



Ανάλυση Κύκλου Ζωής Μονάδας Παραγωγής Συνθετικού Φυσικού Αερίου

Τομέας Θερμότητας, Εργαστήριο Ατμοκινητήρων και Λεβήτων
Επιβλέπων: Δρ. Σωτήριος Καρέλλας, Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Ιούλιος 2023

SOUKOULIS DIMITRIS

SCHOOL OF MECHANICAL ENGINEERING



Life Cycle Analysis of a Synthetic Natural Gas Production Unit

Thermal Engineering Section, Laboratory of Steam Boilers and
Thermal Plants

Supervisor: Dr. Sotirios Karellas, NTUA Professor

Athens, July 2023

--- κενή σελίδα ---

Υπεύθυνη δήλωση για λογοκλοπή και για κλοπή πνευματικής ιδιοκτησίας:

Έχω διαβάσει και κατανοήσει τους κανόνες για τη λογοκλοπή και τον τρόπο σωστής αναφοράς των πηγών που περιέχονται στον οδηγό συγγραφής Διπλωματικών Εργασιών. Δηλώνω ότι, από όσα γνωρίζω, το περιεχόμενο της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας είναι προϊόν δικής μου εργασίας και υπάρχουν αναφορές σε όλες τις πηγές που χρησιμοποίησα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτή τη Διπλωματική εργασία είναι του συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών ή του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Δημήτρης Σούκουλης

Περιεχόμενα

Περιεχόμενα.....	5
Σύνοψη	7
Abstract	8
Συντομεύσεις – αρκτικόλεξα (abbreviations)	9
1. Εισαγωγή	10
1.1 Η κλιματική αλλαγή μέχρι σήμερα.....	10
1.2 Το φυσικό αέριο σήμερα.....	12
1.3 Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας	13
1.4 Αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας.....	15
2. Power-to-Gas	17
2.1 Εισαγωγή	17
2.2 Ηλεκτρόλυση	19
2.3 Power-to-Methane	20
2.3.1 Γενικά στοιχεία	20
2.4 Βιβλιογραφική ανασκόπηση	21
3. Ανάλυση Κύκλου Ζωής	25
3.1 Σύντομη ιστορική αναδρομή.....	25
3.2 Γενικά στοιχεία για την AKZ.....	25
3.3 Προσδιορισμός στόχου και εύρους	27
3.4 Απογραφή κύκλου ζωής (LCI)	28
3.5 Ανάλυση περιβαλλοντικών επιπτώσεων (LCIA)	29
3.5.1 Γενικά στοιχεία	29
3.5.2 Μέθοδοι ανάλυσης και κατηγορίες επιπτώσεων	30
3.6 Ερμηνεία αποτελεσμάτων.....	32
4. Διάταξη/ Υπο Μελέτη Σύστημα και AKZ.....	33
4.1 Εισαγωγή	33
4.2 Περιγραφή διεργασίας.....	34
4.3 Στόχος μελέτης (Goal definition)	35
4.3.1 Προβλεπόμενη εφαρμογή και απευθυνόμενο κοινό	35
4.3.2 Περιορισμοί	35
4.3.3 Σκοπός εργασίας.....	35
4.4 Πεδίο εφαρμογής μελέτης	35
4.4.1 Εξεταζόμενο σύστημα προϊόντος.....	35
4.4.2 Λειτουργία συστήματος και λειτουργική μονάδα	35
4.4.3 Πλαίσιο μοντελοποίησης και διαχείριση δευτερευόντων προϊόντων	36
4.4.4 Ορισμός βασικού συστήματος και ορίων μελέτης	36
4.4.5 Κατηγορίες επιπτώσεων και μέθοδοι ανάλυσης	36
4.4.6 Εξεταζόμενα σενάρια	37
4.5 Κατάλογος απογραφής συστήματος.....	37
4.5.1 Βασικές παραδοχές	37
4.5.2 Μεταφορές.....	37
4.5.3 Φάση κατασκευής	38
4.5.4 Φάση λειτουργίας και απόρριψης.....	41
5. Αποτελέσματα	45

5.1	Αποτελέσματα βασικού συστήματος.....	45
5.2	Σύγκριση βασικού συστήματος με σύστημα αναφοράς.....	51
5.3	Σύγκριση συμβατικού σεναρίου με σύστημα προϊόντος υπό διαφορετικές πηγές ηλεκτρικής ενέργειας.....	53
5.4	Σύγκριση συστημάτων διαφορετικών μεγεθών	58
5.5	Ανάλυση ευαισθησίας.....	60
6.	Συμπεράσματα και προτάσεις.....	65
6.1	Συζήτηση αποτελεσμάτων και συμπεράσματα	65
6.2	Προτάσεις για μελλοντική έρευνα	66
	Ευρετήριο Πινάκων.....	67
	Ευρετήριο Εικόνων.....	68
	Βιβλιογραφία	70
	Παράρτημα I Πίνακες εισόδων Sima Pro.....	74
	Παράρτημα II Πίνακες χαρακτηρισμού	79

Σύνοψη

Τα τελευταία χρόνια οι μονάδες μετατροπής ηλεκτρικής ενέργειας σε καύσιμο (PtG: Power-to-Gas), έχουν προσελκύσει αρκετό ενδιαφέρον στον ενεργειακό τομέα, καθώς αποτελούν μία ελκυστική λύση για την μακροπρόθεσμη και μεγάλης κλίμακας αποθήκευση της πλεονάζουσας ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές, προσφέροντας ταυτόχρονα μία “πράσινη” και ανανεώσιμη εναλλακτική στα ορυκτά καύσιμα.

Στην παρούσα εργασία πραγματοποιήθηκε ανάλυση κύκλου ζωής μίας μονάδας παραγωγής συνθετικού φυσικού αερίου (Power-to-SNG), μέσω της καταλυτικής μεθανοποίησης διοξειδίου του άνθρακα προερχόμενου από τα καυσαέρια μίας μονάδας παραγωγής τσιμέντου και υδρογόνου από ηλεκτρόλυση τεχνολογίας PEM (Μεμβράνη ανταλλαγής πρωτονίων). Σκοπός της μελέτης ήταν ο υπολογισμός και η αξιολόγηση του συνολικού περιβαλλοντικού αποτυπώματος του συστήματος, αλλά και ο προσδιορισμός των παραγόντων εκείνων που έχουν την μεγαλύτερη συνεισφορά σε αυτό. Το εξεταζόμενο σύστημα μελετήθηκε σε μία σειρά από διαφορετικές περιπτώσεις, όπως η χρήση διαφορετικών πηγών ενέργειας για την ηλεκτρόλυση (από αιολική, ηλιακή και το δίκτυο) και η μεταβολή του μεγέθους της εγκατάστασης (20, 500 και 1300 MW), ενώ έγινε σύγκριση με το περιβαλλοντικό αποτύπωμα της συμβατικής περίπτωσης παραγωγής φυσικού αερίου. Για την ανάλυση κύκλου ζωής λήφθηκαν υπόψη όλα τα στάδια του κύκλου ζωής του συστήματος έως την έγχυση του παραγόμενου SNG στο δίκτυο φυσικού αερίου (Cradle-to-Gate LCA).

Η ανάλυση έδειξε ότι ο βασικότερος παράγοντας ως προς τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις του συστήματος ήταν η προέλευση της ηλεκτρικής ενέργειας που χρησιμοποιείται για την ηλεκτρόλυση, με την περίπτωση της αιολικής ενέργειας να έχει αρνητικές εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα ίση με $-1742 \text{ kg CO}_2\text{-eq}$ ανά τόνο παραγόμενου συνθετικού φυσικού αερίου, σημειώνοντας μείωση 270 %, σε σύγκριση με τις εκπομπές της παραγωγής φυσικού αερίου, ίσες με $990 \text{ kg CO}_2\text{-eq}$. Σημαντική ήταν και η μείωση, στην κατηγορία της έλλειψης ορυκτών πόρων, ίση με 76 %. Οι αντίστοιχες τιμές για το σενάριο χρήσης ηλιακής ενέργειας υπολογίσθηκαν ίσες με 74 % και 40 %, αλλά οι επιπτώσεις ήταν αρκετά μεγαλύτερες σε όλες τις άλλες κατηγορίες επιπτώσεων σε σχέση με το φυσικό αέριο. Το περιβαλλοντικό αποτύπωμα για την περίπτωση χρήσης ενέργειας από το δίκτυο ήταν κυρίαρχο σχεδόν σε όλες τις κατηγορίες επιπτώσεων, ενώ αναφέρεται ότι οι εκπομπές διοξειδίου ήταν 6 φορές μεγαλύτερες από το σενάριο του φυσικού αερίου. Οι συνεισφορά από τις φάσεις κατασκευής και απόρριψης του συστήματος ήταν αμελητέες σε όλες τις περιπτώσεις πλην της όξυνσης χερσαίων οικοσυστημάτων (OXO) όπου η συνεισφορά βρέθηκε ίση με 10 %. Αυτό επιβεβαιώθηκε και από την ανάλυση ευαισθησίας, όπου η μεγαλύτερη αύξηση του αποτυπώματος ήταν 3 %, για αντίστοιχη αύξηση των υλικών του ηλεκτρολύτη κατά 30 %. Ακόμα μικρότερες ήταν η μεταβολές για τις περιπτώσεις μεταβολής του συντελεστή διαθεσιμότητας και των ετών λειτουργίας της εγκατάστασης. Η αύξηση των ενεργειακών καταναλώσεων κατά 50 %, επέφερε αύξηση 200 % στην κατηγορία OXO. Τέλος η βελτίωση του βαθμού απόδοσης ηλεκτρόλυσης στα μελλοντικά σενάρια κατά 7 και 18 % συνέβαλε στην μείωση των εκπομπών CO_2 του βασικού συστήματος κατά 2 και 4 % αντίστοιχα, ενώ η μείωση για το σύστημα ηλιακής ενέργειας ήταν σημαντικά μεγαλύτερη, ίση με 68 και 147 % αντίστοιχα.

Abstract

In the last years, Power-to-Gas technologies have gained a lot of attention in the energy sector, since they offer an attractive solution to the long term and large scale storage of the energy surplus produced by renewables, while providing a “green” and renewable alternative to fossil fuels.

In the present study, a life cycle analysis of a Power-to-SNG unit was conducted. The considered unit utilizes CO₂ from a cement plant and hydrogen from a PEM electrolyzer to produce methane through the concept of catalytic methanation. The study’s goal was to evaluate the system’s environmental impacts as well as finding the parameters with the biggest environmental contribution. The considered scenarios included different energy sources for the electrolysis and different system sizes namely 20, 500 and 1300 MW. In each case comparison the results were compared with the environmental impacts of conventional natural gas production. All the phases of the system’s life cycle up to the injection of the produced SNG to the natural gas grid were considered (Cradle-to-gate LCA).

Analysis showed that the driving factor for the environmental impacts of the system was the usage of electricity by the electrolyzer, where the case of wind energy produced negative CO₂ emissions, equal to -1742 kg CO₂-eq per tonne of produced SNG, achieving an 270 % reduction compared to the natural gas production which emitted 990 kg CO₂-eq per tonne SNG. The reduction of the impact in the fossil resources scarcity of 76 %, was also important. The corresponding results were 74 % and 40 % for the case of solar energy, but the impacts on all the other categories were significantly higher than those of natural gas. The impacts for the usage of energy from the grid, were dominant for almost all impact categories, with the CO₂-equivalent emissions being 6 times higher than those of NG production. The contribution from the system’s construction phase was found negligible for all categories except terrestrial acidification (TA) where they accounted for 10 % of the total life cycle, which was also proven by the sensitivity analysis where the highest change in the contribution was 3 % for an increase in the electrolyzer’s materials of 30 %.

On the contrary the increase of total energy consumption by 50 %, led to an increase of 200 % in the TA category. Finally, improvement of the electrolyzer’s efficiency in future scenarios by 7 % in 2030 and 18 % in 2050, resulted in the reduction of the basic system CO₂ emissions by 2 and 4 % respectively, while the corresponding increase was significantly higher for the solar energy’s case and equal to 68 and 147 % respectively.

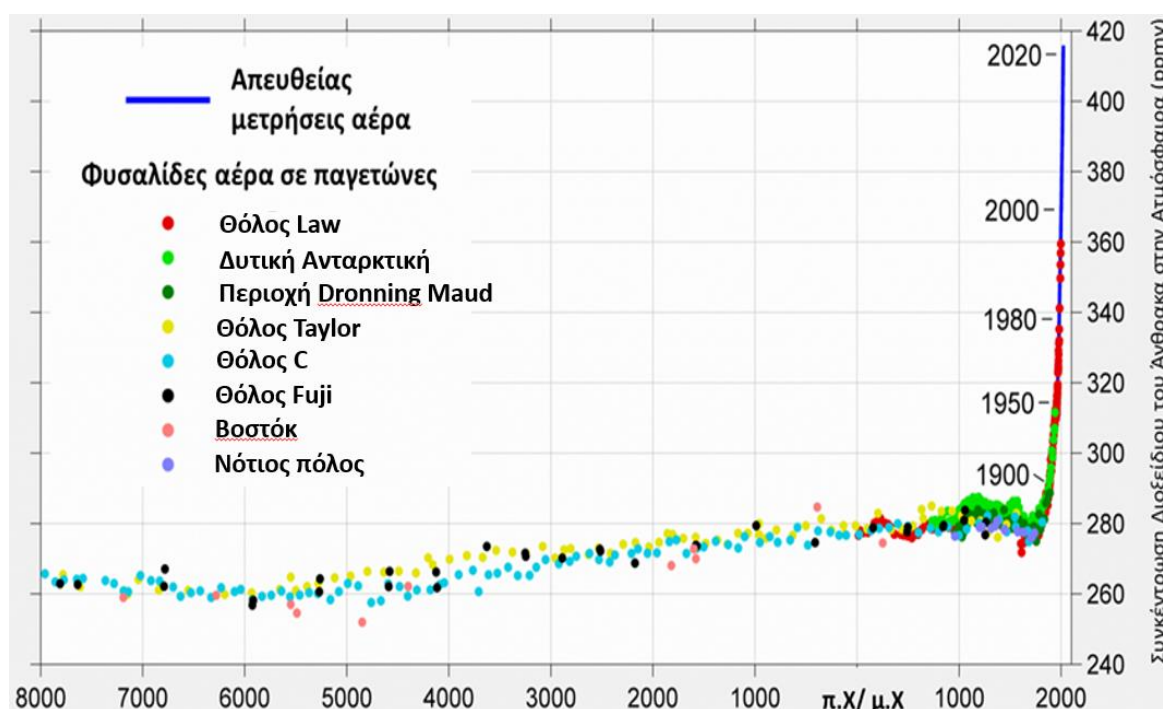
Συντομεύσεις – αρκτικόλεξα (abbreviations)

AKZ	Ανάλυση κύκλου ζωής
AXΓ	Αλλαγή χρήση Γης
OXO	Όξυνση Χερσαίων Οικοσυστημάτων
ΔΟΑ	Δημιουργία Όζοντος Τροπόσφαιρας, Ανθρώπινη Υγεία
ΣΜ	Σχηματισμός Μικροσωματιδίων
ΙΑ	Ιονίζουσα Ακτινοβολία
ΕΟ	Εξάντληση Όζοντος Στρατόσφαιρας
ΔΘ	Δυναμικό Θέρμανσης του Πλανήτη
ΚΑ	Κλιματική Αλλαγή
ΧΝ	Χρήση Νερού
ΕΟΠ	Εξάντληση Ορυκτών Πόρων
ΕΠΜ	Εξάντληση Πόρων Μεταλλευμάτων
ΧΝ	Χρήση Νερού
ΜΚΤΑ	Μη Καρκινογόνος Τοξικότητα στον Άνθρωπο
ΚΤΑ	Καρκινογόνο Τοξικότητα στον Άνθρωπο
ΘΟ	Θαλάσσια Οικοτοξικότητα
ΟΓΝ	Οικοτοξικότητα Γλυκού Νερού
ΧΟ	Χερσαία Οικοτοξικότητα
ΘΕ	Θαλάσσιος Ευτροφισμός
ΕΓΝ	Ευτροφισμός Γλυκού Νερού
CCS	Carbon capture and storage
CNG	Compressed natural gas
Daly	Disability adjusted life years
HHV	High heating value
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
LCA	Life cycle analysis
LHV	Low heating value
LNG	Liquid natural gas
MEA	Monoetholamine
NG	Natural gas
PEM	Proton exchange membrane
RNG	Renewable natural gas
SNG	Synthetic natural gas
PtG/P2G	Power-to-Gas
PtH	Power to hydrogen
PtM	Power to methane
PtSNG	Power to synthetic natural gas
UNFCC	United Nations Framework Convention on Climate Change

