον οποίο αποικοδομείται η κατασκευή στο τέλος της ζωής της (ανακύκλωση) είναι σημαντικός καθώς αποζημιώνει ένα μεγάλο μέρος των περιβαλλοντικών επιπτώσεων.

## (Jones & McManus, 2010) Life-cycle assessment of 11 kV electrical overhead lines and underground cables

Η έρευνα εστιάζει στην εύρεση του λιγότερου ρυπογόνου ηλεκτρικού καλωδίου 11kV μεταξύ πέντε διαφορετικών επιλογών. Αναλύονται οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις τριών επίγειων και δύο υπόγειων καλωδίων εξετάζοντας όλα τα στάδια του κύκλου ζωής τους με την βοήθεια της AKZ, ενώ στη συνέχεια για να βρεθεί το κατάλληλο συγκρίνονται ως

προς τις επιπτώσεις κατά την παραγωγή και την λειτουργία τους. Τα όρια του συστήματος καθορίστηκαν από την βάση δεδομένων του ecoinvent 2.0, χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό SimaPro 7.1 για την μοντελοποίηση και ως λειτουργική μονάδα αναφοράς η 1 kWh ηλεκτρικής ενέργειας που μεταφέρεται μέσω 1 km εγκατεστημένου καλωδίου 11kV. Από τις κατηγορίες των επιπτώσεων η CC, η Fossil Fuel Depletion (FFD) και η Particulate Matter Formation (PMF) αποδείχθηκαν οι πιο σημαντικές. Οι επιπτώσεις από τις απώλειες ενέργειας του αγωγού κατά την λειτουργία του αναδείχθηκαν ως οι πιο επιβλαβείς για το περιβάλλον, ενώ οι επιπτώσεις από τα υλικά θεωρούνται αμελητέες, με εξαίρεση την περίπτωση της χαμηλής λειτουργίας των υπόγειων καλωδίων, κατά την οποία η PMF απεδείχθει αρκετά υψηλή. Οι επιπτώσεις αυτές όμως θα μπορούσαν να ισοβαθμιστούν με το κατάλληλο πρόγραμμα ανακύκλωσης. Τέλος, προέκυψε ότι το ΥΚ σε υψηλή λειτουργία σχεδόν σε όλες τις κατηγορίες επιπτώσεων –Σχήμα 2.12- είναι το λιγότερο ρυπογόνο για το περιβάλλον, ενώ για να μειωθούν οι απώλειες ενέργειας απαιτείται η εγκατάσταση αγωγού με όσο το δυνατόν χαμηλότερη αντίσταση.



**Σχήμα 2.12 :** Εκπομπές GHG διαφορετικών τύπων ηλεκτρικών καλωδίων 11 kV ανά kWh ηλεκτρικής ενέργειας που μεταφέρεται σε 1 km

## (Kim & Holme, 2015) Network Theory Integrated Life Cycle Assessment for an Electric Power System

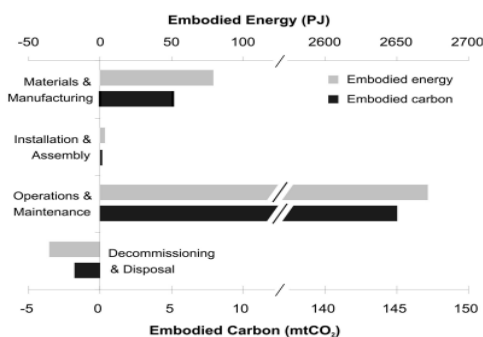
Σε αυτήν την έρευνα υπολογίζονται οι εκπομπές GHG του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας της Χιλής. Εντοπίζονται οι απώλειες ενέργειας του δικτύου και το περιβαλλοντικό κόστος που φέρουν στους καταναλωτές λαμβάνοντας υπόψη την διαφοροποίηση των απωλειών στο σύστημα διανομής και μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας μέσω του μεγέθους της ενεργειακής απόστασης. Για την ανάλυση χρησιμοποιείται η θεωρία δικτύων ενσωματωμένη στην AKZ. Έτσι οι εκπομπές GHG εντοπίζονται με δύο τρόπους χρησιμοποιώντας αρχικά ως βάση την παραγωγή kWh και έπειτα την ενεργειακή απόσταση. Ως λειτουργική μονάδα αναφοράς χρησιμοποιούνται οι απώλειες ενέργειας μιας επαρχίας της Χιλής για ένα χρόνο και η βάση δεδομένων Ecoinvent 2.2. Απο το σύστημα παραγωγής και το σύστημα μεταφοράς και διανομής ηλεκτρικής ενέργειας προέκυψαν 466 και 543 στοιχεία υπό εξέταση αντίστοιχα, συμπεριλαμβανομένων εργοστασίων παραγωγής ενέργειας, υποσταθμών, πύργων και καλωδίων. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι λαμβάνοντας υπόψη τις απώλειες ενέργειας κατά την μεταφορά προκύπτει διαφορετικό συμπέρασμα. Σύμφωνα με το Σχήμα 2.13 η περιβαλλοντική κατάταξη των επαρχιών σχετίζεται σημαντικά με το μέγεθος της απόστασης ενέργειας, δηλαδή της ηλεκτρικής διασύνδεσης τους και κατ'επέκταση με τις απώλειες ενέργειας. Υπολογίστηκαν συνολικά 23.07 Mt CO<sub>2</sub>-Eq εκπομπών GHG από το ενεργειακό σύστημα, 1.61 Mt CO<sub>2</sub>-Eq από τις απώλειες ενέργειας και η συνολική ενεργειακή απόσταση για την μεταφορά έφτασε στις 12,842.10 TWh km.

Province	GHG Emissions Rank by		Energy Distance (TWh km)
	Electricity Consumption	Energy Distance	
Santiago	1	1	5001.68
Concepcion	2	6	477.13
Cachapoal	3	4	735.91
Valparaiso	4	16	176.43
Copiapó	5	3	826.93
Nuble	6	9	404.32
Cordillera	7	13	210.27
Bio Bio	8	18	138.48
Elqui	9	2	875.46
Cautín	10	7	440.39

**Σχήμα 2.13 :** Κατάταξη των εκπομπών GHG των επαρχιών της Χιλής ως προς τις απώλειες ενέργειας

## (Harrison et al., 2010) Life Cycle Assessment of the Transmission Network in Great Britain

Στην παραπάνω έρευνα πραγματοποιείται μία προκαταρκτική ανάλυση του κύκλου ζωής των εκπομπών CO<sub>2</sub> του δικτύου μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας της Μεγάλης Βρετανίας (MB) με την βοήθεια της ΑΚΖ. Παρουσιάζεται τόσο η ένταση της ενέργειας που μεταφέρεται στο δίκτυο σε kJ/kWh όσο και οι επιπτώσεις των εκπομπών CO<sub>2</sub> σε CO<sub>2</sub>/kWh του δικτύου υψηλής τάσης της MB που λειτουργεί στα 400, 275 και 132 kV. Λειτουργική μονάδα αναφοράς θεωρείται η μεταφορά μιας kWh ηλεκτρικής ενέργειας. Στην ανάλυση συμπεριλήφθηκαν επίγειες και υπόγειες γραμμές ρεύματος, υποσταθμοί, μετασχηματιστές και άλλος ενεργειακός εξοπλισμός. Στο τέλος της ζωής τους τα στοιχεία υπό ανάλυση υποθέτεται ότι αποσυναρμολογούνται, ότι έχουν διάρκεια ζωής 40 έτη και ότι παράχθηκαν στην MB με στατικό ενεργειακό μείγμα και σταθερές απώλειες. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η ένταση ενέργειας του δικτύου ανέρχεται στα 194 kJ/kWh και ότι οι εκπομπές άνθρακα αντιστοιχούν σε 10.6 gCO<sub>2</sub>/kWh ηλεκτρικής ενέργειας. Το πιο ρυπογόνο στάδιο του κύκλου ζωής είναι αυτό της λειτουργίας με ποσοστό 96%, ενώ από αυτό το 85% ανήκει στις απώλειες ενέργειας. Ένας άλλος σημαντικός παράγοντας είναι οι εκπομπές SF<sub>6</sub>. Τα υλικά παρά τη μεγάλη χρήση τους συμβάλλουν σε αρκετά μικρό βαθμό στο σύνολο των εκπομπών με ποσοστό 3.4 % λόγω ανακύκλωσής τους. Το Σχήμα 2.14 δείχνει τη χρήση ενέργειας και το εκπεμπόμενο ανθρακικό αποτύπωμα σε όλα τα στάδια του κύκλου ζωής του δικτύου μεταφοράς που είναι 2,722 PJ και 148.6 Mt CO<sub>2</sub> αντίστοιχα.



**Σχήμα 2.14 :** Ενσωματωμένη Ενέργεια και εκπομπές CO<sub>2</sub> σε κάθε στάδιο κύκλου ζωής του δικτύου μεταφοράς της MB

Παρακάτω παρατίθεται ο συγκεντρωτικός πίνακας 2.1 των βιβλιογραφικών αναφορών. Η 2η στήλη (Τεχνολογία) αναφέρεται στο είδος της τεχνολογίας που υπόκειται σε περιβαλλοντική αξιολόγηση στην εκάστοτε έρευνα. Γενικευμένα, το ηλεκτρικό δίκτυο χωρίζεται στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και στην μεταφορά & διανομή της στους καταναλωτές. Αρχικά λοιπόν αναφέρεται το κομμάτι του δικτύου που εστιάζει η έρευνα και, αν χρειάζεται, η συγκεκριμένη τεχνολογία που υπόκειται σε περιβαλλοντική αξιολόγηση. Στη συνέχεια στη 3η στήλη (Εκπομπές) γίνεται καταγραφή των αποτελεσμάτων των εκπομπών που υπολογίστηκαν από την ανάλυση με μονάδες τα  $\text{gCO}_2\text{-Eq/kWh}$  και  $\text{kgCO}_2\text{-Eq}$  που σχετίζονται με τις επιπτώσεις όσον αφορά την CC. Στην 4η&5η στήλη (Λογισμικό) & (Βάση δεδομένων-Περιβαλλοντικός δείκτης) παρουσιάζεται το λογισμικό, η βάση δεδομένων των υλικών και ο περιβαλλοντικός δείκτης που χρησιμοποιήθηκαν για τη διεκπεραίωση της ανάλυσης. Η 6η στήλη (Απώλειες ενέργειας) αναφέρεται στο αν έχουν συμπεριληφθεί στην έρευνα οι απώλειες ενέργειας στον κύκλο ζωής και η 7η (Λειτουργική μονάδα Αναφοράς) στην λειτουργική μονάδα που έχει επιλεγεί από τον ερευνητή. Παρατηρούμε ότι στην πλειονότητα των εξεταζόμενων ερευνών έχει επιλεγεί η kWh. Τέλος, στην 8η (Διάρκεια ζωής), 9η (Μέθοδος) και 10η (Διαχείριση αποβλήτων) στήλη καταγράφονται αρχικά ο κύκλος ζωής που έχει αποδοθεί στις εξεταζόμενες τεχνολογίες (γι αυτό και υπάρχουν εναλλαγές στα έτη), η μεθοδολογία που χρησιμοποιείται και η συμπερίληψη ή μη στην ανάλυση της αποκομιδής του έργου.