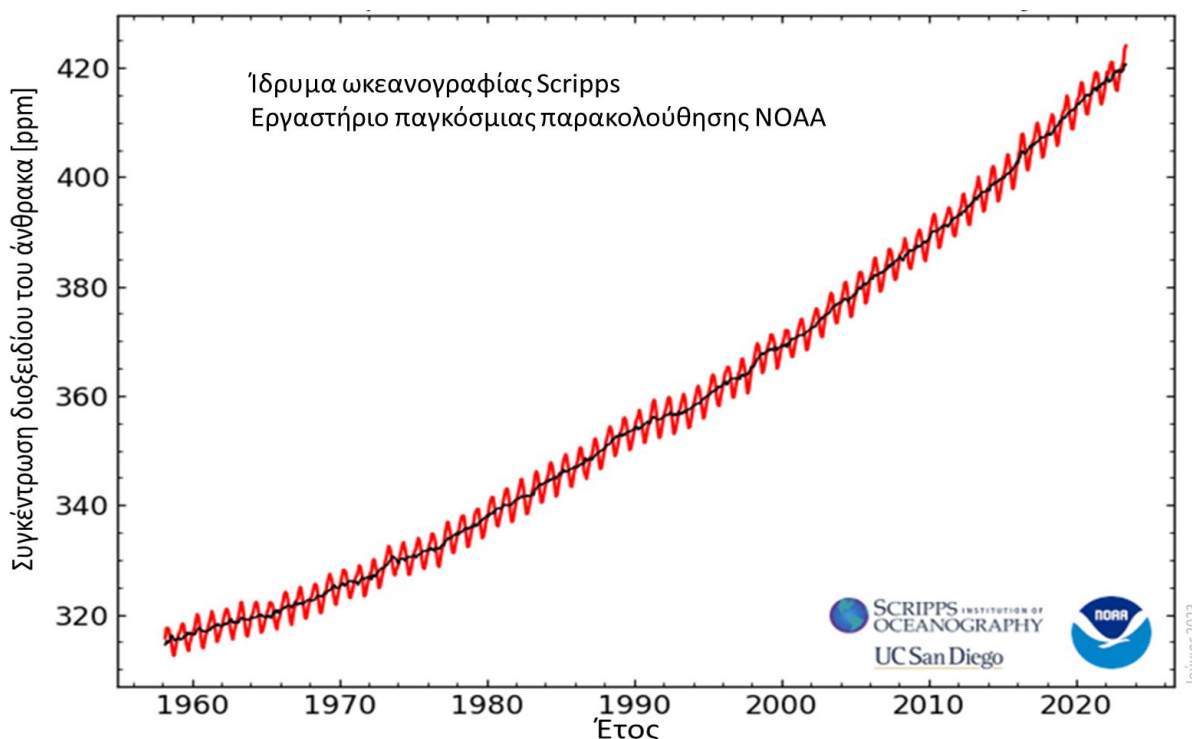
1. Εισαγωγή

1.1 Η κλιματική αλλαγή μέχρι σήμερα

Η αποκλειστική εξάρτηση του ανθρώπου από τα ορυκτά καύσιμα μετά την βιομηχανική επανάσταση και κατά συνέπεια η ραγδαία αύξηση στην εκπομπή αερίων του θερμοκηπίου, είχε ως αποτέλεσμα την ταχύτατη ενίσχυση του φαινομένου του θερμοκηπίου οδηγώντας μέσα στην δεκαετία 2010-2020 στην αύξηση της θερμοκρασίας του πλανήτη κατά 1,1 °C πάνω από τα προβιομηχανικά επίπεδα [1]. Η αύξηση αυτή της μέσης θερμοκρασίας του πλανήτη, η οποία είναι η υψηλότερη των τελευταίων 100 χιλιετιών, διαταράσσει τους φυσικούς μηχανισμούς της γης προκαλώντας απρόβλεπτα κλιματικά φαινόμενα όπως έντονη ξηρασία, εκτεταμένες πυρκαγιές, αύξηση της θαλάσσια στάθμης κ.α. [2]. Στα επόμενα δύο διαγράμματα φαίνεται χαρακτηριστικά η εκθετική αύξηση της συγκέντρωσης διοξειδίου του άνθρακα στην ατμόσφαιρα.



Εικόνα 1-1: Διαχρονική μεταβολή της συγκέντρωσης διοξειδίου του άνθρακα στην ατμόσφαιρα [2]



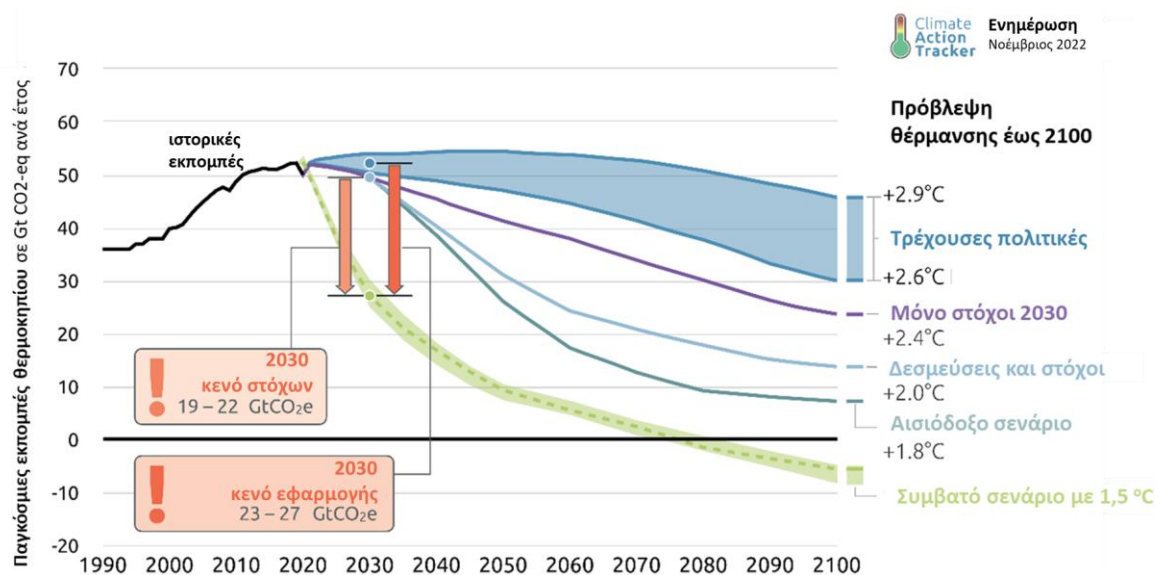
Εικόνα 1-2: Συγκέντρωση διοξειδίου του άνθρακα στο παρατηρητήριο Mauna Loa [3]

Το φαινόμενο της ανθρωπογενούς κλιματικής αλλαγής και της υπερθέρμανσης του πλανήτη, γνωστό ήδη από τα μέσα του 20 αιώνα, οδήγησε σε μία σειρά από διεθνείς προσπάθειες με στόχο δημιουργία ενός κοινώς αποδεκτού πλαισίου για την εξεύρεση λύσεων τόσο για την αποτροπή της περαιτέρω επιδείνωσης αλλά και για την αντιμετώπιση των επιπτώσεων της. Η σημαντικότερη έως σήμερα εξέλιξη προς την κατεύθυνση του περιορισμού της κλιματικής αλλαγής ήταν η υπογραφή της Συμφωνίας του Παρισιού (Paris Agreement) το 2015 [4] η οποία θέτει ως απώτερο στόχο τον περιορισμό της αύξησης της θερμοκρασίας στους 2 °C συγκριτικά με τα προβιομηχανικά επίπεδα, με προσπάθειες για σύγκλιση στον 1,5 °C. Σε αυτό το πλαίσιο η Ευρωπαϊκή Ένωση μέσω της Πράσινης Συμφωνίας (European Green Deal) [5], στοχεύει να είναι η πρώτη κλιματικά ουδέτερη ήπειρος μέχρι το 2050, θέτοντας τους παρακάτω στόχους για το 2030:

- Μείωση των εκπομπών του θερμοκηπίου κατά 55 % σε σχέση με τα επίπεδα του 1990. Σημειώνεται ότι αρχικός στόχος ήταν 40 %, ο οποίος πρόκειται να αντικατασταθεί σύμφωνα με την δέσμη *Fit for 55* [6].
- Ελάχιστη συνεισφορά ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στον ενεργειακό μίγμα 32 %.
- Αύξηση της ενεργειακής απόδοσης κατά 32,5 %.

Μέχρι σήμερα οι προσπάθειες για την αντιμετώπιση της κλιματικής αλλαγής κρίνονται ανεπαρκής καθώς η εκπομπή αερίων του θερμοκηπίου έχει συνεχώς αυξητικές τάσεις φτάνοντας το 2022 σε ιστορικά υψηλά επίπεδα ίσα με 417,06 ppm [6]. Ειδικότερα, υπολογίζεται ότι οι δεσμεύσεις των κρατών θα πρέπει να είναι κατά τέσσερις φορές πιο φιλόδοξες προκειμένου να επιτευχθούν οι στόχοι που τέθηκαν στην συμφωνία του

Παρισίου για περιορισμό αύξησης της μέσης θερμοκρασίας κάτω από 2 °C ως προς τα προβιομηχανικά επίπεδα, και επτά φορές για να προσεγγισθεί ο στόχος του 1,5° C [7].



Εικόνα 1-3: Προβλέψεις θέρμανσης για το 2100. Εκπομπές και αναμενόμενη θέρμανση βάση δεσμεύσεων και σημερινών πολιτικών [8]

1.2 Το φυσικό αέριο σήμερα

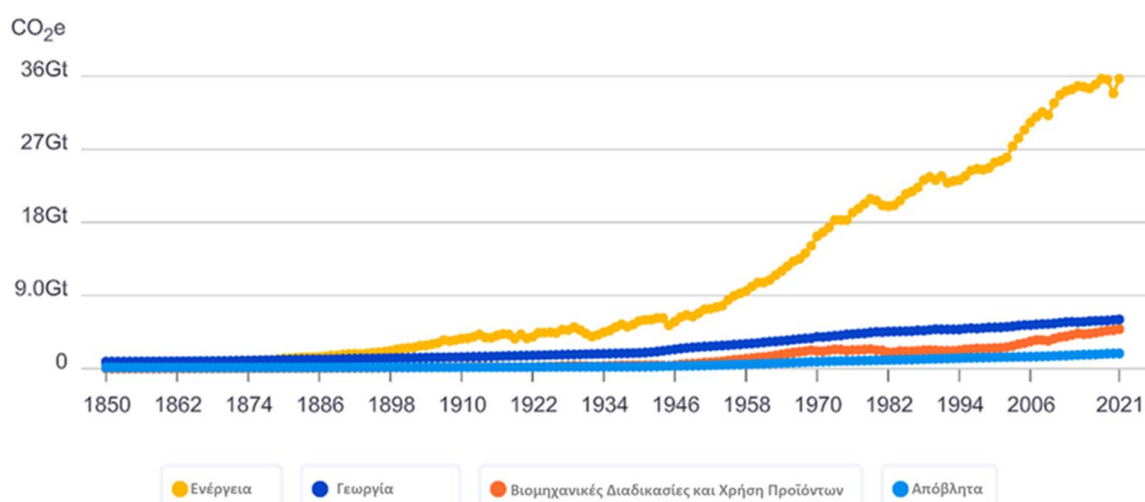
Αν και γνωστό από αρχαιότατων χρόνων και παρά την περιορισμένη του χρήση στην Ευρώπη από τον 16ο μέχρι τον 19ο αιώνα, το φυσικό αέριο ξεκίνησε να χρησιμοποιείται σημαντικά μετά τον δεύτερο παγκόσμιο πόλεμο, αφού μέχρι τότε η έλλειψη της τεχνογνωσίας για την μεταφορά του σε μεγάλες αποστάσεις αλλά και την αποθήκευση του αποτέλεσαν εμπόδιο. Η ανάπτυξη των αγωγών μεταφοράς φυσικού αερίου των 20ο αιώνα έδωσε την απαραίτητη ώθηση ώστε η χρήση του να ακολουθήσει αλματώδη αύξηση και σήμερα να είναι υπεύθυνο για την παραγωγή του 25% της ηλεκτρικής ενέργειας παγκοσμίως [9].

Λόγω των χαμηλότερων περιβαλλοντικών επιπτώσεων σε σχέση με τα υπόλοιπα ορυκτά καύσιμα, το φυσικό αέριο θα μπορούσε κάτω από συγκεκριμένες προϋποθέσεις, όπως η βελτίωση ενεργειακής απόδοσης, αποφυγή διαφυγόντων εκπομπών κατά την εξόρυξη και η χρήση συστημάτων δέσμευσης και αποθήκευσης άνθρακα (Carbon Capture and Storage CCS), να αποτελέσει “υποστηρικτικό” ορυκτό καύσιμο στην ενεργειακή μετάβαση και την απανθρακοποίηση του ενεργειακού συστήματος [10], [11].

Ενδεικτικό της έκτασης των υποδομών φυσικού αερίου είναι το δίκτυο μεταφοράς και διανομής φυσικού αερίου των Ηνωμένων Πολιτειών της Αμερικής, το οποίο αποτελείται από περίπου 3 εκατομμύρια μίλια σωληνώσεων. Τα μισά μίλια των εγκατεστημένων σωληνώσεων μεταφοράς και ένα μεγάλο ποσοστό των σωληνώσεων διανομής εγκαταστάθηκαν μέσα στις δεκαετίες του 1950 και 1960 λόγω του υπερδυσπλασιασμού της ζήτησης μετά τον δεύτερο παγκόσμιο πόλεμο [12].

1.3 Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας

Δεδομένου ότι ποσοστό μεγαλύτερο από 70 % των συνολικών εκπεμπόμενων ρύπων παγκοσμίως οφείλεται στην παραγωγή ενέργειας, συμπεριλαμβανομένης της παραγωγής θερμότητας και της μετακίνησης, η διεθνής προσπάθεια για την αντιμετώπιση της κλιματικής αλλαγής, εστιάζεται πρωτίστως στον τομέα της παραγωγής ενέργειας. Στο επόμενο διάγραμμα φαίνεται η συνεισφορά στις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα ανά οικονομικό τομέα, από το 1850 έως το 2021.

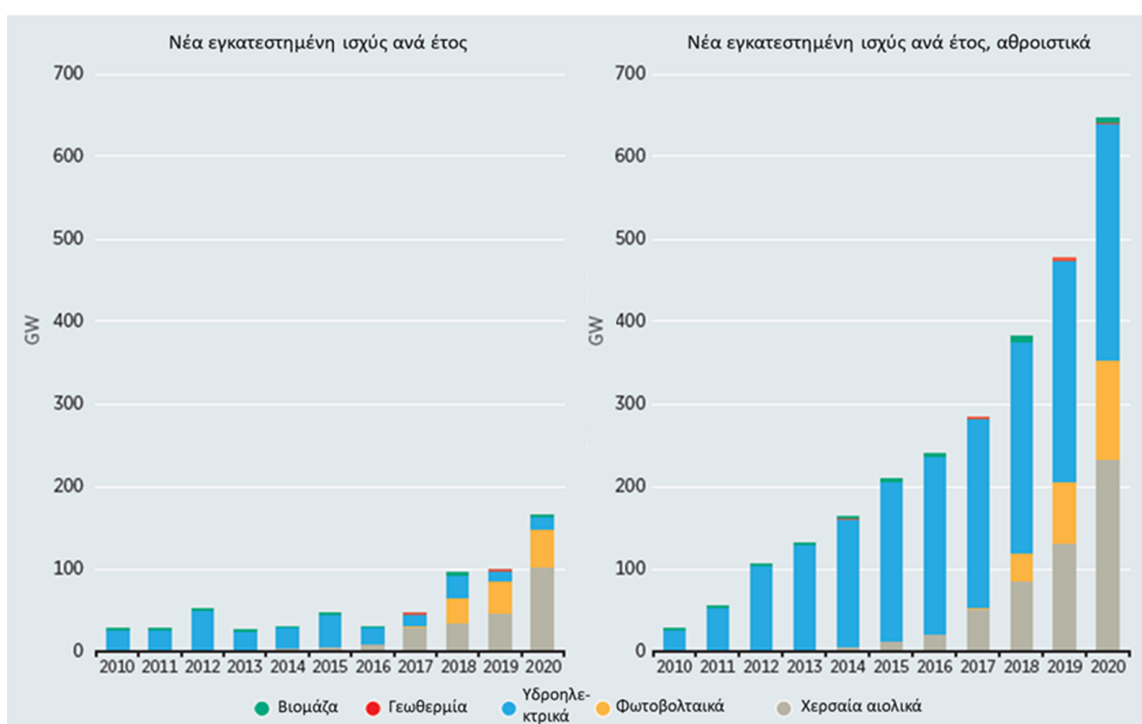


Εικόνα 1-4: Ιστορικότητα ισοδύναμων εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα ανά τομέα οικονομίας [13]

Σχετικά με τον στόχο της απανθρακοποίησης του ενεργειακού συστήματος, η λύση στην οποία έχει εστιάσει κυρίως η διεθνής κοινότητα είναι οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ΑΠΕ, RES: Renewable Energy Sources) καθώς η χρήση τους συνδέεται με αρκετά πλεονεκτήματα, μερικά από τα οποία αναφέρονται παρακάτω [14], [15]:

- Αξιοποίηση πρακτικά ανεξάντλητων φυσικών πηγών ενέργειας όπως ο αέρας, ο ήλιος, και η οργανική ύλη.
- Μηδενικές εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα κατά την φάση λειτουργίας τους.
- Λόγω της γεωγραφικής τους διασποράς βοηθούν στην αποκέντρωση του ενεργειακού συστήματος μειώνοντας έτσι τις απώλειες που συνδέονται με την μεταφορά ενέργειας σε μεγάλες αποστάσεις.
- Συνεισφέρουν στην ενεργειακή ασφάλεια και ανεξαρτησία λόγω του τοπικού τους χαρακτήρα αλλά και της σταθερότητας τους απέναντι σε διακυμάνσεις των τιμών της διεθνούς αγοράς ενέργειας.
- Διεύρυνση ενεργειακής πρόσβασης σε περιοχές όπου η επέκταση του δικτύου είναι τεχνοοικονομικά δύσκολη.
- Δημιουργία νέων θέσεων εργασίας και δυνατότητα τόνωσης της οικονομίας των τοπικών κοινωνιών.

Προς αυτό τον σκοπό θεσπίστηκαν μία σειρά από πολιτικές ώστε να καταστήσουν τις ανανεώσιμες μορφές ενέργειας ανταγωνιστικές απέναντι στα ορυκτά καύσιμα και να βοηθήσουν αυτή την απαραίτητη τεχνολογία να αναπτυχθεί. Οικονομικά κίνητρα όπως οι κρατικές επιχορηγήσεις, η εγγυημένη τιμή πώλησης (feed-in tariff και feed-in premium), απαλλαγές φόρων [16] αλλά και άλλα εργαλεία όπως οι φόροι άνθρακα (carbon tax / CO₂ pricing) [17] και το χρηματιστήριο ρύπων (European Union Emissions Trading System – EU ETS) [18] [19] έδωσαν την απαραίτητη ώθηση στην αγορά των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, ώστε να εδραιωθούν στην αγορά ενέργειας και να γίνουν ανταγωνιστικές με τα ορυκτά καύσιμα. Όπως φαίνεται και στα επόμενα σχήματα το κόστος των αιολικών και των ηλιακών συστημάτων μειώθηκε τόσο πολύ μέσα στην δεκαετία 2010 με 2020 – ήτοι, κατά 85 % για τα φωτοβολταϊκά και 56 % για τα χερσαία αιολικά - ώστε η εγκατάσταση νέας ισχύος από αυτές τις πηγές να είναι φθηνότερη από νέες εγκαταστάσεις ορυκτών καυσίμων [20].



Εικόνα 1-5: Ποσότητα εγκατεστημένης ισχύος από ΑΠΕ φθηνότερη από νέες εγκαταστάσεις ορυκτών καυσίμων [20]

	Κόστος ανά μονάδα εγκατεστημένης ισχύος			Συντελεστής εκμεταλλευσιμότητας			Ανηγμένο κόστος ηλεκτρικής ενέργειας		
	(2020 USD/kW)			(%)			(2020 USD/kWh)		
	2010	2020	Αλλαγή ποσοστού	2010	2020	Αλλαγή ποσοστού	2010	2020	Αλλαγή ποσοστού
Βιοενέργεια	2 619	2 543	-3%	72	70	-2%	0.076	0.076	0%
Γεωθερμία	2 620	4 468	71%	87	83	-5%	0.049	0.071	45%
Υδροηλεκτρικά	1 269	1 870	47%	44	46	4%	0.038	0.044	18%
Φωτοβολταικά	4 731	883	-81%	14	16	17%	0.381	0.057	-85%
Συγκεντρωμένη ηλιακή εν.	9 095	4 581	-50%	30	42	40%	0.340	0.108	-68%
Χερσαία αιολικά	1 971	1 355	-31%	27	36	31%	0.089	0.039	-56%
Υπεράκτια αιολικά	4 706	3 185	-32%	38	40	6%	0.162	0.084	-48%

Εικόνα 1-6: Τάσεις κόστους ανά μονάδα εγκατεστημένης ισχύος, συντελεστών εκμεταλλευσιμότητας και ανηγμένου κόστους ενέργειας ανά τεχνολογία για το 2010 και το 2020 [20]

Η στοχαστικότητα όμως που χαρακτηρίζει την παραγωγή ενέργειας από μεταβλητές ανανεώσιμες πηγές – δηλαδή τα αιολικά και ηλιακά συστήματα σε αντίθεση με την γεωθερμία, τη βιομάζα και τα μεγάλα υδροηλεκτρικά στα οποία η παραγωγή ενέργειας θεωρείται ελεγχόμενη – αποτελεί εμπόδιο στην απεξάρτηση του ενεργειακού μοντέλου από τα ορυκτά καύσιμα, για λόγους όπως η ανισορροπία μεταξύ παραγωγής και ζήτησης, η έλλειψη ευελιξίας και αξιοπιστίας, οι χαμηλοί συντελεστές εκμεταλλευσιμότητας [21] αλλά και η ανάγκη προστασίας του ηλεκτρικού δικτύου από αιχμές στην παραγωγή [22]. Κατά συνέπεια οι μονάδες βάσης εξακολουθούν να εξαρτώνται μέχρι σήμερα από τα περισσότερο προβλέψιμα και ευέλικτα ορυκτά καύσιμα, ενώ σημαντικές ποσότητες ενέργειας χάνονται λόγω τεχνοοικονομικής αδυναμίας για απορρόφηση της από το δίκτυο (Energy Curtailment). Χαρακτηριστικά, στην Γερμανία το 2019 περικόπηκαν 6273 GWh αιολικής ενέργειας από το δίκτυο [23].

Προκειμένου να ξεπεραστούν αυτά τα ζητήματα και να μετατοπιστεί το μοντέλο παραγωγής ενέργειας προς τις ΑΠΕ, τα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας κρίνονται απαραίτητα [26].

1.4 Αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας

Σήμερα το μεγαλύτερο μερίδιο στην αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας παγκοσμίως - πάνω από 90 % - κατέχει η αντλησιοταμίευση (Pumped storage hydropower) με εγκατεστημένη χωρητικότητα περίπου 8500 GWh. Το ενδιαφέρον όμως τα τελευταία χρόνια εστιάζεται στην ηλεκτροχημική μέθοδο αποθήκευσης και πιο συγκεκριμένα στις μπαταρίες λιθίου και σύμφωνα με τον διεθνή οργανισμό ενέργειας αναμένεται πως η πλειοψηφία της καινούργιας εγκατεστημένης χωρητικότητας για αποθήκευση ενέργειας θα είναι μπαταρίες και για να επιτευχθούν οι στόχοι κλιματικής ουδετερότητας μέχρι το 2050 η εγκατεστημένη χωρητικότητα για αποθήκευση ενέργειας σε μπαταρίες, θα πρέπει να αυξηθεί κατά 44 φορές μέχρι το 2030 [25].

Τόσο όμως η αντλησιοταμίευση όσο και οι μπαταρίες παρουσιάζουν ορισμένους βασικούς περιορισμούς, με την πρώτη να έχει μικρή ενεργειακή πυκνότητα και κυρίως

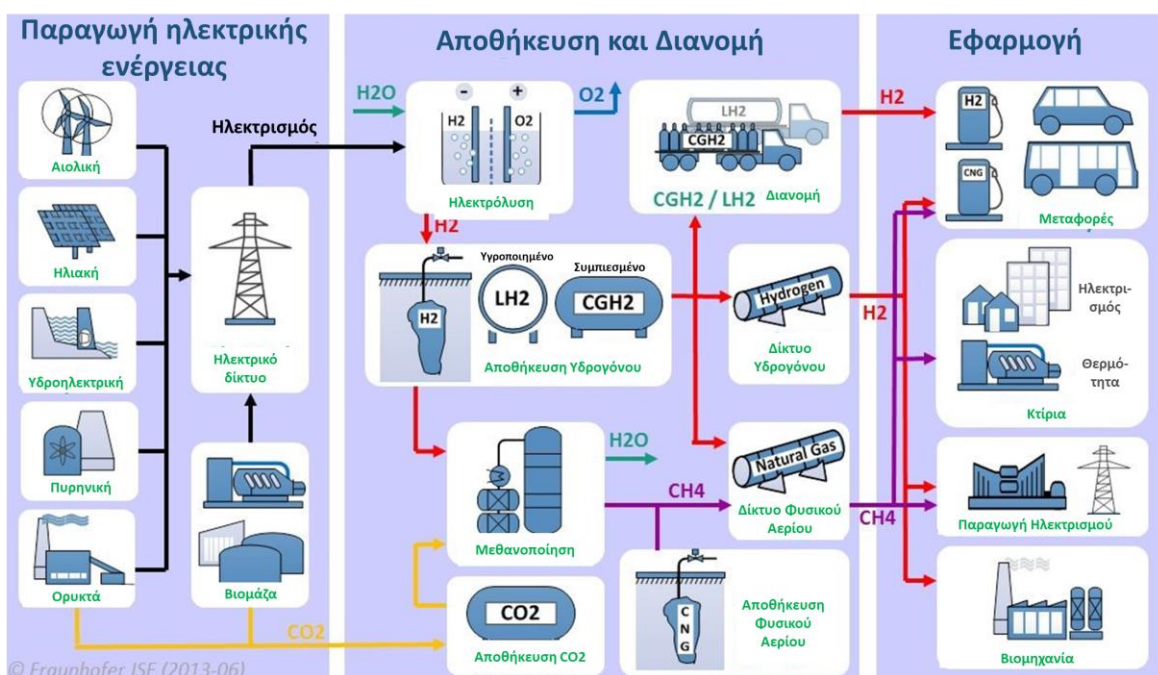
ειδικές γεωγραφικές-μορφολογικές απαιτήσεις, ενώ η δεύτερη παρουσιάζει περιορισμένη δυνατότητα αποθήκευσης ενέργειας για μεγάλα διαστήματα (εποχική αποθήκευση), υψηλό κόστος για εφαρμογές όπου απαιτείται μεγάλη χωρητικότητα αλλά και αυξημένες περιβαλλοντικές επιπτώσεις, κυρίως λόγω της εξόρυξης πρώτων υλών που απαιτούνται για την κατασκευή τους [26], [28].

Οι τεχνολογίες που μετατρέπουν την ηλεκτρική ενέργεια σε καύσιμο ή αλλιώς Power-to-Gas (PtG) προσφέρουν σημαντικά πλεονεκτήματα έναντι των δύο αυτών τεχνολογιών, ικανοποιώντας, ανάμεσα σε άλλα, τόσο την ανάγκη για μακροχρόνια όσο και για μεγάλης κλίμακας αποθήκευση ενέργειας.

2. Power-to-Gas

2.1 Εισαγωγή

Ο όρος Power-to-Gas (PtG ή P2G) χρησιμοποιείται για να περιγράψει τα συστήματα που αξιοποιούν ηλεκτρική ενέργεια, για να παράγουν καύσιμο. Ανάμεσα στα παραγόμενα καύσιμα τα πιο συνηθισμένα είναι το υδρογόνο και το μεθάνιο απ' όπου λαμβάνουν τις ονομασίες Power-to-Hydrogen (PtH) και Power-to-Methane (PtM) αντίστοιχα.