Έρευνες	Τεχνολογία	Εκπομπές	Λογισμι κό	Βάση δεδομένων & Περιβαλλοντικός δείκτης	Απώλειες ενέργειας	Λειτουργική μονάδα αναφοράς	Διάρκεια ζωής (έτη)	Μέθοδος	Διαχείριση αποβλήτων
<b>(Roorda, 2016)</b>	Παραγωγή και μεταφορά ( Ελληνικό ηλεκτρικό δίκτυο)	1608 gCO <sub>2</sub> -Eq/kWh	Simapro	<ul style="list-style-type: none"> <li>CML 2 Baseline 2000</li> <li>Ecoinvent 2.0</li> </ul>	Ναι	kWh	20-50,100	AKZ	Όχι
<b>(Aversen et al., 2014)</b>	Μεταφορά (450kV HVDC, 33kV)	2.49 gCO <sub>2</sub> -Eq/kWh	-	<ul style="list-style-type: none"> <li>Ecoinvent</li> <li>Exiobase</li> <li>Recipe</li> </ul>	Όχι	kWh	30	Υβριδική AKZ	Όχι
<b>(Weber et al., 2010)</b>	Παραγωγή και μεταφορά (Αμερικάνικο ηλεκτρικό δίκτυο)	690 gCO <sub>2</sub> /kWh	-	-	Όχι	kWh	-	AKZ	-
<b>(Saitov, 2014)</b>	Μεταφορά (2 x 400kV lines + + 400kV substation)	2.23E+08 kgCO <sub>2</sub> -Eq	-	<ul style="list-style-type: none"> <li>Ecoinvent</li> <li>Eurostat</li> <li>Exiopol</li> <li>Recipe</li> </ul>	Όχι	το ίδιο το σύστημα	40	Υβριδική AKZ	Όχι
<b>(Valheim, 2016)</b>	Μεταφορά (380kV, 400kV 275kV, 330kV)	1η περίπτωση: 0.25 Mt CO <sub>2</sub> -Eq 2η περίπτωση : 92.5 Mt CO <sub>2</sub> -Eq	Arda	Exiobase	Όχι	το ίδιο το σύστημα	40	IOA	Όχι
<b>(Raquel Santos Jorge et al., 2012a)</b>	Μεταφορά (150 kV, 400 kV, HVDC)	-	-	<ul style="list-style-type: none"> <li>Ecoinvent 2.2</li> <li>ReCipe</li> </ul>	Ναι	1 km της γραμμής ρεύματος/καλωδίου	100	AKZ	Ναι
<b>(Raquel Santos Jorge et al., 2012b)</b>	Μεταφορά (Μετασχηματιστές 0.315-500 MVA, GIS 300kV & 420 kV και ΛΕΕ )	<ul style="list-style-type: none"> <li>Μετασχηματιστές: 221.41kt CO<sub>2</sub>-Eq</li> <li>GIS: 1216.76 t CO<sub>2</sub>-Eq</li> <li>ΛΕΕ: 451.39 t CO<sub>2</sub>-Eq</li> </ul>	-	<ul style="list-style-type: none"> <li>Ecoinvent</li> <li>ReCipe</li> </ul>	Ναι	<ul style="list-style-type: none"> <li>1 μονάδα του GIS</li> <li>1 λειτουργική συσκευή εξοπλισμού</li> </ul>	100	AKZ	Ναι
<b>(Orfanos et al., 2019)</b>	Παραγωγή και μεταφορά	<ul style="list-style-type: none"> <li>Ηπειρωτικό δίκτυο: 97 gCO<sub>2</sub>-Eq/kWh</li> </ul>	Simapro	Ecoinvent	Ναι	kWh	100	AKZ	Όχι

	(Ελληνικό ηλεκτρικό δίκτυο)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Παραγωγή: 685 gCO<sub>2</sub>-Eq/kWh</li> </ul>							
<b>(Goergakellow, 2012)</b>	Παραγωγή (7 τύποι εργοστασίων)	18.38 €/MWh	EcoSens eLE	Ecoinvent	Όχι	€/MWh	30,35	Υβριδική AKZ	Όχι
<b>(Roinioti &amp; Koroneos, 2019)</b>	Παραγωγή (Ελληνικό Ηπειρωτικό δίκτυο)	1734.45 gCO <sub>2</sub> -Eq/kWh	Gemis	<ul style="list-style-type: none"> <li>Gemis 4.9.5</li> <li>Eurostat</li> </ul>	Όχι	kWh	100	AKZ & Πολυκριτήρια ανάλυση	Όχι
<b>(Raquel S. Jorge &amp; Hertwich, 2013)</b>	Παραγωγή και μεταφορά (Νορβηγικό ηλεκτρικό δίκτυο)	1.3 - 1.5 g CO <sub>2</sub> -Eq/kWh	Arda	<ul style="list-style-type: none"> <li>Ecoinvent</li> <li>ReCipe</li> </ul>	Ναι	kWh	100	AKZ	Ναι
<b>(Arvesen et al., 2015)</b>	Μεταφορά (Νορβηγικό δίκτυο)	7.8 kg CO <sub>2</sub> -Eq/MWh	-	<ul style="list-style-type: none"> <li>Ecoinvent 2.2</li> <li>ReCipe</li> </ul>	Ναι	MWh	20,25,30,40	AKZ	Όχι
<b>(Gergiulo et al., 2017)</b>	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>(Jones &amp; McManus, 2010)</b>	Μεταφορά (11kV 3 x OH +2 x UG )	<ul style="list-style-type: none"> <li>OH1: 9640 kgCO<sub>2</sub>-Eq</li> <li>OH2: 12500 kgCO<sub>2</sub>-Eq</li> <li>OH3: 23900 kgCO<sub>2</sub>-Eq</li> <li>UG1: 16800 kgCO<sub>2</sub>-Eq</li> <li>UG2: 23400 kgCO<sub>2</sub>-Eq</li> </ul>	Simapro	Ecoinvent 2.0	Ναι	1 kWh που μεταφέρεται σε 1 km καλωδίου	70,80	AKZ	Ναι
<b>(Kim &amp; Holme, 2015)</b>	Παραγωγή και μεταφορά (Χιλιανό ηλεκτρικό δίκτυο)	<ol style="list-style-type: none"> <li>0.459 kgCO<sub>2</sub>-Eq/kWh</li> <li>1.61 MtCO<sub>2</sub>-Eq</li> </ol>	Simapro	Ecoinvent	Ναι	<ol style="list-style-type: none"> <li>kWh</li> <li>Απώλειες ενέργειας 1 έτος</li> </ol>	6	AKZ & Θεωρία δικτύων	Όχι
<b>(Harrison et al., 2010)</b>	Μεταφορά (Δίκτυο MB)	10.6 gCO <sub>2</sub> -Eq/kWh	-	<ul style="list-style-type: none"> <li>SYS National Grid, 2008</li> <li>Inventory of Carbon and Energy</li> </ul>	Ναι	kWh	40	AKZ	Ναι

**Πίνακας 2.1 :** Συγκεντρωτικός πίνακας βιβλιογραφικής αναζήτησης

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

### Μεθοδολογία AKZ

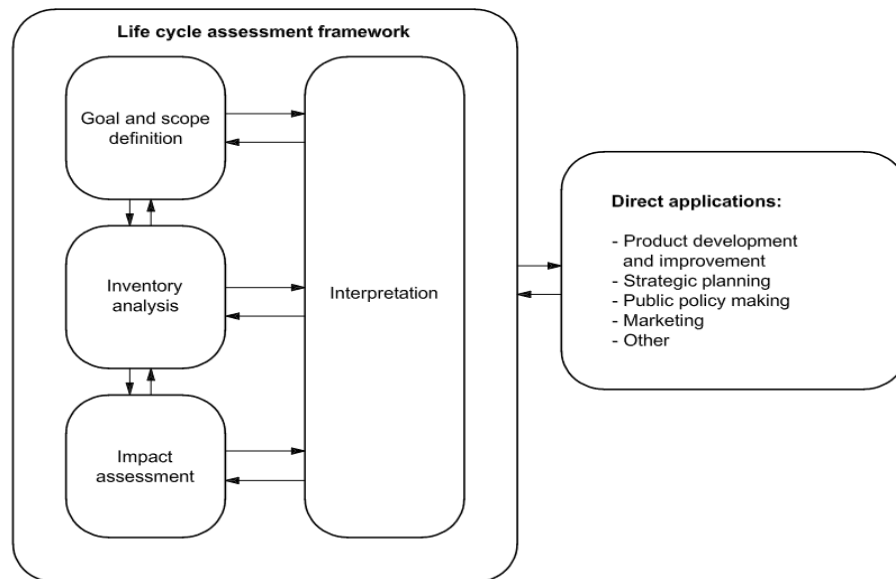
Στην παρούσα εργασία, χρησιμοποιείται η μεθοδολογία της AKZ. Θεωρείται από τα πιο γνωστά εργαλεία περιβαλλοντικής αξιολόγησης ενός προϊόντος ή μιας υπηρεσίας. Αξιοποιείται ως μια τεχνική εκτίμησης των περιβαλλοντικών επιβαρύνσεων που συνδέονται με το έργο της ηλεκτρικής διασύνδεσης της Κρήτης προσδιορίζοντας και ποσοτικοποιώντας την ενέργεια και τα υλικά που χρησιμοποιούνται, καθώς και τα απόβλητα που απελευθερώνονται στο περιβάλλον. Στόχος είναι η εκτίμηση των επιπτώσεων ολόκληρου του κύκλου ζωής του έργου ("cradle to grave"). Δηλαδή από τη χρήση ενέργειας για τη συλλογή των υλικών έως την τελική διάθεση και εναπόθεση των αποβλήτων, αναγνωρίζοντας και προβλέποντας τις δυνατότητες περιβαλλοντικών βελτιώσεων. Σημαντικό είναι η περιβαλλοντική αξιολόγηση κάθε σταδίου της διαδικασίας να αξιολογείται συστηματικά χωρίς μεταφορές των επιπτώσεων από το ένα στάδιο στο άλλο. (Setac, 2018)

Σε αυτό το κεφάλαιο πραγματοποιείται η μοντελοποίηση και η εισαγωγή δεδομένων στο λογισμικό Simapro. Ο ακριβής επιμέρους εξοπλισμός και τα υλικά που χρειάζονται για την δημιουργία των τμημάτων του έργου δεν έχουν εξακριβωθεί λόγω έλλειψης δεδομένων. Έτσι, η εξαγωγή των περιβαλλοντικών αποτελεσμάτων έχει προκύψει από την ανάλυση αντίστοιχων τμημάτων από έργα και τεχνολογίες ταυτόσιμες με το εξεταζόμενο. Το κάθε στοιχείο της ηλεκτρικής διασύνδεσης Κρήτης-Αττικής εξετάζεται ξεχωριστά και η ανάλυση του επικεντρώθηκε σε δύο φάσεις του κύκλου ζωής, στην κατασκευή και στη χρήση.