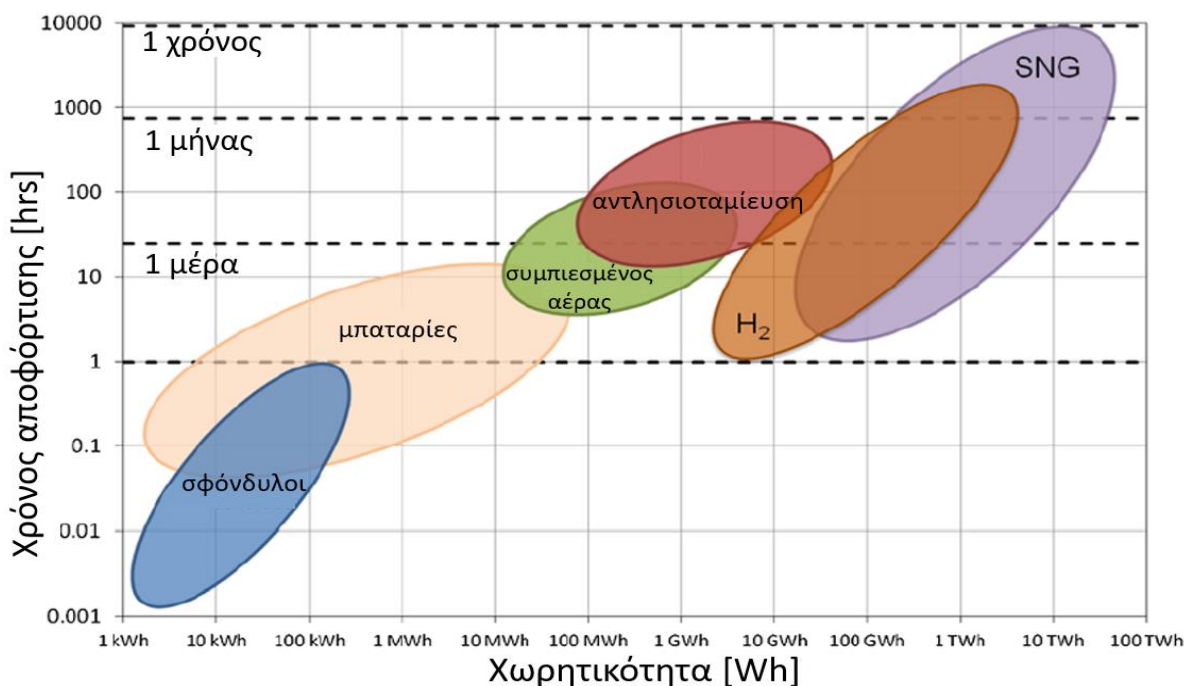


Εικόνα 2-1 Εφοδιαστική αλυσίδα συστημάτων Power-to-Gas [27]

Η δυνατότητα αποθήκευσης της ηλεκτρικής ενέργειας σε μορφή καυσίμου προσφέρει σημαντικά πλεονεκτήματα στις τεχνολογίες P2G, τα οποία συνοψίζονται παρακάτω:

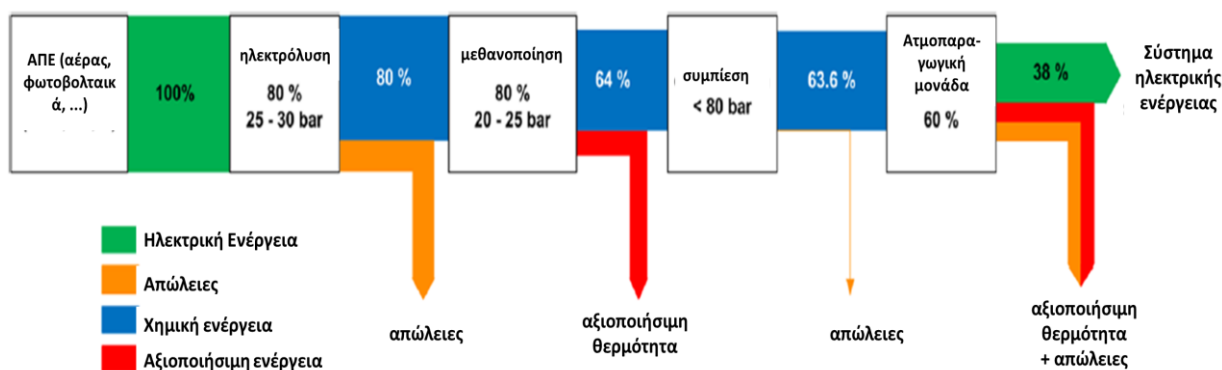
- **Μακροχρόνια αποθήκευση:** Οι πολύ μικρές απώλειες ενέργειας ως προς τον χρόνο συνεπάγονται την ικανότητα αποθήκευσης της ενέργειας για μεγάλα χρονικά διαστήματα από εβδομάδες έως αρκετούς μήνες [28],[29], το οποίο είναι πολύ σημαντικό για περιοχές που παρουσιάζουν σημαντικές εποχικές διαφορές ως προς την παραγωγή και κατανάλωση ενέργειας όπως είναι για παράδειγμα η πολιτεία της Καλιφόρνια, όπου λόγω του πλεονάσματος παραγωγής τους ανοιξιάτικους μήνες περικόπτονται σημαντικά ποσά παραγόμενης ενέργειας της τάξης των 2 εκατομμυρίων MWh [30].
- **Δυνατότητα μεταφοράς φορέα ενέργειας:** Το εκάστοτε καύσιμο που παράγεται μπορεί να μεταφερθεί σε αγωγούς, δεξαμενές και δοχεία, προσθέτοντας επιπλέον ευελιξία στο σύστημα [31].

- **Αποθήκευση μεγάλης κλίμακας και δυνατότητα επέκτασης:** Σε αντίθεση με της μπαταρίες, η αύξηση της χωρητικότητας-αυτονομίας του συστήματος μπορεί να γίνει με προσθήκη επιπλέον δεξαμενών αποθήκευσης καυσίμου [34].
- **Μεγάλη ενεργειακή πυκνότητα:** Η ενεργειακή πυκνότητα τόσο του υδρογόνου όσο και του συνθετικού φυσικού αερίου (600 και 1800 Wh/lt αντίστοιχα, στα 200 bar) είναι σημαντικά μεγαλύτερη από αυτή των μπαταριών λιθίου (200 έως 400 Wh/lt) [29], χαρακτηριστικό που καθιστά αυτές τις τεχνολογίες χρήσιμες για εφαρμογές όπου υπάρχουν περιορισμοί μεγέθους, όπως οι μεταφορές και οι διαστημικές εφαρμογές.
- **Αξιοποίηση υφιστάμενων υποδομών:** Για την μεταφορά των παραγόμενων καυσίμων μπορεί να χρησιμοποιηθεί το δίκτυο αγωγών του φυσικού αερίου [32] ενώ η καύση τους προς παραγωγή ενέργειας μπορεί να γίνει σε υπάρχοντα συστήματα (αεριοστρόβιλους, κινητήρες εσωτερικής καύσης και λέβητες) μειώνοντας έτσι το κόστος [36].
- **Παραγωγή πράσινου καυσίμου:** Δεδομένου ότι το παραγόμενο προϊόν είναι καύσιμο, αυτό μπορεί να αντικαταστήσει τα ορυκτά καύσιμα με μειωμένες ή και καθόλου τροποποιήσεις των τεχνολογιών που προϋπήρχαν.



Εικόνα 2-2 Χρόνος αποφόρτισης συναρτήσει της χωρητικότητας για διάφορα συστήματα αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας [34]

Τα παραπάνω καθιστούν τις μονάδες P2G μία ελκυστική λύση αποθήκευσης ενέργειας ικανές να προσφέρουν μεγάλη ευελιξία [31] σε ένα ενεργειακό σύστημα με μεγάλη διείσδυση ΑΠΕ. Το μειονέκτημα των τεχνολογιών P2G, είναι η σχετικά χαμηλή τους απόδοση γεγονός που οφείλεται εν μέρει στην μικρή τεχνολογική ανάπτυξη τους μέχρι σήμερα αλλά και στα ενδιάμεσα στάδια μετατροπών.



Εικόνα 2-3 Διάγραμμα Sankey απωλειών ενέργειας κατά τα διαδοχικά στάδια μετατροπών ενός συστήματος Power-to-SNG-to-Power [34]

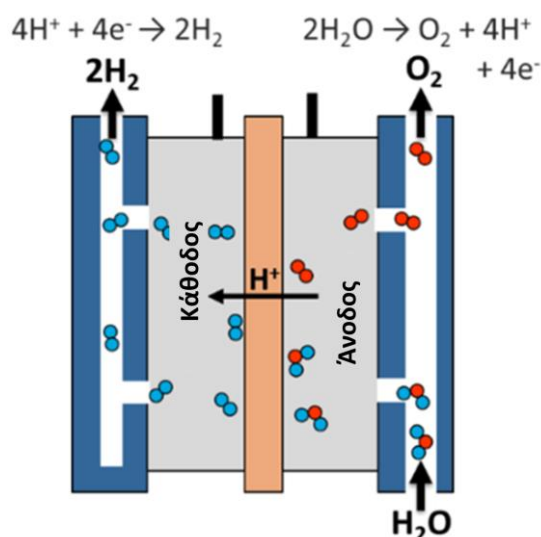
Ο κλάδος των συστημάτων P2G είναι ακόμη σε αρχικό στάδιο και μέχρι το 2018 υπήρχαν λιγότερες από 130 πιλοτικές-πειραματικές μονάδες [34], οι περισσότερες των οποίων είναι στην Ευρώπη και με τα περισσότερα έργα να εστιάζουν στο P2H. Ωστόσο από το 2013 και μετά όπου και τέθηκε σε εφαρμογή η πρώτη εμπορική μονάδα παραγωγής συνθετικού φυσικού αερίου SNG για μεταφορές στον κόσμο “Audi E-gas” [35] το ενδιαφέρον προς την τεχνολογία PtM – η οποία αποτελεί και το αντικείμενο της παρούσας εργασίας - έχει αυξηθεί [36].

2.2 Ηλεκτρόλυση

Η τεχνολογία P2G βασίζεται στην ηλεκτρόλυση νερού, κατά την οποία το νερό εισέρχεται στην ηλεκτρολυτική κυψέλη και με την χρήση ηλεκτρικής ενέργειας, διασπάται σε οξυγόνο και υδρογόνο. Οι τρεις βασικές τεχνολογίες ηλεκτρόλυσης σήμερα είναι:

- Αλκαλική ηλεκτρόλυση (Alkaline electrolysis, AEL)
- Ηλεκτρόλυση με χρήση μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων (Proton Exchange Membrane Electrolysis, PEM)
- Ηλεκτρόλυση στερεού οξειδίου (Solid Oxide Electrolyzer Cell, SOEC)

Ανάμεσα στις διαφορετικές τεχνολογίες ηλεκτρόλυσης που υπάρχουν σήμερα, μεγάλο ενδιαφέρον εστιάζεται γύρω από την τεχνολογία της Μεμβράνης Ανταλλαγής Πρωτονίων (Proton Exchange Membrane Electrolysis, PEM) λόγω της υψηλής ενεργειακής της απόδοσης, της παραγωγής υψηλής καθαρότητας και υψηλής πίεσης υδρογόνου αλλά κυρίως λόγω της δυνατότητάς της να λειτουργεί αποδοτικά υπό μεταβαλλόμενο φορτίο, όπως αυτό που προέρχεται από ΑΠΕ. Το αυξημένο κόστος της –οφειλόμενο κυρίως στην χρήση ακριβών υλικών στην μεμβράνη, όπως ιρίδιο, λευκόχρυσος και τιτάνιο – αναμένεται να μειωθεί στα επόμενα χρόνια [37] [38].



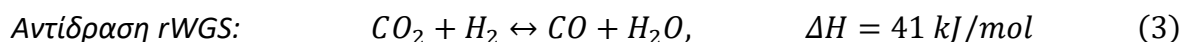
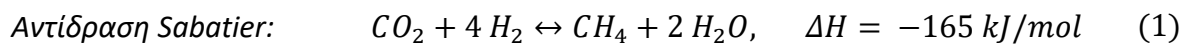
Εικόνα 2-4: Απλουστευμένη απεικόνιση ηλεκτρολυτικής κυψέλης PEM [39]

2.3 Power-to-Methane

2.3.1 Γενικά στοιχεία

Η τεχνολογία PtM χρησιμοποιεί το παραγόμενο από την ηλεκτρόλυση υδρογόνο και σε συνδυασμό με κάποια πηγή άνθρακα, παράγεται μεθάνιο. Το τελικό προϊόν συνήθως περιέχει ποσοστά υδρογόνου και άλλων ενώσεων αναλόγως την πηγή άνθρακα και αποκαλείται συνθετικό φυσικό αέριο (Synthetic Natural Gas, SNG) ή ανανεώσιμο φυσικό αέριο (Renewable Natural Gas, RNG). Συνεπώς οι ονομασίες Power-to-Methane, Power-to-SNG και Power-to-RNG αναφέρονται ουσιαστικά στην ίδια τεχνολογία και χρησιμοποιούνται εναλλακτικά μεταξύ τους.

Η αντίδραση που χαρακτηρίζει την τεχνολογία PtM ονομάζεται μεθανοποίηση και κατά την οποία οξειδία του άνθρακα CO_x , κυρίως CO και CO_2 , υφίστανται υδρογόνωση και μετατρέπονται σε μεθάνιο. Η διεργασία αυτή χωρίζεται σε δύο βασικές κατηγορίες αναλόγως του είδους της, την βιολογική και την χημική μεθανοποίηση. Παρά τα πολλαπλά οφέλη της όπως η λειτουργία σε χαμηλές θερμοκρασίες (30 με 60 °C) και ατμοσφαιρική πίεση, η μεγάλη αποδοτικότητα της, αλλά και η ανοχή της σε ανεπιθύμητες ενώσεις στο αέριο τροφοδοσίας, η βιολογική μεθανοποίηση λαμβάνει δευτερεύουσα σημασία έναντι της χημικής εναλλακτικής της, κυρίως λόγω της αργής κινητικής της [32] και του υψηλού κόστους καλλιέργειας [40]. Στην παρούσα εργασία μελετάται η χημική μεθανοποίηση. Ο μηχανισμός αυτός είχε ήδη παρατηρηθεί από τα μέσα του 19^{ου} αιώνα, ενώ στις αρχές του 20^{ου} οι Sabatier και Senderens ανακάλυψαν την χημική αντίδραση της καταλυτικής μεθανοποίησης του διοξειδίου του άνθρακα, γνωστή σήμερα ως αντίδραση Sabatier [41]. Η αντίδραση Sabatier (εξ.(1)) παρουσιάζεται συνήθως ως σύνθεση δύο ενδιάμεσων χημικών αντιδράσεων, την μεθανοποίηση μονοξειδίου του άνθρακα (εξ. (2)) και την αντίστροφη αντίδραση μετατροπής νερού-μονοξειδίου του άνθρακα (reverse Water Gas Shift – rWGS), (εξ. (3)). Οι χημικές εξισώσεις των αντιδράσεων αυτών φαίνονται παρακάτω [32], [41]:



Οι πιθανές διατάξεις μίας μονάδας καταλυτικής μεθανοποίησης είναι πολλές και εξαρτώνται κυρίως από το είδος της πηγής άνθρακα. Η αντίδραση λαμβάνει χώρα με την παρουσία καταλύτη, συνήθως νικελίου, σε μέτριες θερμοκρασίες από τους 200 έως και 500 °C και αυξημένη πίεση, συνήθως μεταξύ 10 και 20 bar. Λόγω της ισχυρά εξώθερμης φύσης της, ο έλεγχος της θερμοκρασίας είναι ένα από τα κρίσιμα ζητήματα τόσο για την ενίσχυση/επιλεκτικότητα της κινητικής της κατάλληλης αντίδρασης, δηλαδή της εξ. (1), όσο και για την προστασία του καταλύτη και των άλλων μερών του αντιδραστήρα [41].

Στην βιβλιογραφία υπάρχει αναφορά σε πολλά διαφορετικά είδη αντιδραστήρων όπως οι αντιδραστήρες σταθερής και ρευστοποιημένης κλίνης, αντιδραστήρες μεμβράνης, κυψελοειδείς με την βασική διαφορά τους να αφορά το θερμοκρασιακό προφίλ της αντίδρασης [42]. Στην καταλυτική-χημική μεθανοποίηση, οι συχνότερα χρησιμοποιούμενοι αντιδραστήρες είναι κατηγορίας σταθερής κλίνης (Fixed bed reactors) [43], οι οποίοι χαρακτηρίζονται από μεγάλη αξιοπιστία και τεχνολογική ωριμότητα, χαμηλό κόστος και απλότητα λειτουργίας, αλλά στους οποίους παρατηρείται αυξημένη θερμική καταπόνηση στον καταλύτη [36]. Αναλόγως του είδους ψύξης οι αντιδραστήρες χωρίζονται περαιτέρω σε αδιαβατικούς, πολυτροπικούς και ισοθερμικούς.

Λόγω της μεγάλης χημικής ομοιότητας του μεθανίου με το φυσικό αέριο, είναι απολύτως συμβατό με τις υποδομές φυσικού αερίου και μπορεί να διοχετευθεί σε αυτές χωρίς περιορισμό [32].

2.4 Βιβλιογραφική ανασκόπηση

Τα τελευταία χρόνια το ενδιαφέρον για τις τεχνολογίες P2G έχει αυξηθεί, το οποίο αποτυπώνεται και στην αύξηση των δημοσιεύσεων σχετικών ερευνών [44]. Οι μελέτες αυτές προσεγγίζουν το θέμα από διάφορες σκοπιές όπως η τεχνοοικονομική αξιολόγηση, η ανάλυση με υπολογιστική προσομοίωση και η βελτιστοποίηση, η μελέτη πειραματικών διατάξεων ή πιλοτικών εφαρμογών και η ανάλυση κύκλου ζωής.