#### 3.1 Εισαγωγή

Ο διεθνής οργανισμός ISO (International Standard Organisation) ανέπτυξε το πλαίσιο της μεθοδολογίας στα πρότυπα ISO 14040-44 και περιλαμβάνει τέσσερα στάδια. (ISO, 14040-44)

- 1) Προσδιορισμός του σκοπού, του αντικειμένου και του πλαισίου της μελέτης (Goal and scope definition)
- 2) Καταγραφή δεδομένων (Inventory analysis - LCIA)
- 3) Ανάλυση των επιπτώσεων (Impact assessment)
- 4) Ερμηνεία και εκτίμηση βελτιώσεων (Interpretation)

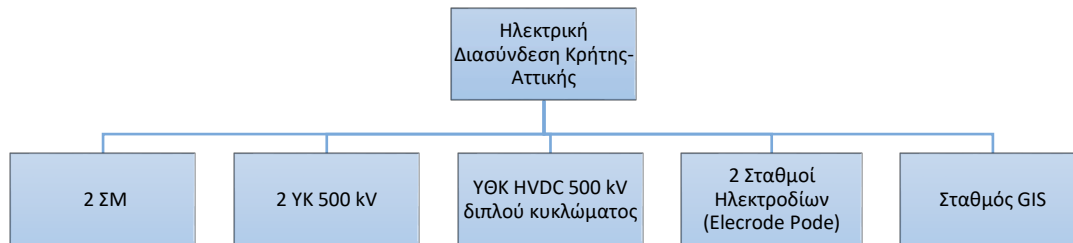


**Σχήμα 3.1 :** Στάδια AKZ (ISO E. , 2006)

Όπως έχει προαναφερθεί, σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η διερεύνηση των περιβαλλοντικών επιβαρύνσεων της ηλεκτρικής διασύνδεσης της Κρήτης με την Αττική. Παρόλο που η μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας στο δίκτυο αποτελείται από πολλά στοιχεία και διαφορετικές τεχνολογίες, το πλαίσιο της μελέτης επικεντρώνεται αμιγώς στην περιβαλλοντική ανάλυση των βασικών στοιχείων του έργου. (ΑΔΜΗΕ, Τεχνική Περιγραφή του έργου, 10.12.2022)

- των δύο δηλαδή Υποσταθμών Μετατροπής Κουμμουνδούρου και Δαμάστας
- των δύο Υπόγειων Καλωδίων υψηλής τάσης
- τον υποσταθμό GIS
- των δύο Υποθαλάσσιων Καλωδίων υψηλής τάσης και τέλος
- των δύο Σταθμών Ηλεκτροδίων Σταχτορρόης και Κορακιάς.

Σε κάθε ένα από τα επιμέρους “κομμάτια” του έργου εξετάζεται ο κύκλος ζωής του. Τα φυσικά όρια του συστήματος ξεκινούν από τον ΣΜ στην Πάχη Μεγάρων και σταματούν στον υποσταθμό GIS Δαμάστας, που συνδέεται με το δίκτυο διανομής ηλεκτρικής ενέργειας της Κρήτης.



**Σχήμα 3.2 :** Τα βασικά στοιχεία του έργου

Η λειτουργική μονάδα αναφοράς ιδανικά θα ήταν οι επιπτώσεις ανά kWh ηλεκτρικής ενέργειας που μεταφέρεται στο σύστημα. Λόγω απόκτησης λίγων ή και καθόλου δεδομένων, λειτουργική μονάδα αναφοράς θα είναι το ίδιο το σύστημα, το στάδιο της αποκομιδής του έργου και οι απώλειες ενέργειας δεν θα συμπεριληφθούν στην ανάλυση (εκτός από τις απώλειες του σταθμού GIS) καθώς και τα πλεονεκτήματα ή επιπτώσεις από πιθανή διαδικασία ανακύκλωσης. Για όλα τα στοιχεία του συστήματος δίνεται υποθετική χρονική διάρκεια ζωής τα 40 έτη. Χρησιμοποιείται το υπολογιστικό εργαλείο Simapro και η βάση δεδομένων ecoinvent.

### 3.2 SimaPro

Η εξαγωγή των αποτελεσμάτων πραγματοποιείται με τη βοήθεια του υπολογιστικού εργαλείου Simapro. Υπολογίζει τους περιβαλλοντικούς ρύπους που προκύπτουν στον κύκλο ζωής του έργου βασισμένο στις εκπομπές που προέρχονται λόγω των υλικών και των απαιτούμενων για την παραγωγή τους διαδικασιών, οι οποίες καταχωρούνται στις

βάσεις δεδομένων του προγράμματος. Κάποιες βασικές κατηγορίες επιπτώσεων για τον άνθρωπο και το περιβάλλον είναι το φαινόμενο του θερμοκηπίου (GWP), ο σχηματισμός όζοντος (Ozone formation), ο ευτροφισμός (Eutrophication), η οξίνιση του εδάφους (Terrestrial acidification), η συσσώρευση σωματιδίων στην ατμόσφαιρά (Particulate matter formation) και άλλες.

Αποτελεί ένα ευρέως διαδεδομένο εργαλείο Ανάλυσης Κύκλου Ζωής παρέχοντας εξειδικευμένες διεργασίες, παραμένοντας ταυτόχρονα αρκετά εύχρηστο. Διαθέτει μεγάλο όγκο παρεχομένων δεδομένων σε προεγκατεστημένες βάσεις και βιβλιοθήκες. Τα δεδομένα είναι κατανεμημένα σε ξεχωριστές βιβλιοθήκες, υποστηριζόμενες από όλο το εύρος των δυνατών διεργασιών ή διαδικασιών. Η επεξεργασία των αποτελεσμάτων παρουσιάζεται σε ραβδογραμματα και πίνακες με τις πιο σημαντικές πληροφορίες. (Simapro, 2022)

### 3.3 Καταγραφή δεδομένων Κύκλου ζωής (LCIA)

Τα δεδομένα προσεγγίζονται με τη μέθοδο cut off U- recycling approach. Το μοντέλο αυτό διανέμει τα βάρη μέχρι το σημείο όπου το προϊόν "πωλείται" και εφαρμόζει μία μέθοδο αποκοπής (cut off) στο σημείο που τα ανακυκλώσιμα υλικά -αν υπάρχουν- αποχωρούν από το σύστημα. Έτσι το περιβαλλοντικό βάρος που ανατίθεται στα υλικά απονέμεται σε αυτά έως ότου είναι διαθέσιμα προς ανακύκλωση. (Ellie Williams, 2022) Όπου ήταν αναγκαίο για την καταγραφή των ενεργειακών απαιτήσεων χρησιμοποιήθηκαν μετατροπές των μονάδων ορυκτών καυσίμων σε μονάδες ενέργειας. Π.χ, 1kg παραγωγής ενέργειας από άνθρακα αντιστοιχεί σε 29,3 MJ ~ 8.141 kWh. (ENS, 2022) Τέλος, για τις γεωγραφικές περιοχές προέλευσης των υλικών επιλέχθηκε όπου ήταν δυνατόν η Ευρώπη (RER), αλλιώς ο υπόλοιπος κόσμος (ROW) και μετά το παγκόσμιο επίπεδο (GLO). Για την ενέργεια πρώτη επιλογή ήταν η Ελλάδα (GR) και αν δεν ήταν εφικτή ακολουθήθηκε το μοτίβο των υλικών.

### 3.3.1 Υποθαλάσσια Καλώδια 500 kV HVDC

Μία ηλεκτρική διασύνδεση Υπερυψηλής Τάσης Συνεχούς Ρεύματος (HVDC) είναι ένα σύστημα μεταφοράς ηλεκτρικής ισχύος που, όπως αναφέρεται και στο όνομα της, χρησιμοποιεί Συνεχές Ρεύμα (DC) για τη μαζική μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας. Ως DC θεωρείται η συνεχόμενη ροή ηλεκτρικής ενέργειας με σταθερή κατεύθυνση, διαθέτοντας τάση με σταθερή πολικότητα. Στην συντριπτική πλειοψηφία κατασκευής υποθαλάσσιων ηλεκτρικών διασυνδέσεων διεθνώς, χρησιμοποιούνται καλώδια HVDC, ειδικά για μεγάλες αποστάσεις. Έχει αποδειχθεί ότι η χρήση καλωδίων συνεχούς ρεύματος μετά την απόσταση των 30-40 km είναι οικονομικότερη και πιο φιλική για το περιβάλλον από την αντίστοιχη τεχνολογία Εναλλασσόμενου ρεύματος (AC) (Van Hertem & Ghandhari, 2010).

Ένα υποθαλάσσιο καλώδιο αποτελείται από τον αγωγό, το μονωτικό υλικό και το περίβλημα ή αλλιώς εξωτερική προστασία. Ο αγωγός κατασκευάζεται είτε από χαλκό είτε από αλουμίνιο. Ο χαλκός χρησιμοποιείται περισσότερο σε υποθαλάσσια καλώδια λόγω των αγωγίμων ιδιοτήτων και της μηχανικής αντοχής του. Η μορφή της μόνωσης εξαρτάται ανάλογα με τον τύπο και την χρήση του καλωδίου. Υπάρχουν δύο τύποι μόνωσης, με χαρτί εμποτισμένο σε λάδι και με πολυμερή στερεά υλικά. Για την εξωτερική του προστασία χρησιμοποιείται ένα στρώμα από χαρτί ή ένα είδος πλαστικού, όπως πολυπροπυλένιο, που επενδύεται με μέταλλο για την γείωση και τέλος θωρακίζεται. Για τα καλώδια HVDC η θωράκιση πραγματοποιείται με σίδηρο. (Jan-Erik Skog, 2007)

Το συνολικό μήκος του υποθαλάσσιου καλωδίου της υπο εξέταση ηλεκτρικής διασύνδεσης ανέρχεται στα 334 km και εμπεριέχει ενσωματωμένες οπτικές ίνες. Για την καταγραφή των υλικών και της ενέργειας που έχει δαπανηθεί πάρθηκαν δεδομένα από ένα αντίστοιχο υποθαλάσσιο καλώδιο 450 kV HVDC της ηλεκτρικής διασύνδεσης NorNed, μεταξύ Νορβηγίας και Ολλανδίας. Το μήκος της σύνδεσης είναι 730 km, με ηλεκτρική ισχύ 700 MW. Ο αγωγός είναι χάλκινος με ένα πυρήνα, η μόνωση του γίνεται με την βοήθεια εμποτισμένου χαρτιού και έχει θωρακιστεί με σίδηρο. Έχουν υπολογιστεί τα υλικά για την κατασκευή, η μεταφορά τους στο χώρο εγκατάστασης και η ενέργεια που απαιτείται για την επιθεώρηση και συντήρησή τους. (Birkeland, 2011)

Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι κάποια υλικά απαραίτητα για την κατασκευή δεν υπήρχαν στην βάση δεδομένων ecoinvent. Όπως το υλικό με εμποτισμένο χαρτί για τη μόνωση και το wire drawing copper για τη βαφή του καλωδίου. Έτσι, επιλέχθηκαν να χρησιμοποιηθούν υλικά αντίστοιχης χρήσης όπως το insulation spiral-seam duct για την μόνωση και το acrylic varnish για τη βαφή.