Σχετικά με τα τεχνικά χαρακτηριστικά μία μονάδας PtSNG, οι κύριες παράμετροι στις οποίες εστιάζεται η έρευνα είναι η συνθήκες λειτουργίας (θερμοκρασία, πίεση και ροή αντιδρώντων), η ψύξη του αντιδραστήρα και τα χαρακτηριστικά του καταλύτη. Ο Currie [40] επισημαίνει την επίδραση της ταχύτητας τροφοδοσίας του H₂ σε έναν αντιδραστήρα μεμβράνης, με το βέλτιστο επίπεδο να επιτυγχάνει 100 % μετατροπή CO₂ ενώ απόκλιση προς τα πάνω από αυτό είχε ως αποτέλεσμα την ανάγκη για διαχωρισμό του περιττού H₂ κατάντη ή μείωση του ποσοστού μετατροπής στην περίπτωση μικρότερης ταχύτητας. Οι Perna et al. [22] χρησιμοποιώντας δύο διαφορετικές

προσεγγίσεις – στατική και δυναμική ανάλυση – υπολογίζει την ετήσια απόδοση μίας PtSNG μονάδας που χρησιμοποιεί ενέργεια από ένα αιολικό πάρκο 12 MW ίση με 44 % (LHV), ενώ τονίζει τη σημασία ενδιάμεσης αποθήκευσης υδρογόνου στην τελική απόδοση της μονάδας, προκειμένου να εξισορροπηθούν οι διαφορές στην δυναμική συμπεριφορά ηλεκτρολύτη και αντιδραστήρα και να εξασφαλιστεί η μέγιστη δυνατή συνεχής λειτουργία του δεύτερου. Συγκρίνοντας την διάταξη των Perna et al. [22] με αυτή του Chauvy et al. [45] οι οποίες παρουσιάζουν αρκετές ομοιότητες, είναι επίσης φανερή η θετική επίδραση της αύξησης της πίεσης από τα 10 στα 20 bar, δεδομένου ότι ο πρώτος επιτυγχάνει ισάξια σύσταση SNG χωρίς την χρήση μεμβράνης διαχωρισμού υδρογόνου στο σύστημα αναβάθμισης. Οι D. Sun και D. Simakov [46] προσομοιώνοντας έναν αντιδραστήρα σταθερής κλίνης με ενσωματωμένο σύστημα ψύξης τηγμένου άλατος, αναγνώρισε τη θερμοκρασία και παροχή της τροφοδοσίας στον αντιδραστήρα αλλά και την ροή ψυκτικού ως τις κρισιμότερες παραμέτρους για την επίδοση του αντιδραστήρα επιτυγχάνοντας μετατροπή μεθανίου μεγαλύτερη από 90% με έναν ρυθμό εναλλαγής της τάξεως των 10000 h^{-1} . Επιπλέον αναφέρει ότι ενώ οι χαμηλές θερμοκρασίες ευνοούν την ισχυρά εξώθερμη αντίδραση Sabatier, αύξηση της ψυκτικής ισχύος πάνω από ένα ορισμένο όριο καταλήγει σε δραστική μείωση της απόδοσης.

Σχετικά με τις περιβαλλοντικές αποδόσεις των μονάδων PtG, υπάρχει επίσης μία εκτεταμένη λίστα από δημοσιευμένες μελέτες, οι οποίες χρησιμοποιούν ανάλυση κύκλου ζωής για να αποφανθούν σχετικά με τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις ή τα οφέλη της εκάστοτε διάταξης. Αξίζει να σημειωθεί ότι λόγω των αρκετών διαφορών που τις περισσότερες φορές υπάρχουν στο σύστημα της εκάστοτε εργασίας, τόσο λόγω των τεχνολογιών που επιλέγονται αλλά και των μεθοδολογικών προσεγγίσεων που υιοθετούνται, η άμεση σύγκριση των αποτελεσμάτων θα πρέπει να αποφεύγεται καθώς τα τυχόν συμπεράσματα που θα προέκυπταν θα ήταν μικρής ερευνητικής σημασίας και με αυξημένη πιθανότητα σφάλματος. Η αναφορά εδώ γίνεται για λόγους πληρότητας, αλλά και για μία γενική παρουσίαση της δυναμικής αυτών των συστημάτων σχετικά με τις περιβαλλοντικές τους επιδόσεις.

O Chauvy et al. [49] αναλύοντας τον κύκλο ζωής ενός ολοκληρωμένου συστήματος Power-to-SNG τροφοδοτούμενο με CO_2 από ένα εργοστάσιο τσιμέντου και με υδρογόνο από ένα, βασιζόμενο σε αιολική ενέργεια, σύστημα ηλεκτρόλυσης PEM ισχύος 90 MW, κατέληξε στο συμπέρασμα ότι η συνεισφορά από την παραγωγή υδρογόνου ήταν κυρίαρχη στις επιπτώσεις των κατηγοριών χρήσης νερού (XN), κλιματικής αλλαγής (KA), αλλά και όξυνσης χερσαίων οικοσυστημάτων (OXΠ), ενώ το σύστημα δέσμευσης CO_2 (Capture Unit) στην κατηγορία ευτροφισμού γλυκού νερού (EFN) με ποσοστό μεγαλύτερο από 90%. Η αξιοποίηση της απαγόμενης θερμότητας από τους αντιδραστήρες, στα συστήματα δέσμευσης και μετατροπής CO_2 (Heat Integration) αποδείχθηκε σημαντική, με την μείωση των επιπτώσεων στις κατηγορίες KA και ΕΟΠ (Έλλειψη Ορυκτών Πόρων) να είναι 39% και 75% αντίστοιχα λαμβάνοντας υπόψη και την επιβάρυνση από την εκπομπή των διαχωρισμένων καυσαερίων. Ως προς τα αποτελέσματα από το στάδιο χαρακτηρισμού, λαμβάνοντας όμως υπόψη στο σύστημα και τις επιπτώσεις από την παραγωγή τσιμέντου, ο δείκτης επίπτωσης κλιματικής αλλαγής ήταν της τάξης των $19,65 \text{ kg CO}_2\text{-eq ανά } 1 \text{ GJ}$ παραγόμενου SNG, ενώ το αντίστοιχο συμβατικό σύστημα, δηλαδή με χρήση ορυκτών καυσίμων, εξέπεμπε $82 \text{ kg CO}_2\text{-eq ανά } 1 \text{ GJ}$ παραγόμενου SNG.

Ο Gerloff [37] στην εργασία του επικεντρώθηκε στην μελέτη των επιπτώσεων μίας μονάδας PtSNG σε τρία διαφορετικά μεγέθη (1, 5 και 10 MW) αλλά και την σύγκριση της περιβαλλοντικής της απόδοσης υπό διάφορους συνδυασμούς πηγών CO₂, τεχνολογιών ηλεκτρόλυσης και πηγών ενέργειας. Σχετικά με τα αποτελέσματα για την κατηγορία της κλιματικής αλλαγής, φάνηκε ότι το μέγεθος της εγκατάστασης έχει πολύ μικρή επίδραση στην συνολική συνεισφορά, αλλά σημαντικές διαφορές παρατηρήθηκαν μεταξύ των τριών τεχνολογιών ηλεκτρόλυσης – PEM, AEL και SOEC – με καλύτερες τις επιδόσεις της τεχνολογίας SOEC (Solid Oxide Electrolyser Cell). Οι επιπτώσεις της μονάδας για ηλεκτρόλυση με PEM κυμαίνονται από 12,21 (kg CO₂ eq/kg SNG) για το ενεργειακό σενάριο του 2019 (συνολική διείσδυση ΑΠΕ 45%) έως -1,16 (kg CO₂-eq/kg SNG) όταν η ενέργεια προσφέρεται αποκλειστικά από ΑΠΕ. Είναι σημαντικό να σημειωθεί για την συγκεκριμένη μελέτη ότι, παρά την εκτεταμένη έρευνα και τα αναλυτικά δεδομένα απογραφής για τις μονάδες ηλεκτρόλυσης, πολλά δεδομένα είναι αποτέλεσμα προσωπικών υπολογισμών και υποθέσεων, για τα οποία δεν παρέχονται αρκετές εξηγήσεις με ότι αυτό συνεπάγεται για την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων.

Ο Puga et al. [48] στην εκτεταμένη τους έρευνα, προσομοίωσαν μέσω του λογισμικού θερμοδυναμικής *Aspen Plus*[®] μία πιλοτική μονάδα PtSNG χρησιμοποιώντας ηλεκτρόλυση PEM ισχύος 1 MW, ενώ η μοντελοποίηση βασίστηκε στο πατενταρισμένο σύστημα της *Solar Fuel GmbH* το οποίο χρησιμοποιεί δύο αντιδραστήρες σταθερής κλίνης (Fixed bed reactor) με ενσωματωμένο σύστημα ψύξης και ενδιάμεση αφαίρεση νερού. Το σύστημα επιτυγχάνει τελική περιεκτικότητα μεθανίου ίση με 94,5 % ενώ η συνολική απόδοση του συστήματος υπολογίζεται ίση με 46 % και μάλιστα χωρίς να αξιοποιείται η θερμότητα που παράγεται από τους αντιδραστήρες. Η ανάλυση κύκλου ζωής για την παραγωγή SNG έδειξε ότι το μόνο σενάριο στο οποίο επιτυγχάνεται χαμηλότερος δείκτης δυναμικού θέρμανσης (ΔN), ίσος με -0,17 (kg CO₂-eq/kWh_{th} SNG) από αυτή του συμβατικού φυσικού αερίου 0,04 (kg CO₂-eq/kWh_{th} SNG) είναι όταν χρησιμοποιείται ενέργεια από ΑΠΕ και συγκεκριμένα υπεράκτια αιολικά, ενώ στην περίπτωση χρήσης του ηλεκτρικού δικτύου της Γερμανίας το GWP υπολογίζεται 26 φορές μεγαλύτερο από τη συμβατική περίπτωση.

Στον παρακάτω πίνακα συνοψίζονται μερικά από τα βασικά αποτελέσματα των μελετών αυτών:

Πίνακας 2-1 Σύνοψη αποτελεσμάτων βιβλιογραφικής ανασκόπησης

Συγγραφέας	Έτος	Περιγραφή συστήματος	Πηγή άνθρακα	Υποπροϊόντα	Πηγή ενέργειας ηλεκτρόλυσης	Κατηγορία επιπτώσεων	Ποσότητα	Μονάδα	Σχόλια
Chauvy et al.	2022	Ηλεκρόλυση: PEM 90 MW Μεθανοποίηση: 4 πολυσωληνοειδείς αδιαβατικοί αντιδραστήρες Αναβάθμιση SNG: Δοχείο εκτόνωσης, μεμβράνες διαχωρισμού H ₂ και H ₂ O Δέσμευση CO₂: Διάλυμα αμινών.	Μονάδα παραγωγής τσιμέντου	Αξιοποίηση απαγόμενης θερμότητας και οξυγόνου ηλεκτρόλυσης	Αιολική ενέργεια	Δυναμικό θέρμανσης	19.7 (Αιολική) 82.2 (Φυσ. αέριο)	kg CO ₂ -eq / GJ SNG	ReCiPe Midpoint, Συμπερίληψη επιπτώσεων μονάδας τσιμέντου
						Έλλειψη ορυκτών πόρων	4.9 (Αιολική) 33.1 (Φυσ. Αέριο)	kg Oil-eq/GJ SNG	
						Έλλειψη πόρων μεταλλευμάτων	4.6 (Αιολική) 2.8 (Φυσ. αέριο)	kg SO ₂ -eq /GJ SNG	
Gerloff	2021	Ηλεκτρόλυση: PEM, SOEC, AEL, Αναβάθμιση: Δοχείο εκτόνωσης, μεμβράνη διαχωρισμού H ₂ O, συμπίεση SNG Δέσμευση CO₂: Διάλυμα αμινών Μεθανοποίηση: Δ.Δ	Μονάδα παραγωγής τσιμέντου	Απελευθέρωση οξυγόνου στην ατμόσφαιρα	Δίκτυο με 100% ΑΠΕ	Δυναμικό θέρμανσης	-1.2 (PEM) -0.7 (SOEC) -1.2 (AEL)	kg CO ₂ -eq/kg SNG	
					Δίκτυο 2019 (45 % ΑΠΕ)	Δυναμικό θέρμανσης	12.0 (PEM) 9.8 (SOEC) 11.5 (AEL)	kg CO ₂ -eq/kg SNG	
Puga et al.	2022	Ηλεκτρόλυση: 1 MW PEM Μεθανοποίηση: 2 αντιδραστήρες σταθερής κλίνης με εσωτερική ψύξη και ενδιάμεσα στάδια αφαίρεσης H ₂ O Αναβάθμιση: Δοχείο εκτόνωσης, συμπίεση SNG Δέσμευση CO₂: Δ.Ε	Συμπίεση και μεταφορά καθαρού CO ₂ από βιομάζα.	Χωρίς αξιοποίηση απαγόμενης θερμότητας και παραγόμενου οξυγόνου	Υπεράκτια αιολικά	Δυναμικό θέρμανσης	-0.17 (PEM) 0.04 (Φυσ. Αέριο) 1.06 (Δίκτυο 2020)	kg CO ₂ -eq/kWh SNG	Μέθοδος ILCD Midpoint, Υπολογισμός διάταξης με λογισμικό ASPEN.

Δ.Ε : Δεν εφαρμόζεται, Δ.Δ : Δεν διευκρινίζεται

3. Ανάλυση Κύκλου Ζωής

3.1 Σύντομη ιστορική αναδρομή

Από την δεκαετία του '60 περιβαλλοντικές ανησυχίες – όπως η ρύπανση και η έλλειψη πρώτων υλών – έδωσαν το έναυσμα για την ανάπτυξη μεθόδων αξιολόγησης του περιβαλλοντικού αποτυπώματος των προϊόντων χρησιμοποιώντας προσεγγίσεις προσανατολισμένες προς τον κύκλο ζωής. Οι πρώτες μελέτες έγιναν σε εταιρικό επίπεδο και οι πλειοψηφία τους εστιαζόταν στην σύγκριση των συσκευασιών των προϊόντων, κυρίως ως προς τις ενεργειακές απαιτήσεις/από ενεργειακή οπτική. Στα μέσα της δεκαετίας του '80 η ΑΚΖ γνώρισε ταχεία ανάπτυξη και έγιναν σημαντικά βήματα σχετικά με την μεθοδολογική ανάπτυξη και προτυποποίηση με αποτέλεσμα το 1990 να υιοθετηθεί επισήμως ο όρος Ανάλυση Κύκλου Ζωής (ΑΚΖ) ή Life Cycle Analysis (LCA) αλλά και να δημιουργηθούν τα πρώτα εξειδικευμένα λογισμικά εργαλεία *GaBi* και *SimaPro*.

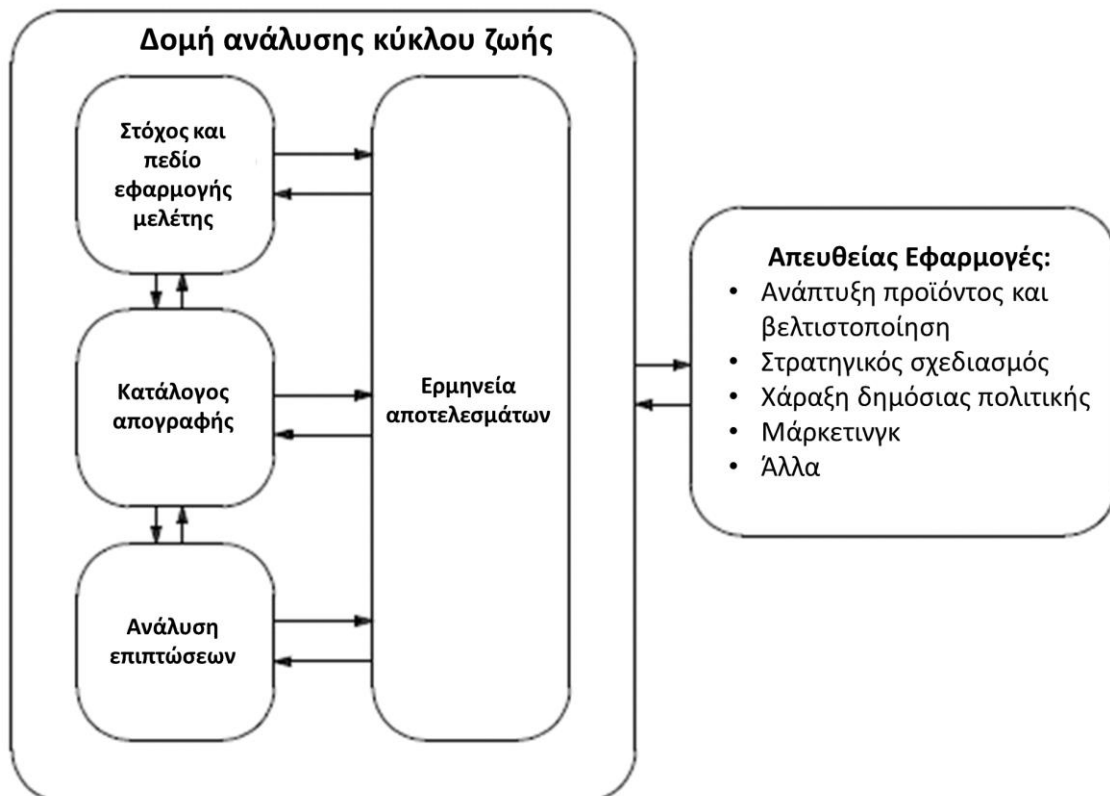
Σήμερα η ΑΚΖ θεωρείται ένα αξιόπιστο εργαλείο για την ανάλυση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων μίας διαδικασίας και η χρήση της έχει επεκταθεί/διαδοθεί σε πολλούς τομείς με εφαρμογές που ποικίλουν από την έρευνα και την προώθηση προϊόντων, έως και την λήψη αποφάσεων από πολιτικούς και μη φορείς [50].

3.2 Γενικά στοιχεία για την ΑΚΖ

Η ανάλυση κύκλου ζωής είναι μία συστηματική μέθοδος που χρησιμοποιείται για την ανάλυση και αξιολόγηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων ενός προϊόντος ή μίας υπηρεσίας. Σύμφωνα με την οδηγία 14040 του ISO [51], μία μελέτη ΑΚΖ αποτελείται από τέσσερα διακριτά στάδια:

- **Καθορισμός στόχου και εύρους μελέτης (Goal and Scope Definition):** Αποτελεί το πρώτο στάδιο μιας ΑΚΖ. Κατά τον καθορισμού του στόχου αναφέρονται οι λόγοι διεξαγωγής, οι προβλεπόμενες εφαρμογές αλλά και οι αποδέκτες της μελέτης. Το εύρος αποτελείται από όλες εκείνες τις πληροφορίες που στοιχειοθετούν το υπό μελέτη σύστημα. Οι επιλογές που γίνονται σε αυτό το στάδιο είναι καθοριστικές για τα επόμενα βήματα και τον τρόπο διεξαγωγής της μελέτης.
- **Απογραφής κύκλου ζωής διεργασίας (Life Cycle Inventory Analysis, LCI):** Απογραφή όλων των εισόδων και εξόδων του συστήματος. Περιλαμβάνει τη συλλογή όλων των δεδομένων που είναι απαραίτητα για την επίτευξη των στόχων του υπό μελέτη συστήματος.
- **Ανάλυση επιπτώσεων κύκλου ζωής (Life Cycle Impact Assessment, LCIA):** Περαιτέρω ανάλυση του συστήματος, με σκοπό την κατανόηση της περιβαλλοντικής σημασίας των επιπτώσεων του.
- **Ερμηνεία αποτελεσμάτων (Interpretation):** Το τελικό στάδιο μίας μελέτης ΑΚΖ, όπου αξιολογούνται τα ευρήματα των προηγούμενων σταδίων της ανάλυσης στο πλαίσιο του στόχου και του εύρους που έχουν καθοριστεί, προκειμένου να

εντοπιστούν πιθανά κενά ή βελτιώσεις και τελικά να εξαχθούν συμπεράσματα και πιθανές συστάσεις.



Εικόνα 3-1: Στάδια ανάλυσης κύκλου ζωής [51]

Όπως φαίνεται και στην εικόνα 3-1, η ΑΚΖ είναι μία επαναληπτική μέθοδος. Κάθε ένα από τα στάδια της μελέτης μπορεί να επηρεάσει τα υπόλοιπα. Για παράδειγμα η αναγνώριση υποσυστημάτων με αυξημένη περιβαλλοντική βαρύτητα που πιθανώς θα προκύψουν από το στάδιο της ανάλυση επιπτώσεων μπορεί να χρησιμοποιηθούν για την αναθεώρηση του καταλόγου απογραφής, αλλά και η ανατροφοδότηση από αυτά τα στάδια μπορεί να αναδείξει χρήσιμες αλλαγές στον καθορισμό του εύρους του συστήματος όπως π.χ. την αλλαγή των ορίων αυτού.

Μία πλήρης ΑΚΖ λαμβάνει υπόψη όλα τα στάδια ζωής, από την κατασκευή και μεταφορά του προϊόντος έως την χρήση και τελικά την απόρριψή του, ωστόσο υπάρχουν περιπτώσεις όπου κρίνεται σκόπιμο να μην λαμβάνονται υπόψη κάποια στάδια του κύκλου ζωής. Αναλόγως των ορίων του συστήματος υιοθετούνται οι παρακάτω ονομασίες:

- **Cradle to Grave:** Ολοκληρωμένη ΑΚΖ. Λαμβάνονται υπόψη όλα τα στάδια του κύκλου ζωής δηλαδή η απόκτηση πρώτων υλών, η κατασκευή και διάθεση του προϊόντος, η χρήση και τελικά η απόρριψη.
- **Cradle to Gate:** Λαμβάνεται υπόψη μόνο το στάδιο απόκτησης υλικών και κατασκευής.

- **Gate to Gate:** Λαμβάνεται υπόψη μόνο η φάση της κατασκευής.
- **Gate to Grave:** Περιλαμβάνει την φάση χρήσης του προϊόντος και την απόρριψή του.

3.3 Προσδιορισμός στόχου και εύρους

Ο προσδιορισμός του στόχου αποτελεί το πρώτο βήμα κάθε μελέτης AKZ στο οποίο σύμφωνα με το πρότυπο ISO θα πρέπει να δηλωθούν με σαφήνεια οι λόγοι διεξαγωγής της μελέτης, αλλά και προβλεπόμενες εφαρμογές της. Σημαντικό είναι επίσης για λόγους επικοινωνίας των αποτελεσμάτων, να αναφέρονται σε αυτό το στάδιο οι περιορισμοί λόγω μεθοδολογικών αποφάσεων, το κοινό στο οποίο απευθύνεται η έρευνα, συγκριτικές έρευνες που πρόκειται να δημοσιευθούν και τέλος τα στοιχεία του υπεύθυνου της έρευνας αλλά και άλλων σημαντικών παραγόντων. Οι αποφάσεις που θα ληφθούν κατά την διάρκεια της AKZ θα πρέπει να ικανοποιούν τον στόχο που έχει καθορισθεί.

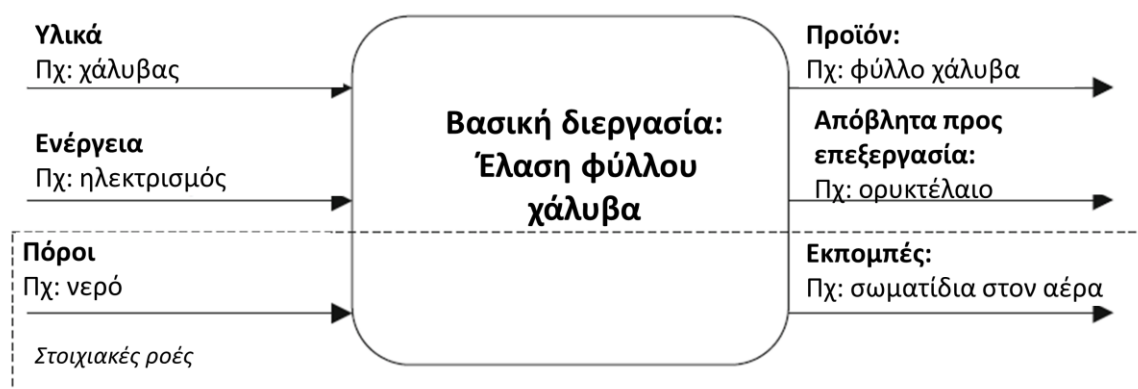
Μετά τον στόχο του συστήματος, το επόμενο βήμα είναι ο προσδιορισμός του εύρους αυτού. Σε αυτό το στάδιο καθορίζονται τα συστήματα που θα αναλυθούν αλλά και το πώς. Ειδικότερα, σύμφωνα με το πρότυπο ISO 14040/14044 [51] [52] το στάδιο αυτό αποτελείται από τα εξής βασικά μέρη:

- **Το σύστημα προϊόντος που θα μελετηθεί (product system):** Το σύνολο των διεργασιών (unit processes) που συνολικά εκτελούν μία ή περισσότερες λειτουργίες και που χρησιμοποιούνται για να μοντελοποιήσουν τον κύκλο ζωής του προϊόντος.
- **Τις λειτουργίες του συστήματος προϊόντος:** Πρόκειται ουσιαστικά για την λειτουργία που προσφέρει το προϊόν στον χρήστη. Για παράδειγμα εάν το προϊόν είναι μία εφημερίδα τότε η λειτουργία αυτής είναι η παροχή ενημέρωσης στον αναγνώστη.
- **Τη λειτουργική μονάδα:** Προκειμένου να είναι εφικτή η σύγκριση με εναλλακτικά συστήματα παροχής της ίδιας λειτουργίας, είναι απαραίτητος ο ορισμός μία κοινής μονάδας μεταξύ αυτών, της λειτουργικής μονάδας. Η λειτουργική μονάδα καθορίζει τα ποιοτικά και ποσοτικά χαρακτηριστικά της λειτουργίας του συστήματος προϊόντος. Ένας ολοκληρωμένος ορισμός της λειτουργικής μονάδας θα πρέπει να απαντάει στις ερωτήσεις "τι;", "πόσο;", "για πόσο;", "πού;" και "πόσο καλά;". Για παράδειγμα η σύγκριση μεταξύ δύο ειδών μπογιάς για εξωτερικούς χώρους θα μπορούσε να γίνει με βάση την εξής λειτουργική μονάδα: "Πλήρης κάλυψη για δέκα χρόνια, ενός ασταρωμένου εξωτερικού τοίχου 1m² στην Ελλάδα, με ένα ενιαίο αδιαφανές χρώμα.
- **Τα όρια του συστήματος:** Πρόκειται για τα όρια μεταξύ το συστήματος προϊόντος, της τεχνόσφαιρας και του περιβάλλοντος. Πρακτικά, στο βήμα αυτό καθορίζεται το ποιες διεργασίες του συστήματος προϊόντος θα ληφθούν υπόψη και ποιες όχι.
- **Την επιλεγμένη μέθοδο κατανομής (επιπτώσεων):** Στην περίπτωση ύπαρξης πολυλειτουργικών διεργασιών στο σύστημα, οι επιπτώσεις αυτών δεν μπορούν να ανατεθούν σε ένα από τα προϊόντα αλλά θα πρέπει να κατανεμηθούν σε αυτά με βάση μία από τις επόμενες μεθόδους, οι οποίες αναφέρονται με τη σειρά προτίμησης που ορίζεται στο σχετικό πρότυπο ISO:

- **Υποδιαίρεση διεργασίας:** Η διεργασία χωρίζεται σε επιπλέον τμήματα, καθένα από τα οποία αφορά ένα προϊόν. Το προϊόν πιστώνεται με τις επιπτώσεις της αντίστοιχης υποδιεργασίας.
 - **Επέκταση ορίων συστήματος:** Αν η διεργασία δεν μπορεί να χωριστεί σε μικρότερα τμήματα, διευρύνονται τα όρια του συστήματος προϊόντος ώστε να περιλαμβάνουν και τα υποπροϊόντα τις διεργασίας.
 - **Κατανομή:** Εάν λόγω έλλειψης δεδομένων για τις εναλλακτικές μεθόδους παραγωγής των υποπροϊόντων δεν είναι εφικτή η επέκταση των ορίων του συστήματος, τότε γίνεται κατανομή των επιπτώσεων της διεργασίας στα επιμέρους προϊόντα χρησιμοποιώντας κάποιο συσχετισμό μεταξύ τους, ο οποίος κατά προτίμηση θα βασίζεται σε κάποια φυσική παράμετρο. Αν και αυτό είναι αδύνατο, τότε εφαρμόζεται οικονομική κατανομή.
- **Τις επιλεγμένες κατηγορίες και μεθόδους ανάλυσης επιπτώσεων**
 - **Τις υποθέσεις που έγιναν και τους περιορισμούς**

3.4 Απογραφή κύκλου ζωής (LCI)

Το στάδιο αυτό αποτελείται από την συλλογή όλων εκείνων των δεδομένων που συνθέτουν το σύνολο του συστήματος αλλά και την μοντελοποίηση των ροών από, προς και διαμέσου αυτού. Τα δεδομένα αυτά αναλόγως της προέλευσης τους χωρίζονται σε εξειδικευμένα (foreground) και γενικά (background) και αναλόγως του είδους τους σε βασικές διεργασίες (unit processes) και φυσικές ροές εισόδου (υλικά, πόροι και ενέργεια) και εξόδου (προϊόντα, απορρίμματα προς επεξεργασία και εκπομπές).



Εικόνα 3-2: παράδειγμα βασικής διεργασίας : απλουστευμένη αναπαράσταση έλασης φύλλου χάλυβα [51]

Τις περισσότερες φορές το στάδιο αυτό είναι το πιο χρονοβόρο σε μία μελέτη ΑΚΖ και σπανίως είναι πρακτικά εφικτό να συλλεχθεί η καλύτερη ποιότητα δεδομένων για όλα τα στοιχεία του συστήματος, λόγω του αδικαιολόγητου (χρονικού και οικονομικού) κόστους που αυτό θα συνεπαγόταν για την μελέτη [50]. Γι' αυτό τον λόγο είναι σημαντικό κατά την δόμηση του καταλόγου απογραφής υλικών να δίνεται περισσότερο προσοχή στα "κομμάτια" εκείνα που συνεισφέρουν περισσότερο στις επιπτώσεις του συστήματος.