### 3.3.2 GIS

Ένας υποσταθμός είναι μία πολύπλοκη μηχανική κατασκευή με μία σειρά από ηλεκτρικό εξοπλισμό που παραλαμβάνει, μετασχηματίζει και διανέμει ηλεκτρική ενέργεια. Περιλαμβάνει αρκετές τεχνολογίες με τους μετασχηματιστές (transformers) και τον εξοπλισμό μεταγωγής (switchgear) να είναι οι βασικότερες. Κατα την μεταφορά ενέργειας απαιτείται έλεγχος, προστασία και απομόνωση του ηλεκτρικού εξοπλισμού ενισχύοντας την αξιοπιστία της ηλεκτρικής παροχής. Για την απομόνωση του εξοπλισμού ενός υποσταθμού GIS και τη διασφάλιση της ροής της ηλεκτρικής ενέργειας, τα τμήματα που βρίσκονται υπό υψηλή τάση περικλείονται απο στεγανό γειωμένο μεταλλικό περίβλημα με μόνωση αερίου εξαφθοριούχου θείου (SF<sub>6</sub>).

Τα βασικά στοιχεία ενός GIS είναι :

1. Transformers (Μετασχηματιστές)
2. Substation bay / Switchgear (Εξοπλισμός Μεταγωγής)
3. Circuit breakers (Διακόπτες κυκλώματος)
4. Basic Civil Engineering (Βασικές Μηχανικές ενέργειες στον χώρο εγκατάστασης)

Στο προς εξέταση έργο θα κατασκευαστεί ένας υποσταθμός GIS 150 kV. Θα περιλαμβάνει έξι μετασχηματιστές 400/150 kV ονομαστικής ισχύος 280/60 MVA, πύλες που θα είναι εξοπλισμένες με διακόπτες ισχύος, καθώς και ψηφιακό σύστημα ελέγχου και προστασίας για ανίχνευση σφαλμάτων, που θα έχει την δυνατότητα να θέτει αυτόματα εκτός λειτουργίας τους διακόπτες όταν αυτό απαιτηθεί (Eco Consultants S.A, 2018).

Για τους μετασχηματιστές χρησιμοποιήθηκε ως βάση ένας μετασχηματιστής χωρητικότητας 250 MVA ενός υποσταθμού GIS 400 kV. Έχουν συμπεριληφθεί τα υλικά καθώς και η ενέργεια που χρειάζεται για την εξαγωγή των υλικών, η μεταφορά των υλικών κατασκευής, η κατασκευή, η μεταφορά του προϊόντος, και η συντήρησή του. (Saiton, 2014)

Θεωρούμε πως για έξι μετασχηματιστές χρειάζονται δύο διακόπτες κυκλώματος. Τα απαραίτητα δεδομένα για τα υλικά κατασκευής πάρθηκαν από αντίστοιχο διακόπτη 132 kV GIS. Η κατανάλωση ενέργειας για την φάση κατασκευής και χρήσης καθώς και η μεταφορά του τελικού προϊόντος πάρθηκαν από τον διακόπτη της ABB (εταιρεία κατασκευής ηλεκτρικού εξοπλισμού) type LTB 145D. (ABB, 2004), (Harrison et al., 2010)

Για τον εξοπλισμό μεταγωγής τα δεδομένα πάρθηκαν από τον αντίστοιχο GIS type ELK-14 300 kV της ABB. Υπολογίστηκαν οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις που προήλθαν από τα υλικά κατασκευής, από την μεταφορά τους, από την μεταφορά του τελικού προϊόντος, από την ενέργεια που καταναλώθηκε στην φάση κατασκευής και χρήσεως καθώς και οι απώλειες ενέργειας και οι απώλειες SF<sub>6</sub>. Για τον υπολογισμό των απωλειών ενέργειας εκτιμήθηκε ως μέσο φορτίο τα 500 A (ABB, 2007b). Τέλος οι απαραίτητες εργασίες στο χώρο εγκατάστασης πάρθηκαν από τον (Saiton, 2014).

Τα υλικά που δεν υπήρχαν στην βάση δεδομένων για τον σταθμό GIS είναι το presspan που είναι ένα είδος χαρτιού και η πορσελάνη. Επιλέχθηκαν λοιπόν τα αντίστοιχα υλικά wood wool και sanitary ceramics

### 3.3.3 Σταθμοί Ηλεκτροδίων (Electrode Podes)

Η προτεινόμενη ηλεκτρική Διασύνδεση της Κρήτης με το ΕΣΜΗΕ στην Αττική, όπως έχει προαναφερθεί, περιλαμβάνει ένα διπολικό σύνδεσμο συνολικής ισχύος 1000 MW με δύο καλώδια HVDC, ένα για το θετικό και ένα για τον αρνητικό πόλο με ικανότητα εκάστου καλωδίου ίση με το ήμισυ της συνολικής (500 MW).

Για τη διασφάλιση της προστασίας του Συστήματος σε περίπτωση βλάβης ή σφάλματος απαιτείται γείωση του συστήματος και επιστροφή του ρεύματος. Αυτό επιτυγχάνεται με τη βοήθεια της θάλασσας και την εγκατάσταση δύο Σταθμών Ηλεκτροδίων (ΣΗ) στα άκρα της διασύνδεσης (Αττική και Κρήτη). Ο πρώτος θα εγκατασταθεί στην βραχονησίδα Σταχτορρόης (18 km από την Πάχη Μεγάρων) και θα συνδεθεί με τον ΣΜ Κουμουνδούρου. Ο δεύτερος θα εγκατασταθεί στην περιοχή της Κορακιάς του δήμου Μαλεβιζίου στο Ηράκλειο Κρήτης και θα συνδεθεί με τον ΣΜ Δαμάστας. Και οι δύο ΣΗ θα είναι αντιστρέψιμου τύπου (reversible type). Το υλικό των ηλεκτροδίων θα είναι γραφίτης ή κράμα σιδήρου, πυριτίου και χρωμίου (High Silicon chromium Iron).

Ο ΣΗ αποτελεί μια κατασκευή με κύριο στοιχείο τα ηλεκτρόδια DC, μέσω των οποίων γίνεται η συλλογή και διάχυση των ηλεκτρικών ρευμάτων σφάλματος στη θάλασσα. Το πλεονέκτημα αυτής της διάταξης είναι ότι στην περίπτωση που αποσυνδεθεί ένας πόλος του συστήματος HVDC (λόγω βλάβης ή συντήρησης) ο δεύτερος πόλος εξακολουθεί να λειτουργεί χρησιμοποιώντας πλέον τη θάλασσα ως επιστροφή.

Οι ΣΗ προβλέπεται να είναι τύπου λιμνοθάλασσας (Shoreline Pond Electrodes) και θα λειτουργούν με ρεύμα χαμηλής έντασης (ασύμμετρο ρεύμα) υπό κανονικές συνθήκες της τάξεως των 11 A – 25 A. Η λιμνοθάλασσα κάθε Σταθμού Ηλεκτροδίων θα δημιουργηθεί με την απομόνωση μιας μικρής θαλάσσιας περιοχής κοντά στην ακτογραμμή μέσω ενός διαπερατού κυματοθραύστη με διαστάσεις 80 m μήκος και 4 m πλάτος. Ο κυματοθραύστης θα είναι διαπερατός ώστε να επιτρέπει τη συνεχή ανανέωση και ανάμιξη των υδάτων της λίμνης και παράλληλα να αποκλείει την πρόσβαση της πανίδας. Η επικοινωνία αυτή της λίμνης με τη θάλασσα είναι απαραίτητη για τη διατήρηση της αλατότητας και του pH των υδάτων της, ενώ παράλληλα μειώνει τη θερμοκρασία και προστατεύει την εγκατάσταση από τα κύματα. (Tsekouras et al., 2022) (Eco Consultants S.A, 2018) (GENERAL GUIDELINES FOR HVDC ELECTRODE DESIGN, 2019)

Όπως ήδη αναφέρθηκε, το βασικό στοιχείο των ΣΗ είναι το ηλεκτρόδιο (καλώδιο) συνεχούς ρεύματος. Στην περίπτωση του ΣΗ Σταχτορρόης το καλώδιο είναι υποθαλάσσιο μήκους 18 km, ενώ από την άλλη ο ΣΗ Κορακιάς συνδέεται με τον ΣΜ Δαμάστας μέσω

ενός εναέριου καλωδίου (OHL) μέσης τάσης μήκους 7.3 km. Το υποθαλάσσιο καλώδιο εικάζεται ότι είναι κατασκευασμένο με τον ίδιο τρόπο με το αντίστοιχο καλώδιο HVDC 500 kV. Γιαυτό το λόγο η ανάλυση και οι επιπτώσεις του στο περιβάλλον έχουν υπολογιστεί μαζί με τις επιπτώσεις του μεγάλου υποθαλάσσιου καλωδίου. Για την καταγραφή του OHL χρησιμοποιείται ένα αντίστοιχο εναέριο καλώδιο διπλού κυκλώματος 400/150 kV. Στην ανάλυση συμπεριλαμβάνονται τα υλικά από τα παρακάτω στοιχεία ως προς την φάση κατασκευής και της λειτουργίας τους και τις διαδικασίες μεταφοράς τους. (Eco Consultants S.A, 2018)

1. Βάση
2. Μεταλλικός πύργος
3. Αγωγός 400 και 150 kV
4. Μονωτές

Τέλος υπολογίζονται και τα υλικά για την εγκατάσταση του εκάστοτε ΣΗ λαμβάνοντας υπόψη εκείνα που χρειάζονται για την κατασκευή ενός μεμονωμένου κτιριακού χώρου από έναν AIS υποσταθμό 132 kV. (Harrison et al., 2010)

### 3.3.4 Σταθμοί Μετατροπής

Ο ΣΜ στο σύστημα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας συμπεριφέρεται ως ενεργειακός κόμβος μετατροπής του εναλλασσόμενου ρεύματος (AC) σε συνεχές (DC) και αντίστροφα. Παράλληλα προσαρμόζει την διακινούμενη υψηλή τάση του συνεχούς ρεύματος με αποτέλεσμα να κατοχυρώνει την τροφοδοσία και την ευστάθεια του συστήματος.

Η καλωδιακή σύνδεση Κρήτης-Αττικής απαιτεί την κατασκευή δύο Σταθμών Μετατροπής HVDC AC/DC αξιοποιώντας τη τεχνολογία Voltage Source Converter (VSC) στα άκρα της διασύνδεσης. Ο πρώτος θα εγκατασταθεί στην Αττική, στην περιοχή Κουμουνδούρου και ο δεύτερος στην Κρήτη στην περιοχή της Δαμάστας.

Η τεχνολογία VSC έχει τη δυνατότητα να ελέγχει δυναμικά την δύναμη αντίδρασης από το εναλλασσόμενο (AC) δίκτυο με αποτέλεσμα να ομαλοποιεί την σύνδεση με το συνεχές μέρος του δικτύου. Οι μετατροπείς VSC, μπορούν να σχηματίσουν ένα δικό τους κύμα εναλλασσόμενης τάσης και ουσιαστικά να λειτουργούν ως πηγή τάσης. Έτσι, δίνεται ευελιξία στο σύστημα ως προς την θέση τοποθέτησης των μετατροπέων και καθιστά ιδανική την χρήση τους σε παραθαλάσσιες εγκαταστάσεις. (Van Hertem & Ghandhari, 2010)

Οι ΣΜ του παρόντος έργου θα είναι διπολικού σχεδιασμού συνολικής ισχύος 1 GW ( 2x500 MW) με αντίστροφη λειτουργία και συμμετρική διπολική λειτουργία. Ο βασικός εξοπλισμός του ΣΜ περιλαμβάνει μετατροπείς, οι οποίοι θα συνδέονται στο δίκτυο μέσω έξι μοναφασικών μετασχηματιστών, υπαίθριες εγκαταστάσεις με διακόπτες ισχύος (Switchyards), συγκρότημα ψύξης και ένα κτίριο ελέγχου.

Για την καταγραφή των δεδομένων έχει χρησιμοποιηθεί ένας μετασχηματιστής 315kVA, ένας αποζεύκτης τύπου SDB εύρους 123–420 kV και δεδομένα από έναν υποσταθμό AIS 275/400kV για την εγκατάσταση του κτιρίου και για τις βασικές μηχανικές ενέργειες στο χώρο. Τα παραπάνω δεδομένα αναλύονται στην φάση κατασκευής και χρήσης τους. (ABB, 2011a) (ABB, 2002a) (Harrison et al., 2010) (Eco Consultants S.A, 2018)

### 3.3.5 Υπόγεια καλώδια

Για την σύνδεση των υποθαλάσσιων καλωδίων με τον ΣΜ Κουμουνδούρου (ΣΜΚ) στην Αττική και τον ΣΜ Δαμάστας (ΣΜΔ) στην περιοχή του Ηρακλείου, καθίσταται απαραίτητη η κατασκευή υπόγειας καλωδιακής γραμμής μεταφοράς (UGC) υπερυψηλής τάσης συνεχούς ρεύματος 500 kV. Στην Αττική αυτή η υπόγεια γραμμή ρεύματος μήκους 32 km θα αναχωρεί από τον ΣΜΚ και θα καταλήγει στο σημείο προσαιγιάλωσης της υποθαλάσσιας γραμμής HVDC 500 kV στην Πάχη Μεγάρων. Η θαλάσσια διαδρομή συνεχίζεται μέχρι το σημείο προσαιγιάλωσης Κορακιάς. Εκεί ένα αντίστοιχο ΥΚ μήκους 330m θα ολοκληρώσει την σύνδεση με τον ΣΜΔ.

Για την αποτύπωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων του υπόγειου καλωδίου πάρθηκαν δεδομένα για την καταγραφή από ένα ΥΚ 11 kV διαμέτρου 185 mm<sup>2</sup>. Συμπεριλήφθηκαν τα υλικά κατασκευής, η μεταφορά τους καθώς και ανάγκες για επιδιορθώσεις. (Jones & McManus, 2010) (Eco Consultants S.A, 2018)

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

### Αποτελέσματα και Συμπεράσματα

#### 4.1 Ερμηνεία των αποτελεσμάτων

Ο κύκλος ζωής του έργου είναι άμεσα συνδεδεμένος με έναν μεγάλο αριθμό εκπομπών λόγω κατασκευής-χρήσης υλικών και εξορύξεων πρώτων υλών που μπορεί να διαφέρουν σημαντικά ως προς την περιβαλλοντική τους σχέση. Η αξιολόγηση επιπτώσεων του κύκλου ζωής (LCIA) βοηθά στην ερμηνεία των μελετών ΑΚΖ μεταφράζοντας αυτές τις εκπομπές και τις εξορύξεις σε έναν πεπερασμένο αριθμό περιβαλλοντικών επιβαρύνσεων. Αυτό επιτυγχάνεται με την δημιουργία συγκεκριμένων περιβαλλοντικών μονάδων (characterization factors). Αυτές οι περιβαλλοντικές μονάδες δείχνουν το μέγεθος των περιβαλλοντικών επιπτώσεων του έργου συνολικά αλλά και του εκάστοτε στοιχείου του.

Το σύστημα αποτελείται από πέντε ξεχωριστά κομμάτια. Αναφορικά, τα Υποθαλάσσια Καλώδια HVDC, ο σταθμός GIS, οι Σταθμοί Ηλεκτροδίων, οι Σταθμοί Μετατροπής και τα ΥΚ. Παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από το περιβάλλον του Simapro για τις κατηγορίες των επιπτώσεων που διαθέτει ο περιβαλλοντικός δείκτης Recipe 2016 Midpoint V1.03 (Recipe, 2016) αθροιστικά αλλά και ξεχωριστά για τα επιμέρους στοιχεία του έργου. Ο πίνακας 4.1 παραθέτει τις συνολικές εκπομπές του κύκλου ζωής της ηλεκτρικής διασύνδεσης Αττικής-Κρήτης στις πιο σημαντικές κατηγορίες περιβαλλοντικών επιπτώσεων που αφορούν τα οικοσυστήματα και την ανθρώπινη υγεία.

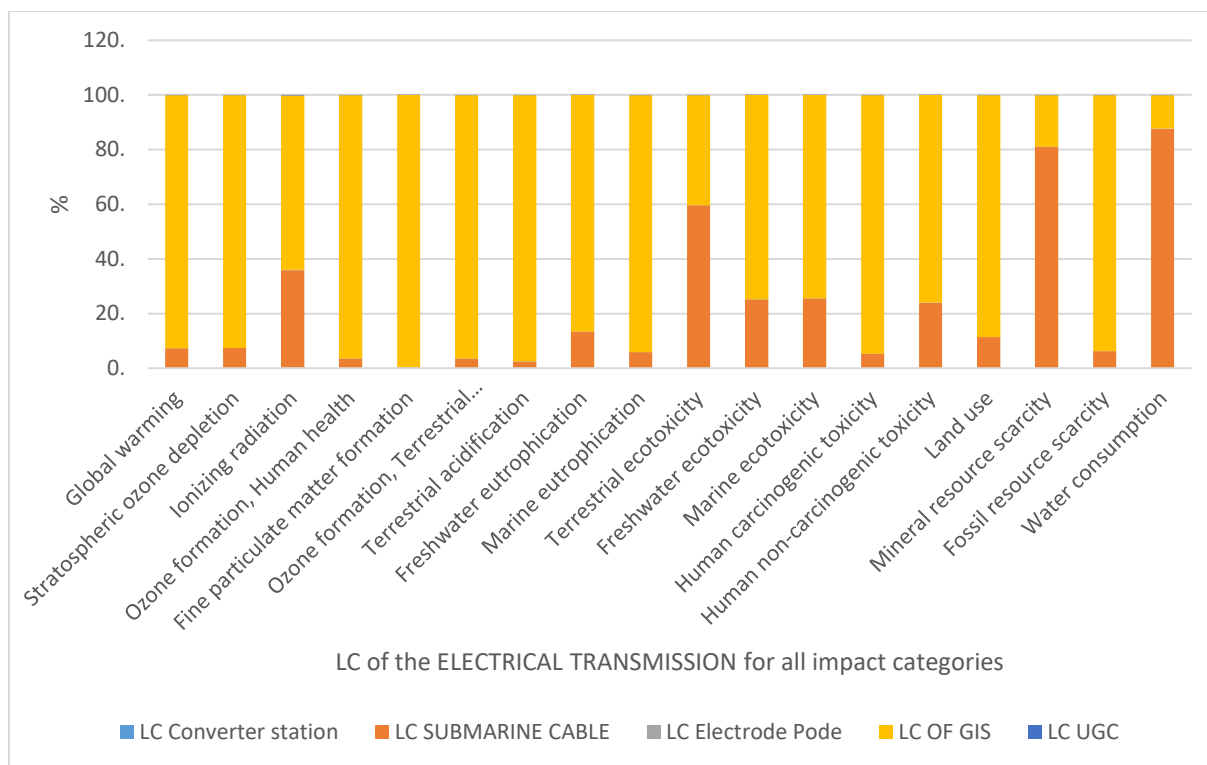
Η μεγαλύτερη συνεισφορά στις περισσότερες κατηγορίες επιπτώσεων ανήκουν στον σταθμό GIS όπως φαίνεται στο σχήμα 4.1, που παρουσιάζεται το ποσοστιαίο σύνολο των

εκπομπών των στοιχείων της ηλεκτρικής διασύνδεσης σε όλες τις διαθέσιμες περιβαλλοντικές κατηγορίες του Recipe. Ακολουθούν οι επιπτώσεις από το Υποθαλάσσιο Καλώδιο και στη συνέχεια με πολύ μικρότερο ποσοστό οι Σταθμοί Μετατροπής, οι Σταθμοί Ηλεκτροδίων και τέλος τα ΥΚ όπως φαίνεται στο συγκριτικό σχήμα 4.2. Ο σταθμός GIS υπερέχει σε όλες τις κατηγορίες εκτός αυτών της οικοτοξικότητας του εδάφους, της δαπάνης ορυκτών πόρων και της κατανάλωσης νερού, όπου εκεί προηγείται το Υποθαλάσσιο Καλώδιο. Συγκεκριμένα, οι τιμές κυμαίνονται για τον GIS από 12.3% (WC) έως 99.6% (PMF), για το Υποθαλάσσιο Καλώδιο από 0.432% (PMF) έως 87.7% (WC), ενώ για τους Σταθμούς Μετατροπής, τους Σταθμούς Ηλεκτροδίων και τα ΥΚ τα ποσοστά βρίσκονται κάτω από το 1% σε όλες τις κατηγορίες.