3.5 Ανάλυση περιβαλλοντικών επιπτώσεων (LCIA)

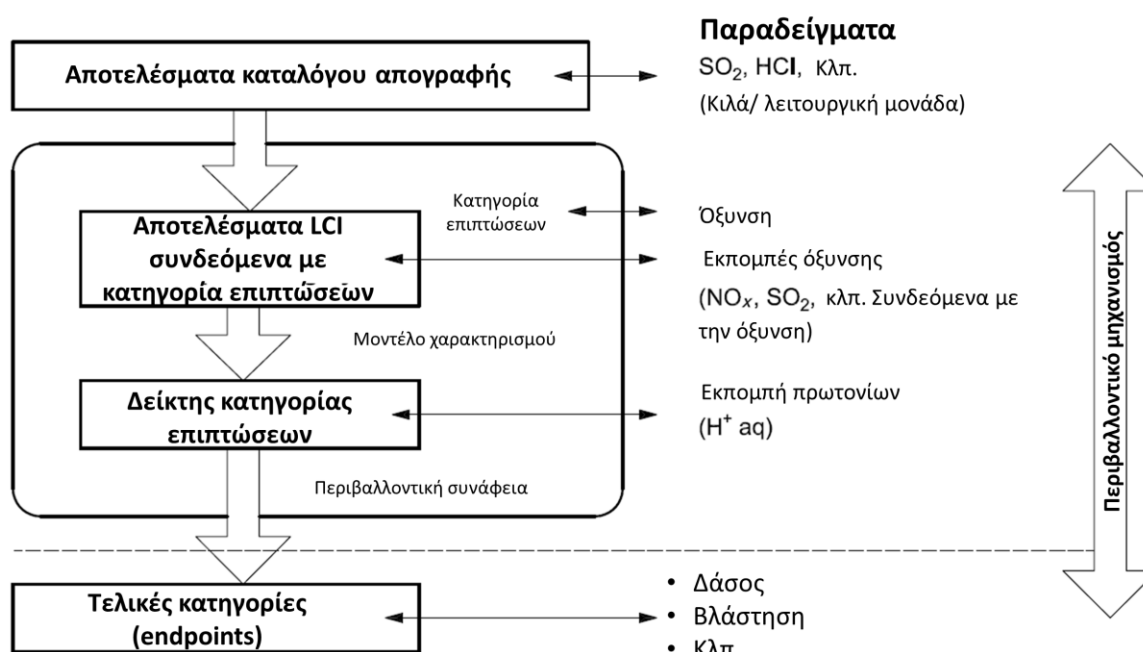
3.5.1 Γενικά στοιχεία

Στο στάδιο αυτό γίνεται η επιλογή των μεθόδων και των δεικτών για την ανάλυση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων ώστε από το σύνολο των πληροφοριών που συλλέχθηκαν κατά το στάδιο της απογραφής για τις στοιχειακές ροές (elementary flows), να προκύψουν οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις του συστήματος. Δεδομένου ότι η διαδικασία αυτή είναι κατά το μεγαλύτερο μέρος της αυτοματοποιημένη από τα λογισμικά AKZ, η διαδικασία αυτή είναι σχετικά γρήγορη. Παρόλα αυτά, οι γνώσεις πάνω στις δυνατότητες και τους περιορισμούς τις κάθε μεθόδου είναι σημαντικές προκειμένου τα αποτελέσματα που παραχθούν και κατ' επέκταση τα συμπεράσματα που θα εξαχθούν να είναι χρήσιμα.

Σύμφωνα με το πρότυπο No. 14040/14044 του ISO, το στάδιο αυτό χωρίζεται στα παρακάτω βήματα, εκ των οποίων τα τρία τελευταία είναι προαιρετικά :

- **Επιλογή κατηγοριών επιπτώσεων, δεικτών κατηγορίας επιπτώσεων καθώς και μοντέλων χαρακτηρισμού:** Η κατηγορίες επιπτώσεων που επιλέγονται πρέπει να είναι αντιπροσωπευτικές των παραμέτρων που επιλέχθηκαν στο στάδιο προσδιορισμού του εύρους του συστήματος. Για κάθε μία από τις κατηγορίες, επιλέγεται ένας δείκτης και ένα μοντέλο χαρακτηρισμού που χρησιμοποιείται για να ποσοτικοποιήσει την εκάστοτε επίπτωση, εκπεφρασμένη σε μονάδες του δείκτη κατηγορίας.
- **Κατηγοριοποίηση:** Σε αυτό το βήμα οι στοιχειακές ροές (πόροι και εκπομπές) που προέκυψαν από την απογραφή του συστήματος, αντιστοιχούνται στις ανάλογες κατηγορίες επιπτώσεων στις οποίες συνεισφέρουν.
- **Χαρακτηρισμός:** Οι στοιχειακές ροές που προέκυψαν από την απογραφή του συστήματος, αξιολογούνται με βάση το μέγεθος της συνεισφοράς τους στην αντίστοιχη κατηγορία επιπτώσεων. Αυτό γίνεται με την χρήση των συντελεστών χαρακτηρισμού (Characterization Factors).
- **Κανονικοποίηση:** Χρησιμοποιείται προκειμένου να καταστεί εφικτή η σύγκριση των αποτελεσμάτων από διαφορετικές κατηγορίες επιπτώσεων, οι οποίες εν γένει εκφράζονται με διαφορετικές μονάδες. Συγκρίνοντας τις πιθανές επιπτώσεις του συστήματος με αυτές ενός συστήματος αναφοράς (π.χ τις εκπομπές μίας χώρας ή ενός εναλλακτικού συστήματος που παρέχει την ίδια λειτουργία) δίνεται η δυνατότητα για εκτίμηση της σημασίας της συνεισφοράς του συστήματος σε κάθε κατηγορία, ως προς το σύστημα αναφοράς.
- **Στάθμιση:** Στο στάδιο αυτό γίνεται μία υποκειμενική εκτίμηση του ποιες επιπτώσεις είναι πιο σημαντικές. Έπεται του σταδίου της Κανονικοποίησης και περιλαμβάνει την ανάθεση συντελεστών βαρύτητας σε κάθε δείκτη των κατηγοριών επιπτώσεων. Σύμφωνα με το πρότυπο 14044 του ISO, αυτό το στάδιο δεν μπορεί να περιλαμβάνεται σε AKZ που πρόκειται να δημοσιευθούν στο κοινό και επίσης τα σταθμισμένα αποτελέσματα πρέπει πάντα να παρέχονται μαζί με τα αστάθμιστα για λόγους διαφάνειας.

- **Ομαδοποίηση:** Εδώ οι διάφορες κατηγορίες επιπτώσεων τοποθετούνται σε ένα ή περισσότερα ευρύτερα σύνολα, τα οποία είναι άμεσα συνδεδεμένα με τον στόχο και το πεδίο εφαρμογής της μελέτης. Η ομαδοποίηση των αποτελεσμάτων μπορεί να γίνει είτε με ιεραρχική κατάταξη τους βάσει μια δεδομένης ιεραρχίας (π.χ. επιπτώσεις υψηλής, μεσαίας και χαμηλής προτεραιότητας), είτε με βάση την επίδραση τους σε παγκόσμιο ή τοπικό επίπεδο.



Εικόνα 3-3 Απεικόνιση παραδείγματος δείκτη κατηγορίας επίπτωσης

3.5.2 Μέθοδοι ανάλυσης και κατηγορίες επιπτώσεων

Σήμερα υπάρχουν αρκετές επιλογές μεθόδου ανάλυσης επιπτώσεων και οι επιλογή της κατάλληλης μεθόδου εξαρτάται από διάφορες παραμέτρους, όπως η γεωγραφία του εξεταζόμενου συστήματος, οι κατηγορίες επιπτώσεων που θα εξεταστούν αλλά και οι επιθυμητές μεθοδολογικές προσεγγίσεις.

Στην παρούσα εργασία επιλέχθηκε η μέθοδος Recipe 2016, η οποία αποτελεί μία αναθεωρημένη έκδοση της προγενέστερης Recipe 2008. Η μέθοδος αυτή περιέχει δύο επίπεδα προσεγγίσεων σχετικά με τις κατηγορίες επιπτώσεων. Η πρώτη είναι το επίπεδο midpoint, το οποίο επικεντρώνεται στην ποσοτικοποίηση των ισοδύναμων εκπομπών σε 18 κατηγορίες επιπτώσεων, ενώ η δεύτερη, επίπεδο endpoint, αναλύει την επίπτωση αυτών σε τρεις βασικές κατηγορίες, ήτοι στην ανθρώπινη υγεία, στα οικοσυστήματα και στους πόρους. Ως προς τον χρονικό ορίζοντα της ανάλυσης, η μέθοδος δίνει τρεις επιλογές. Αυτές είναι η ατομικιστική (individualist), η ιεραρχική (hierarchist) και η εξισωτική προοπτική (egalitarian perspective), οι οποίες αναφέρονται σε βραχυπρόθεσμο (συνήθως 20 έτη), μεσοπρόθεσμο (100 έτη, συχνότερα χρησιμοποιούμενη) και μακροπρόθεσμο (1000 έτη) διάστημα αντίστοιχα.

Σχετικά με το επίπεδο endpoint, οι δείκτες χαρακτηρισμού για τις κατηγορίες ανθρώπινης υγείας, οικοσυστημάτων και πόρων, είναι αντίστοιχα οι εξής:

- Οι επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία μετρούνται σε χρόνια απώλειας ζωής και χρόνια διαβίωσης υπό καθεστώς αναπηρίας. Χρησιμοποιείται ο δείκτης **DALYs (Disability Adjusted Life Years)** ο οποίος μετριέται σε χρόνια.
- Οι επιπτώσεις στα οικοσυστήματα εκφράζονται με όρους τοπικής εξαφάνισης ειδών σε κατά τη διάρκεια ενός χρονικού διαστήματος. Μετριέται σε αριθμό ειδών επί χρόνια (**species.yrs**).
- Η έλλειψη πόρων εκφράζεται με όρους μελλοντικής αύξησης κόστους παραγωγής πόρων (δηλαδή εξόρυξης ορυκτών πρώτων υλών και μεταλλευμάτων). Μετριέται σε δολάρια (**dollars**)

Τέλος, οι κατηγορίες επιπτώσεων σε επίπεδο midpoint και οι δείκτες χαρακτηρισμού αυτών, της μεθόδου Recipe 2016 φαίνονται παρακάτω [54] :

- **Κλιματική Αλλαγή (KA, Climate Change)**: Ο συντελεστής χαρακτηρισμού ,ο οποίος βασίζεται στην έκθεση της Διακυβερνητικής Επιτροπής για την Κλιματική Αλλαγή (IPCC) για το έτος 2013, είναι το **Δυναμικό Θέρμανσης του Πλανήτη (ΔΘ, Global Warming Potential GWP)** και μετριέται σε κιλά ισοδύναμων εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα, kg CO₂-eq.
- **Εξάντληση Όζοντος Στρατόσφαιρας (EO, Ozone Depletion)**: Λαμβάνει υπόψη την καταστροφή του στρώματος όζοντος της στρατόσφαιρας από ανθρωπογενείς εκπομπές που το καταστρέφουν (Ozone Depleting Substances ODP). Ο συντελεστής χαρακτηρισμού μετριέται σε κιλά ισοδύναμων εκπομπών τριχλωροφθορομεθανίου, kg CFC-11-eq.
- **Ιονίζουσα Ακτινοβολία (IA, Ionizing Radiation)**: Λαμβάνει υπόψη τα επίπεδα έκθεσης του παγκόσμιου πληθυσμού στην ιονίζουσα ακτινοβολία. Μετριέται σε ισοδύναμες εκπομπές του ραδιενεργού ισότοπου Κοβάλτιο-60, kBq Co-60-eq.
- **Σχηματισμός Μικροσωματιδίων (ΣΜ, Fine particulate matter formation)**: Ο συντελεστής χαρακτηρισμού λαμβάνει υπόψη τις εκπομπές αιωρούμενων μικροσωματιδίων μικρότερων από 2,5 μm (PM2.5). Μετριέται σε kg PM2.5-eq.
- **Δημιουργία Όζοντος Τροπόσφαιρας, Χερσαία Οικοσυστήματα (ΔΟΧ, Photochemical Ozone Formation, Terrestrial Ecosystems)**: Ο συντελεστής χαρακτηρισμού λαμβάνει υπόψη την μεταβολή στην απορρόφηση όζοντος (ή άλλων δραστικών ενώσεων του οξυγόνου) βάση των εκπομπών οξειδίων του αζώτου NO_x και των πτητικών οργανικών ενώσεων πλην του μεθανίου (NMVOC). Μετριέται σε kg NO_x-eq.
- **Δημιουργία Όζοντος Τροπόσφαιρας, Ανθρώπινη Υγεία (ΔΟΑ, Photochemical Ozone Formation, Human Health)**: Ομοίως με την προηγούμενη κατηγορία. Μονάδα μέτρησης kg NO_x-eq.
- **Όξυνση Χερσαίων Οικοσυστημάτων (OXO, Terrestrial Acidification)**: Ο συντελεστής χαρακτηρισμού είναι το δυναμικό όξυνσης το οποίο υπολογίζεται βάση του παράγοντα παγκόσμιου μέσου ποσοστού εκπομπών SO₂ και μετριέται σε kg SO₂-eq.

- **Ευτροφισμός Γλυκού Νερού (ΕΓΝ, Freshwater eutrophication):** Λαμβάνονται υπόψη οι εκπομπές φωσφορικών ενώσεων και μετριέται σε κιλά ισοδύναμων εκπομπών φωσφόρου στο γλυκό νερό, kg P-eq
- **Θαλάσσιος Ευτροφισμός (ΘΕ, Marine Eutrophication):** Λαμβάνονται υπόψη οι εκπομπές αζωτούχων ενώσεων και μετριέται σε κιλά ισοδύναμων εκπομπών αζώτου σε θαλάσσια οικοσυστήματα, kg N-eq
- **Κατηγορίες Τοξικότητας (Human Toxicity and Ecotoxicity):** Η κατηγορία χωρίζεται περαιτέρω σε πέντε κατηγορίες, την **Χερσαία Οικοτοξικότητα (ΧΟ, Terrestrial Ecotoxicity)**, την **Οικοτοξικότητα Γλυκού Νερού (ΟΓΝ, Freshwater Ecotoxicity)**, την **Θαλάσσια Οικοτοξικότητα (ΘΟ, Marine Ecotoxicity)**, την **Καρκινογόνο Τοξικότητα στον Άνθρωπο (ΚΤΑ, Human Carcinogenic Toxicity)** και την **Μη Καρκινογόνο Τοξικότητα στον Άνθρωπο (ΜΚΤΑ, Non-Carcinogenic Human Toxicity)**. Λαμβάνεται υπόψη η συσσώρευση και τοξικότητα ενός χημικού. Μετριέται σε κιλά ισοδύναμων εκπομπών 1,4-Διχλωροβενζολίου, kg (1,4-DCB)- eq.
- **Αλλαγή χρήσης Γης (ΑΧΓ, Land Use) :** Η έκταση γης της οποίας η χρήση αλλάζει ή καταλαμβάνεται. Μετριέται σε m².
- **Εξάντληση Πόρων Μεταλλευμάτων (ΕΠΜ, Mineral Resource Scarcity) :** Μετριέται σε κιλά ισοδύναμου χαλκού που εξορύσσεται, kg Cu-eq.
- **Εξάντληση Ορυκτών Πόρων (ΕΟΠ, Fossil Resource Scarcity) :** Μετριέται σε κιλά χρήσης ισοδύναμου πετρελαίου, kg Oil-eq, μετρούμενη βάση της υψηλής θερμογόνου ικανότητας του καυσίμου.
- **Χρήση Νερού (ΧΝ, Water Use) :** Η ποσότητα γλυκού νερού που χρησιμοποιείται μετρούμενη σε κυβικά, m³.