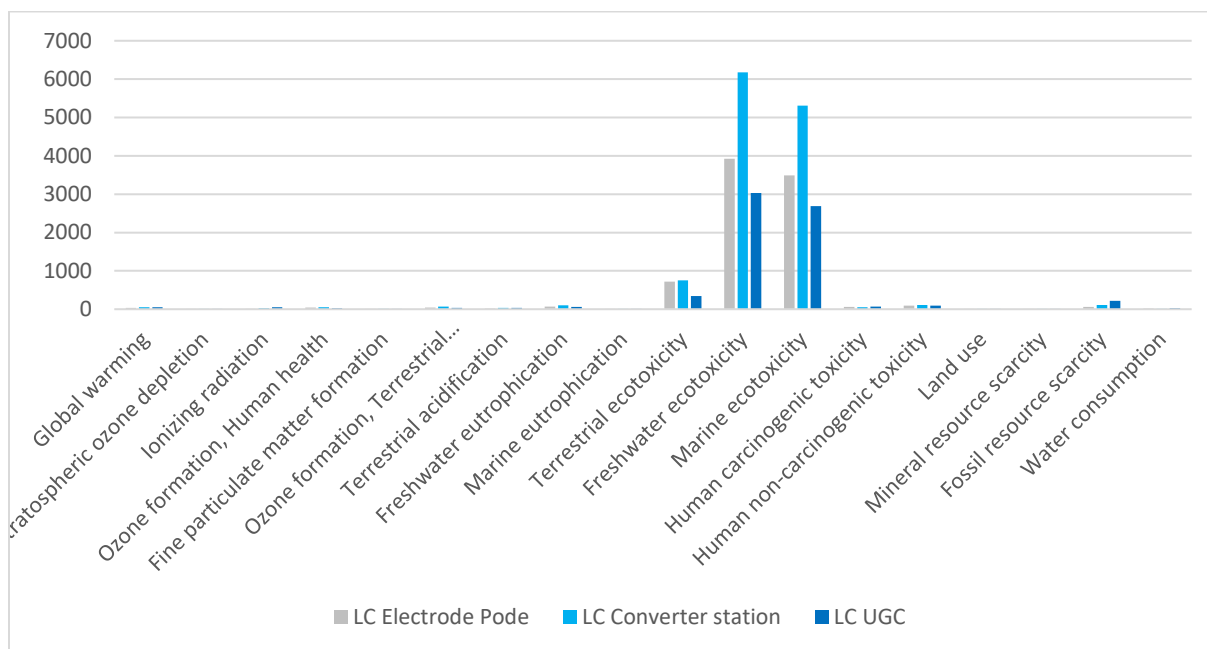
Αυτή η εμφανής υπεροχή του GIS είναι δικαιολογημένη. Αυτό συμβαίνει διότι στον σταθμό GIS έχει συμπεριληφθεί η αντιστάθμιση των απωλειών ενέργειας σε αντίθεση με τα υπόλοιπα στοιχεία του έργου, όπως γίνεται αντιληπτό από το σχήμα 4.3, όπου παρουσιάζονται οι πιο ρυπογόνες διαδικασίες του έργου στις βασικές κατηγορίες επιπτώσεων. Η κυριαρχία της χρήσης ηλεκτρικής ενέργειας από την εξόρυξη άνθρακα - που χρειάστηκε ο GIS για την αντιστάθμιση των απωλειών ενέργειας και την κατασκευή του- είναι εμφανής και κυμαίνεται από 81% έως 99%. Από αυτήν το 60%-70% οφείλεται στις απώλειες ενώ μόνο το 20-30% οφείλεται στην κατασκευή. Ακολουθεί η παραγωγή χαλκού για την κατασκευή του Υποθαλάσσιου Καλωδίου με τιμή μεταξύ 0,29% (PMF) και 12,92% (FW-E). Η ηλεκτρική ενέργεια παραγόμενη από πετρέλαιο κατέχει την τρίτη θέση, μια ακόμη διαδικασία του GIS για τις απώλειες ενέργειας και για την κατασκευή του σταθμού. Η τιμή της αλλάζει ανάλογα την κατηγορία και κυμαίνεται από 0.2% (PMF) έως 7.1% (GWP). Έπειτα έρχεται το γαλβανισμένο ατσάλι, αναγκαίο για την κατασκευή του Υποθαλάσσιου Καλωδίου, με ποσοστά που κυμαίνονται από 0.06% (PMF) έως 4% (GWP). Τέλος, για το σύνολο των υπόλοιπων διαδικασιών, καθώς τα ποσοστά βρίσκονται στο 1% περίπου, δεν κρίνεται αναγκαίο να γίνει ξεχωριστή αναφορά.

<b>ΒΑΣΙΚΕΣ ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΕΠΙΠΤΩΣΕΩΝ</b>	<b>ΜΟΝΑΔΑ</b>	<b>ΣΥΝΟΛΟ</b>
Φαινόμενο του θερμοκηπίου (Global warming Potential)	kg CO <sub>2</sub> Eq	1.64E+09 ή 1.64 Mt
Σχηματισμός όζοντος-Ανθρώπινη υγεία (Ozone formation-Human health)	kg NO <sub>x</sub> Eq	5.82E+06 ή 5.82 kt
Σχηματισμός όζοντος-Χερσαία οικοσυστήματα (Ozone formation-Terrestrial ecosystems)	kg NO <sub>x</sub> Eq	5.85E+06 ή 5.85 kt
Ευτροφισμός γλυκού νερού (Freshwater eutrophication)	kg P Eq	9.45E+05 ή 945 t
Θαλάσσιος ευτροφισμός (Marine eutrophication)	kg N Eq	5.39E+04 ή 53.9 t
Οξίνιση του εδάφους (Terrestrial acidification)	kg SO <sub>2</sub> Eq	1.77E+07 ή 17.7 kt
Συσσώρευση σωματιδίων στην ατμόσφαιρά (Particulate matter formation)	kg PM <sub>2.5</sub> Eq	1.11E+07 ή 11.1 kt

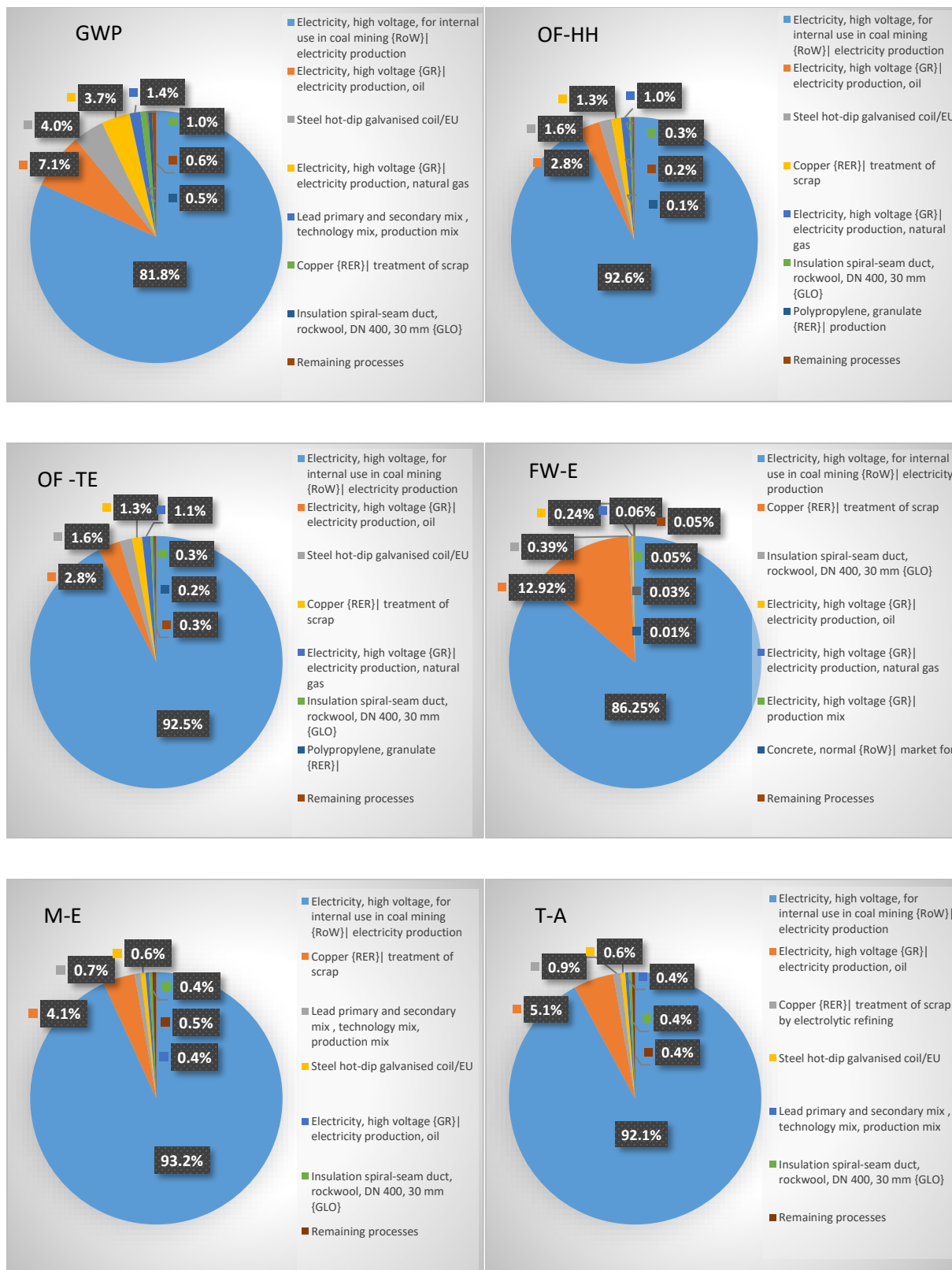
**Πίνακας 4.1 :** Συνολικές εκπομπές από κάθε βασική κατηγορία

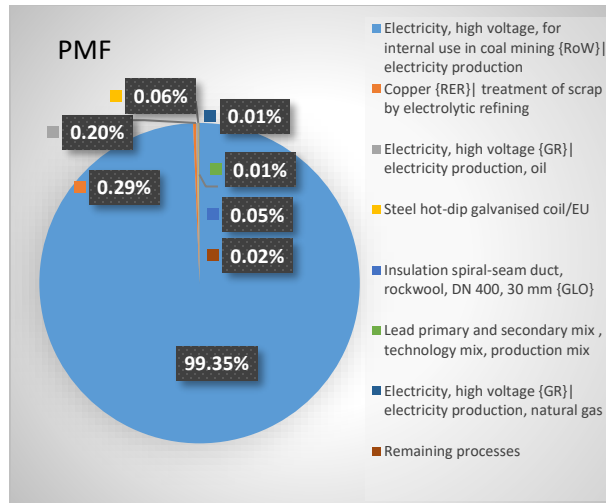


**Σχήμα 4.1 :** Συνολικές εκπομπές των στοιχείων της ηλεκτρικής διασύνδεσης σε όλες τις περιβαλλοντικές κατηγορίες επιπτώσεων



**Σχήμα 4.2 :** Σύγκριση Σταθμών Ηλεκτροδίων, Σταθμών Μετατροπής και Υπόγειων Καλωδίων ως προς τη συνεισφορά τους στις συνολικές επιπτώσεις





**Σχήμα 4.3 :** Μερίδιο εκπομπών από τις ρυπογόνες διαδικασίες στις βασικές κατηγορίες επιπτώσεων

## 4.2 Συμπεράσματα

Ως αποτέλεσμα της συνεχόμενης ανάγκης για ηλεκτρική ενέργεια, μείωση των περιβαλλοντικών ρύπων αλλά και την απεξάρτηση από τους Ρωσικούς ορυκτούς πόρους, η δημιουργία νέων ηλεκτρικών διασυνδέσεων στην Ευρώπη και κατ' επέκταση στην Ελλάδα καθίσταται κρίσιμη και αναγκαία.

Αυτή η έρευνα παρουσιάζει τις περιβαλλοντικές επιβαρύνσεις από την ηλεκτρική διασύνδεση Κρήτης-Αττικής με την βοήθεια της μεθόδου της AKZ σε δύο φάσεις, κατασκευής και χρήσης του έργου. Το συνολικό περιβαλλοντικό αποτύπωμα από το Υποθαλάσσιο Καλώδιο υπερυψηλής τάσης μήκους 334 km, από την δημιουργία ενός σταθμού GIS, δύο Σταθμών Μετατροπής, δύο Σταθμών Ηλεκτροδίων αλλά και δύο Υπόγειων Καλωδίων υπολογίστηκε στα 1.64 Mt CO<sub>2</sub> Eq.

Το μεγαλύτερο μέρος των επιπτώσεων ανήκει στον σταθμό GIS εκπέμποντας 1.52 Mt CO<sub>2</sub> Eq με πιο ρυπογόνο διαδικασία την παραγωγή ενέργειας από άνθρακα για την αντιστάθμιση των απωλειών ενέργειας στην φάση χρήσης του σταθμού. Έπειτα, έρχεται το Υποθαλάσσιο Καλώδιο με 118 kt CO<sub>2</sub> Eq, με την επεξεργασία γαλβανισμένου ατσάλιού για τη προστασία του αγωγού από τη διάβρωση στην φάση κατασκευής του, να είναι η

πιο επιβλαβής διαδικασία για το περιβάλλον. Ακολουθούν, οι Σταθμοί Μετατροπής με 563 t CO<sub>2</sub> Eq και την κατασκευή τσιμεντένιων block για τις μηχανικές ενέργειες στο χώρο, τα ΥΚ με 550 t CO<sub>2</sub> Eq και την εξόρυξη αλουμινίου και τέλος οι Σταθμοί Ηλεκτροδίων με 362 t CO<sub>2</sub> Eq και την χρήση τσιμέντου για τις βάσεις του εναέριου καλωδίου.

Αξίζει να αναφερθεί ότι με την παροχή των κατάλληλων δεδομένων, η παρούσα μελέτη θα ήταν πιο ακριβής και ρεαλιστική, ,ομως παρόλα αυτά είναι μία αρκετά καλή προσέγγιση της πραγματικότητας, στο βαθμό που ήταν δυνατό. Έτσι συνίσταται μελλοντικά να γίνει μια αναπροσαρμογή της μελέτης με τα πραγματικά στοιχεία απο τον ΑΔΜΗΕ για όλες τις διαδικασίες κατασκευής χρήσης μεταφοράς και ανακύκλωσης του έργου. Σύμφωνα με την παρούσα έρευνα αλλά και με την ανασκόπηση και σύγκριση 16 ερευνών του (Gargiulo et al., 2017) οι απώλειες ενέργειας αποδείχθηκαν καίριας σημασίας. Είναι υπεύθυνες, σε σχέση πάντα με το ενεργειακό μείγμα της εκάστοτε χώρας, για το 60-80% των περιβαλλοντικών εκπομπών μιας διαδικασίας. Επομένως με τη συμπερίληψή τους, το αποτέλεσμα θα ήταν διαφορετικό. Αναγκαία για την παραγωγή έγκυρου αποτελέσματος κρίθηκε και η ακριβής καταγραφή των περιβαλλοντικών επιπτώσεων σε όλα τα στάδια εφόσον αυτό είναι δυνατό. Από τα υλικά κατασκευής και την προέλευση τους, την μεταφορά, μέχρι και την αποκομιδή τους. Έτσι, εκτιμάται ότι η σειρά συνεισφοράς θα άλλαζε με το Υποθαλάσσιο Καλώδιο να κυριαρχεί, ο GIS να ακολουθεί και τα υπόλοιπα στοιχεία να καταλαμβάνουν ένα μεγαλύτερο ποσοστό στα αποτελέσματα.

Εν κατακλείδι, για να αποφανθεί αν συμφέρει περιβαλλοντικά ή όχι η δημιουργία της συγκεκριμένης ηλεκτρικής διασύνδεσης πρέπει να γίνει σύγκριση με τον πρωτύπο ηλεκτροδότησης της Κρήτης μέσω των τοπικών πετρελαϊκών σταθμών παραγωγής ενέργειας. Η Κρήτη πριν την ολοκλήρωση της διασύνδεσης της με την Πελοπόννησο τον Μάιο του 21 (ΑΔΜΗΕ, 2021) άνηκε στα Μη Διασυνδεδεμένα Νησιά (ΜΔΝ) δηλαδή στα νησιά της Ελληνικής Επικράτειας των οποίων το δίκτυο διανομής ηλεκτρικής ενέργειας δεν συνδέεται με το σύστημα μεταφοράς ή το ηπειρωτικό δίκτυο και η ετήσια ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας του νησιού είναι ορισμένες TWh (ΠΑΕ, 2019). Σύμφωνα με τον (Orfanos et al., 2019) η ετήσια παραγωγή ενέργειας για το 2016 του ΜΔΝ είναι 4,628

TWh και αντιστοιχεί σε 4.1 Mt CO<sub>2</sub> Eq. Το μεγαλύτερο ΜΔΝ είναι η Κρήτη και υποθετούμε ότι η ζήτηση της προσεγγίζει τις 2 TWh. Άρα είναι ασφαλές να υπολογιστεί ότι ο αριθμός των ετήσιων εκπομπών της προσεγγίζει τα 1.7718 Mt CO<sub>2</sub> Eq. Η ανάλυση όμως γίνεται για 40 έτη και έτσι οι εκπομπές από τους τοπικούς πετρελαϊκούς σταθμούς φτάνουν τις 70.873 Mt CO<sub>2</sub> Eq (40\*1.7718), ένας αριθμός αρκετά μεγαλύτερος από τον 1.64 Mt CO<sub>2</sub> Eq ακόμα και όταν προστεθούν σε αυτόν οι απώλειες ενέργειας που δεν έχουν συμπεριληφθεί. Γίνεται λοιπόν αντιληπτό ότι το έργο της ηλεκτρικής διασύνδεσης Κρήτης Αττικής είναι τελικά ωφέλιμο ή λιγότερο επιβλαβές για το περιβάλλον καθώς από τους τοπικούς σταθμούς παραγωγής προκύπτουν πολλαπλάσια μεγέθη εκπομπών στην ατμόσφαιρα.

Ανάμεσα στα οφέλη της ηλεκτρικής διασύνδεσης της Κρήτης είναι και το γεγονός ότι θα επιτρέψει την περαιτέρω διείσδυση των ΑΠΕ στο ενεργειακό μείγμα της χώρας. Το νησί έχει αξιοσημείωτο δυναμικό ΑΠΕ (ηλιακό, αιολικό δυναμικό, βιομάζα, κλπ) με αποτέλεσμα ο βαθμός εκμετάλλευσης και διείσδυσης του, έχει την δυνατότητα να αυξηθεί περαιτέρω, κυρίως μέσω της δεύτερης και μεγαλύτερης διασύνδεσης αλλά και σε μικρότερο βαθμό μέσω της πρώτης AC διασύνδεσης, λόγω περιορισμένης μεταφορικής ικανότητας.

Σύμφωνα με μελέτη του ΕΜΠ το πλήρως διασυνδεδεμένο σύστημα της Κρήτης διαθέτει υψηλά περιθώρια αποδοχής ΑΠΕ. Συγκεκριμένα η συνολικά εγκατεστημένη ισχύς ΑΠΕ στο νησί μπορεί να φτάσει τα 2400 MW από αιολικά πάρκα και Φ/Β, ενώ η μέγιστη εξαγωγική ικανότητα των δύο διασυνδέσεων προσεγγίζει τα 800 MW. Έτσι αίρεται ο κορεσμός των ΑΠΕ που είχε το δίκτυο της Κρήτης, σηματοδοτώντας τόσο μεγάλες νέες επενδύσεις όσο και μεγαλύτερη συμμετοχή πράσινης ενέργειας στο ενεργειακό μείγμα της Ελλάδας που προβλέπεται από το ΕΣΕΚ. (Παπαθανασίου Σταύρος, 2020)

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- ABB. (2002a). *Double Break Disconnecter type SDB range 123 - 420 kV*. Ανάκτηση από [https://library.e.abb.com/public/c3bea0e7ddc5931ac1256cfa004c5a90/EPD\\_SDB\\_2002\\_eng.pdf](https://library.e.abb.com/public/c3bea0e7ddc5931ac1256cfa004c5a90/EPD_SDB_2002_eng.pdf)
- ABB. (2011a). *Distribution transformers*. Ανάκτηση από <https://library.e.abb.com/public/4dab3195c6221de4c1256d630041447f/EPDdtr2.pdf>
- Ariadne. (2021). *ΑΔΜΗΕ*. Ανάκτηση από Ariadne interconnection: <https://www.ariadne-interconnection.gr/>
- Birkeland, C. (2011). *Enviromental implications of power transmission for large-scale deployment of offshore wind power in the North sea : A life cycle assessment*. NTNU. Ανάκτηση από [https://ntnuopen.ntnu.no/ntnu-xmlui/bitstream/handle/11250/257062/440527\\_FULLTEXT01.pdf?sequence=1](https://ntnuopen.ntnu.no/ntnu-xmlui/bitstream/handle/11250/257062/440527_FULLTEXT01.pdf?sequence=1)
- Birol, D. F. (2021, November 04). *COP26 climate pledges could help limit global warming to 1.8 °C, but implementing them will be the key*. Ανάκτηση από IEA: <https://www.iea.org/commentaries/cop26-climate-pledges-could-help-limit-global-warming-to-1-8-c-but-implementing-them-will-be-the-key>
- Comission, E. (2021). *European Comission*. Ανάκτηση από Delivering the European Green Deal: [https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal/delivering-european-green-deal\\_en](https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal/delivering-european-green-deal_en)
- Eco Consultants S.A, B. -Z. (2018). *Ariadne interconnection, Μελέτη Περιβαλλοντικών επιπτώσεων, Διασύνδεση του Συστήματος Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας της νήσου Κρήτης με το Ελληνικό Σύστημα Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας μέσω Σ.Ρ. – Αττική – Κρήτη ( Κορακιά )*. Μελέτη Περιβαλλοντικών επιπτώσεων. Ανάκτηση από <https://www.eib.org/attachments/registers/130842961.pdf>
- Ellie Williams, S. E. (2022, July 14). *Pre-Sustainability*. Ανάκτηση από Finding your way in multifunctional processes and recycling: <https://pre-sustainability.com/articles/finding-your-way-in-allocation-methods-multifunctional-processes-recycling/>
- ENS. (2022). *European Nuclear Society*. Ανάκτηση από Μετατροπή μονάδων ορυκτών καυσίμων σε ενέργεια: <https://www.euronuclear.org/glossary/coal-equivalent/>
- Enviroment, N. I. (2016). *Recipe*. Ανάκτηση από <https://www.rivm.nl/bibliotheek/rapporten/2016-0104.pdf>

- Group, C. W. (2019). *GENERAL GUIDELINES FOR HVDC ELECTRODE DESIGN*.  
Ανάκτηση από <https://www.cigre.cl/wp-content/uploads/2017/02/Brochure-Cigre-FRancia-HVDC-Electrodes-675.pdf>
- IEA. (2021). *IEA*. Ανάκτηση από Fuels and Technologies: <https://www.iea.org/fuels-and-technologies/electricity>
- IEA. (2021). *IEA Greece*. Ανάκτηση από Countries: <https://www.iea.org/countries/greece>
- ISO. (14040-44). *ISO*. Ανάκτηση από LCA Principles and Framework: [https://www.iso.org/obp/ui/?fbclid=IwAR3LFhd7t4UTZogjLSs20uB3lZ1XQOSjt5fXW5HX2AMO-gI\\_ISMi4YW1TNA#iso:std:iso:14040:ed-2:v1:en](https://www.iso.org/obp/ui/?fbclid=IwAR3LFhd7t4UTZogjLSs20uB3lZ1XQOSjt5fXW5HX2AMO-gI_ISMi4YW1TNA#iso:std:iso:14040:ed-2:v1:en)
- ISO, E. (2006). *Environmental management- Life Cycle Assessment - Principles and Framework*. Ανάκτηση από <http://www.cscses.com/uploads/2016328/20160328110518251825.pdf>
- Jan-Erik Skog, K. K. (2007). *THE NORNED HVDC CABLE LINK A POWER TRANSMISSION HIGHWAY BETWEEN NORWAY AND THE NETHERLANDS*. ABB Power Technologies. Ανάκτηση από <https://library.e.abb.com/public/f3a6c2afe601d185c125718e002e3823/THE%20NORNED%20HVDC%20CABLE%20LINK.pdf>
- Setac. (2018). *Science LCA*. Ανάκτηση από Life Cycle Assessment: <https://www.setac.org/page/sciencelca>
- Simapro. (2022). *Simapro*. Ανάκτηση από <https://simapro.com/>
- TYNDP. (2019). *TYNDP.ENTSO-E*. Ανάκτηση από About the TYNDP: <https://tyndp.entsoe.eu/about-the-tyndp/>
- TYNDP. (2020). *ENTSO-E*. Ανάκτηση από Life Cycle of a Transmission Project: <https://tyndp.entsoe.eu/life-cycle/>
- UNFCCC. (2020). *United Nations Climate Change*. Ανάκτηση από The Paris Agreement: <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement/the-paris-agreement>
- WEO. (2021). *World Energy Outlook*. IEA. Ανάκτηση από <https://www.world-nuclear.org/information-library/energy-and-the-environment/carbon-dioxide-emissions-from-electricity.aspx>
- WNA. (2022, October). *World Nuclear Association*. Ανάκτηση από Carbon Dioxide Emissions From Electricity: <https://www.world-nuclear.org/information-library/energy-and-the-environment/carbon-dioxide-emissions-from-electricity.aspx>

- ABB. (2004). *Live Tank Circuit Breaker, Type LTB 145D*. Ανάκτηση από [https://library.e.abb.com/public/26be1bf0e5605ca1c12571550038d08b/EPD%20Live%20Tank%20Circuit%20Breaker%20LTB%20145D\\_en.pdf](https://library.e.abb.com/public/26be1bf0e5605ca1c12571550038d08b/EPD%20Live%20Tank%20Circuit%20Breaker%20LTB%20145D_en.pdf)
- ABB. (2007b). *GIS Type ELK-14 for 300 kV*. Ανάκτηση από <https://library.e.abb.com/public/2f13e1b6c5196727c125716800439ef7/EPD%20ELK-14%20300kV%20AC%20-%20English.pdf>
- ΑΔΜΗΕ. (10.12.2022). *Τεχνική Περιγραφή του έργου*. Ανάκτηση από Περιβαλλοντική Μελέτη Κρήτη, Κορακιά: [https://www.admie.gr/sites/default/files/inlinefiles/groups/ADMIE\\_DNEM/Diakirixeis/DNEM70006\\_PERIBALLONTIKI\\_MELETI\\_KRITI\\_\\_Korakia\\_/8...\\_\\_TECHNIKI\\_PERIGRAFI\\_TOY\\_ERGOY\\_-\\_70006.pdf](https://www.admie.gr/sites/default/files/inlinefiles/groups/ADMIE_DNEM/Diakirixeis/DNEM70006_PERIBALLONTIKI_MELETI_KRITI__Korakia_/8...__TECHNIKI_PERIGRAFI_TOY_ERGOY_-_70006.pdf)
- ΑΔΜΗΕ. (2021). *ΑΔΜΗΕ*. Ανάκτηση από Διασύνδεση της Κρήτης με την Αττική: <https://www.admie.gr/erga/erga-diasyndeseis/diasyndesi-tis-kritis-me-tin-attiki>
- ΑΔΜΗΕ. (2021). *Διασύνδεση της Κρήτης με την Πελοπόννησο*. Ανάκτηση από <https://www.admie.gr/erga/erga-diasyndeseis/diasyndesi-tis-kritis-me-tin-peloponniso>
- Παπαθανασίου Σταύρος, Ψ. Γ. (2020). *ΠΕΡΙΘΩΡΙΟ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΙΣΧΥΟΣ ΑΠΕ ΣΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΤΗΣ ΚΡΗΤΗΣ ΜΕΤΑ ΤΗΝ ΟΛΟΚΛΗΡΩΣΗ ΤΩΝ ΕΡΓΩΝ ΔΙΑΣΥΝΔΕΣΗΣ ΜΕ ΤΟ ΕΣΜΗΕ*. ΕΜΠ. ΠΑΕ. Ανάκτηση από [https://www.rae.gr/wp-content/uploads/2022/09/%CE%9C%CE%B5%CE%BB%CE%AD%CF%84%CE%B7-%CE%95%CE%9C%CE%A0\\_%CE%95%CE%A0%CE%99%CE%A3%CE%95%CE%A5-%CE%99%CE%BF%CF%8D%CE%BD%CE%B9%CE%BF%CF%82-2020.pdf](https://www.rae.gr/wp-content/uploads/2022/09/%CE%9C%CE%B5%CE%BB%CE%AD%CF%84%CE%B7-%CE%95%CE%9C%CE%A0_%CE%95%CE%A0%CE%99%CE%A3%CE%95%CE%A5-%CE%99%CE%BF%CF%8D%CE%BD%CE%B9%CE%BF%CF%82-2020.pdf)
- ΠΑΕ. (2019). *Μη Διασυνδεδεμένα νησιά*. Ανάκτηση από <https://www.rae.gr/mi-diasynd-nisia/>
- Arvesen, A., Hauan, I. B., Bolsøy, B. M., & Hertwich, E. G. (2015). Life cycle assessment of transport of electricity via different voltage levels: A case study for Nord-Trøndelag county in Norway. *Applied Energy*, 157, 144–151. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.08.013>
- Arvesen, A., Nes, R. N., Huertas-Hernando, D., & Hertwich, E. G. (2014). Life cycle assessment of an offshore grid interconnecting wind farms and customers across

- the North Sea. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 19(4), 826–837.  
<https://doi.org/10.1007/s11367-014-0709-2>
- Gargiulo, A., Girardi, P., & Temporelli, A. (2017). LCA of electricity networks: a review. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 22(10), 1502–1513.  
<https://doi.org/10.1007/s11367-017-1279-x>
- Georgakellos, D. A. (2012). Climate change external cost appraisal of electricity generation systems from a life cycle perspective: The case of Greece. *Journal of Cleaner Production*, 32, 124–140. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.03.030>
- Harrison, G. P., Maclean, E. (Ned) J., Karamanlis, S., & Ochoa, L. F. (2010). Life cycle assessment of the transmission network in Great Britain. *Energy Policy*, 38(7), 3622–3631. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2010.02.039>
- Jones, C. I., & McManus, M. C. (2010). Life-cycle assessment of 11 kV electrical overhead lines and underground cables. *Journal of Cleaner Production*, 18(14), 1464–1477. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2010.05.008>
- Jorge, Raquel S., & Hertwich, E. G. (2013). Environmental evaluation of power transmission in Norway. *Applied Energy*, 101, 513–520.  
<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.06.004>
- Jorge, Raquel Santos, Hawkins, T. R., & Hertwich, E. G. (2012a). Life cycle assessment of electricity transmission and distribution-part 1: Power lines and cables. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 17(1), 9–15.  
<https://doi.org/10.1007/s11367-011-0335-1>
- Jorge, Raquel Santos, Hawkins, T. R., & Hertwich, E. G. (2012b). Life cycle assessment of electricity transmission and distribution-part 2: Transformers and substation equipment. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 17(2), 184–191.  
<https://doi.org/10.1007/s11367-011-0336-0>

- Kim, H., & Holme, P. (2015). Network theory integrated life cycle assessment for an electric power system. *Sustainability (Switzerland)*, 7(8), 10961–10975.  
<https://doi.org/10.3390/su70810961>
- Orfanos, N., Mitzelos, D., Sagani, A., & Dedoussis, V. (2019). Life-cycle environmental performance assessment of electricity generation and transmission systems in Greece. *Renewable Energy*, 139, 1447–1462.  
<https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.03.009>
- Roinioti, A., & Koroneos, C. (2019). Integrated life cycle sustainability assessment of the Greek interconnected electricity system. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 32(September 2018), 29–46.  
<https://doi.org/10.1016/j.seta.2019.01.003>
- Roorda. (2016). *AKZ του Ελληνικού ηλεκτρικού δικτύου*.
- Saitov, R. (2014). *Environmental Assessment of Electricity Transmission Grid Upgrades Triggered by the Increasing Utilization of Variable and Remote Renewable Energy* Rustem Saitov. October.
- Tsekouras, G. J., Kontargyri, V. T., Prousalidis, J. M., Kanellos, F. D., Tsirekis, C. D., Leontaritis, K., Alexandris, J. C., Deligianni, P. M., Kontaxis, P. A., & Moronis, A. X. (2022). Alternative Simplified Analytical Models for the Electric Field, in Shoreline Pond Electrode Preliminary Design, in the Case of HVDC Transmission Systems. *Energies*, 15(17). <https://doi.org/10.3390/en15176493>
- Valheim, T. M. (2016). *Environmental assessment of electricity transmission using input-output analysis*. June, 1–73. <http://hdl.handle.net/11250/2418199>
- Van Hertem, D., & Ghandhari, M. (2010). Multi-terminal VSC HVDC for the European supergrid: Obstacles. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(9), 3156–3163. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.07.068>

Weber, C. L., Jaramillo, P., Marriott, J., & Samaras, C. (2010). Life cycle assessment and grid electricity: What do we know and what can we know? *Environmental Science and Technology*, 44(6), 1895–1901. <https://doi.org/10.1021/es9017909>