3.6 Ερμηνεία αποτελεσμάτων

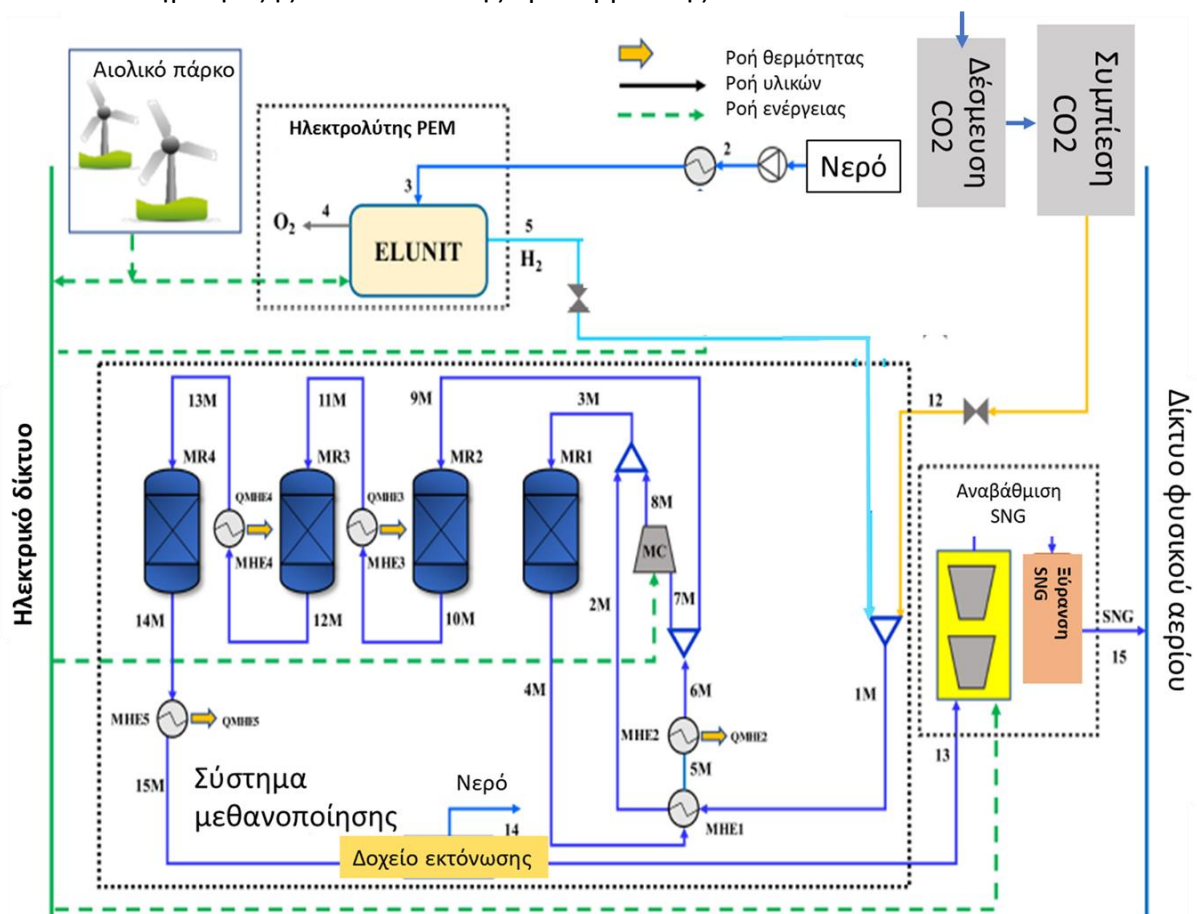
Στο τελευταίο στάδιο της ΑΚΖ, γίνεται η ανάλυση των αποτελεσμάτων από τα προηγούμενα στάδια και εξάγονται τα κατάλληλα συμπεράσματα. Ειδικότερα, σε αυτό το στάδιο μιας μελέτης ΑΚΖ γίνεται η αναγνώριση των σημαντικότερων ζητημάτων που προκύπτουν από τα αποτελέσματα των σταδίων της ανάλυσης απογραφής και επιπτώσεων του συστήματος. Συνήθως σε αυτό το σημείο γίνεται ανατροφοδότηση σε προηγούμενο στάδιο της μελέτης, δίνοντας μεγαλύτερη έμφαση στα σημεία αυτά. Ύστερα γίνεται ανάλυση της ποιότητας των αποτελεσμάτων η οποία συνήθως περιλαμβάνει αξιολόγηση πληρότητας, συνέπεια και ευαισθησίας. Τέλος, αναφέρονται τα συμπεράσματα της μελέτης, πιθανοί περιορισμοί που προέκυψαν κατά την διεξαγωγή της αλλά και προτάσεις για περαιτέρω μελέτη.

4. Διάταξη/ Υπο Μελέτη Σύστημα και ΑΚΖ

4.1 Εισαγωγή

Στην παρούσα διπλωματική μελετήθηκε μία μονάδα Power-to-Methane (PtM) ή ορθότερα Power-to-Synthetic-Natural-Gas (PtSNG) η οποία λαμβάνει διοξείδιο του άνθρακα από ένα εργοστάσιο παραγωγής τσιμέντου. Λόγω της έλλειψης εξειδικευμένων δεδομένων (foreground data) σχετικά με την λειτουργία και την κατασκευή μίας τέτοιας μονάδας, οι επιλογές για τα επιμέρους τμήματα του συστήματος έγιναν κυρίως με βάση την διαθέσιμη βιβλιογραφία, ενώ όπου οι αναγκαίες πληροφορίες δεν ήταν διαθέσιμες έγιναν απαραίτητες υποθέσεις, οι οποίες αναφέρονται όλες στο κεφάλαιο του καταλόγου απογραφής. Τα βασικά μέρη από τα οποία αποτελείται η μονάδα και η διάταξή τους, αναφέρονται παρακάτω:

1. Μονάδα ηλεκτρόλυσης
2. Τμήμα δέσμευσης και συμπίεσης διοξειδίου του άνθρακα
3. Σύστημα μεθανοποίησης διοξειδίου του άνθρακα
4. Σύστημα αναβάθμισης συνθετικού φυσικού αερίου
5. Σύστημα ψύξης και εναλλάκτης προθέρμανσης



Εικόνα 4-1: Σχηματική αναπαράσταση εξεταζόμενης διάταξης [22]

Η διάταξη που απεικονίζεται παραπάνω αποτελεί το σύστημα που μοντελοποίησαν οι Perna et al. [22] και επιλέχθηκε ως βασική διάταξη για την παρούσα εργασία καθώς ικανοποιεί βασικές προϋποθέσεις όπως η αξιοπιστία των δεδομένων, η ομοιότητά της με το επιθυμητό σύστημα της παρούσας εργασίας αλλά και η ικανοποιητική σύσταση παραγόμενου συνθετικού φυσικού αερίου ώστε να μπορεί να γίνει έγχυσή του στο υπάρχον δίκτυο φυσικού αερίου. Στην μελέτη των Perna et al. δεν λήφθηκε υπόψη το σύστημα δέσμευσης διοξειδίου του άνθρακα, το οποίο προστέθηκε για τους σκοπούς της παρούσας εργασίας, ενώ η δεξαμενή υδρογόνου δεν λήφθηκε υπόψη λόγω έλλειψης δεδομένων.

Η διάταξη αυτή, εκτός της λεπτομερούς ανάλυσης με το γνωστό λογισμικό θερμοδυναμικής *Aspen Plus*[®], που πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια της προαναφερθείσας εργασίας, αντλεί δεδομένα σχετικά με την μονάδα μεθανοποίησης από την διεργασία μεθανοποίησης *Tremp*™. Η διεργασία αυτή αναπτύχθηκε το 1970 από την εταιρεία *Haldor Topsøe* και έχει δοκιμαστεί από τότε σε πολλές πειραματικές και ημι-εμπορικές εφαρμογές παραγωγής SNG [54].

4.2 Περιγραφή διεργασίας

Το απιονισμένο νερό που χρησιμοποιεί ο ηλεκτρολύτης θερμαίνεται και συμπιέζεται έως τις συνθήκες λειτουργίας αυτού, δηλαδή 20 bar και 55 °C, όπου και παράγονται το υδρογόνο και το οξυγόνο. Το απαιτούμενο για την διεργασία διοξείδιο του άνθρακα προέρχεται από τα καυσαέρια μίας μονάδας τσιμέντου τα οποία δεσμεύονται και διαχωρίζονται σε κατάλληλη διάταξη. Το διοξείδιο του άνθρακα το οποίο εξέρχεται σε πίεση 1,6 bar συμπιέζεται έως την πίεση λειτουργίας του συστήματος μεθανοποίησης, ήτοι 20 bar. Πριν την είσοδο στον πρώτο αντιδραστήρα το παραγόμενο υδρογόνο αναμιγνύεται με το διοξείδιο του άνθρακα και το μίγμα διέρχεται από προθερμαντήρα όπου η θερμοκρασία του αυξάνεται στους 250 °C. Οι θερμοκρασίες εξόδου από τους τέσσερις διαδοχικούς αντιδραστήρες είναι 561, 412, 301 και 260 °C αντίστοιχα. Μετά το τμήμα μεθανοποίησης το παραγόμενο μίγμα περιέχει υψηλά ποσοστά νερού, οπότε ψύχεται και εισέρχεται σε δοχείο εκτονώσεως όπου και αφαιρείται η μεγαλύτερη ποσότητα αυτού. Προκειμένου το παραγόμενο SNG να είναι κατάλληλο για έγχυση στο δίκτυο φυσικού αερίου, περνάει από το σύστημα αναβάθμισης, στο οποίο αφού συμπιεστεί έως τα 35 bar διέρχεται από μεμβράνης ξήρανσης όπου και δεσμεύεται το υπόλοιπο νερό. Τέλος το καθαρό SNG εγχύεται στο δίκτυο διανομής φυσικού αερίου της Αυστρίας.

Στη συνέχεια γίνεται περιγραφή της μεθοδολογίας που ακολουθήθηκε για την ανάλυση του κύκλου ζωής του επιλεγμένου συστήματος, σύμφωνα με τα βήματα που ορίζονται στο πρότυπο 14040/14044 του ISO.

4.3 Στόχος μελέτης (Goal definition)

4.3.1 Προβλεπόμενη εφαρμογή και απευθυνόμενο κοινό

Η παρούσα μελέτη κύκλου ζωής έγινε στα πλαίσια εκπόνησης της διπλωματικής εργασίας του υπογράφοντος και συνεπώς, τόσο το περιεχόμενο όσο και τα αποτελέσματα αυτής προορίζονται κυρίως για την διεύρυνση και ενίσχυση του ερευνητικού υπόβαθρου της πανεπιστημιακής κοινότητας και ειδικότερα του εργαστηρίου Ατμοκινητήρων και Λεβήτων του ΕΜΠ, πάνω στα θέματα τα οποία αφορά.

4.3.2 Περιορισμοί

Λόγω της έλλειψης εξειδικευμένων δεδομένων από κατασκευαστές ή διαχειριστές/χρήστες σχετικών συστημάτων τόσο για τα στάδια κατασκευής όσο και για την λειτουργία αυτών, το σύνολο των χρησιμοποιούμενων δεδομένων προέρχεται από την διαθέσιμη βιβλιογραφία αλλά και την βάση δεδομένων *Ecoinvent 3.5*. Τα δεδομένα αυτά αλλά και οι υποθέσεις που υιοθετήθηκαν αναφέρονται λεπτομερώς στο στάδιο απογραφής.

4.3.3 Σκοπός εργασίας

Ο σκοπός της παρούσας εργασίας είναι να εντοπίσει, να ποσοτικοποιήσει και να αξιολογήσει, με όσο το δυνατόν πληρέστερο και ορθότερο τρόπο, τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις ή/και τα οφέλη του κύκλου ζωής της βασικής διάταξης, όπως αυτό περιγράφηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, υπό τα διαφορετικά σενάρια που διατυπώνονται στην παράγραφο ορισμού των ορίων της μελέτης.

4.4 Πεδίο εφαρμογής μελέτης

4.4.1 Εξεταζόμενο σύστημα προϊόντος

Η διάταξη που περιεγράφηκε στην αρχή του παρόντος κεφαλαίου μαζί με τα συστήματα δέσμευσης και συμπίεσης διοξειδίου του άνθρακα, αποτελούν την βασική διάταξη. Το **σύστημα προϊόντος** αποτελείται από τις όλες διεργασίες και τις συνεπαγόμενες από αυτές ροές προϊόντων και στοιχειακές ροές, οι οποίες μοντελοποιούν πλήρως τον κύκλο ζωής του προϊόντος, δηλαδή του συνθετικού φυσικού αερίου, μέχρι και την «πύλη» της μονάδας, οπότε πρόκειται για μία AKZ “Cradle to Gate”, όπου λήφθηκαν υπόψη τα στάδια απόκτησης πρώτων υλών, κατασκευής, χρήσης και απόρριψης των επιμέρους τμημάτων της βασικής διάταξης.

4.4.2 Λειτουργία συστήματος και λειτουργική μονάδα

Η λειτουργία του συστήματος είναι η παραγωγή συνθετικού φυσικού αερίου η σύσταση του οποίου να πληροί της προδιαγραφές του δικτύου φυσικού αερίου.

Ως λειτουργική μονάδα ορίζεται ο ένας τόνος συνθετικού φυσικού αερίου παραγόμενου στην Αυστρία επαρκούς ποιότητας για έγχυση στο δίκτυο φυσικού αερίου της Αυστρίας (1 tonne of grid injection quality SNG produced in Austria). Η επιλογή αυτή έγινε ώστε να επιτρέπει την εύκολη σύγκριση με το συμβατικό φυσικό αέριο.

4.4.3 Πλαίσιο μοντελοποίησης και διαχείριση δευτερευόντων προϊόντων

Προκειμένου να ληφθεί υπόψη η επίδραση της απαγόμενης θερμότητας από το σύστημα ψύξης, για την οποία γίνεται η υπόθεση ότι διατίθεται για σκοπούς θέρμανσης, υιοθετείται η τεχνική επέκτασης των ορίων του συστήματος, ενώ το οξυγόνο θεωρείται ότι απελευθερώνεται στην ατμόσφαιρα.

Η μοντελοποίηση που χρησιμοποιήθηκε είναι αυτή της αποδίδουσας ανάλυσης κύκλου ζωής (Attributional LCA) ενώ για την μοντελοποίηση των διεργασιών χρησιμοποιήθηκε το σετ δεδομένων “Allocation, cut-off by classification, Unit” της *Ecoinvent 3.5*.

4.4.4 Ορισμός βασικού συστήματος και ορίων μελέτης

Ως **βασικό σύστημα** ορίζεται το σύστημα προϊόντος στο οποίο :

- Η ισχύς του συστήματος ηλεκτρόλυσης είναι 20 MW.
- Η κατανάλωση ενέργειας στο σύστημα ηλεκτρόλυσης καλύπτεται από αιολικά.
- Το παραγόμενο οξυγόνο απελευθερώνεται στην ατμόσφαιρα.
- Η θερμότητα που απάγεται από τους αντιδραστήρες παρέχεται για θέρμανση.

Ως προς την τοποθεσία της διάταξης, αυτή ορίζεται στα 30 χιλιόμετρα νοτιοδυτικά της πρωτεύουσας της Αυστρίας, Βιέννης. Η απόφαση αυτή λήφθηκε με γνώμονα την εγγύτητα με το εργοστάσιο παραγωγής τσιμέντου, έτσι ώστε η μεταφορά το CO₂ να μπορεί να γίνει απευθείας μέσω αγωγού.

Ως **σύστημα αναφοράς** ορίζεται η διάθεση (παραγωγή και μεταφορά) 1 τόνου φυσικού αερίου στην Αυστρία.

4.4.5 Κατηγορίες επιπτώσεων και μέθοδοι ανάλυσης

Οι μέθοδοι που χρησιμοποιήθηκαν για την ανάλυση επιπτώσεων του συστήματος είναι η *ReCiPe 2016 Midpoint* και *Endpoint* με ιεραρχική προοπτική καθώς αυτές αποτελούν τις περισσότερο χρησιμοποιούμενες μεθόδους.

Ως προς τις κατηγορίες επιπτώσεων λήφθηκαν υπόψη και οι 16 χρησιμοποιήθηκαν επιπλέον κατηγορίες με σκοπό την κατά το δυνατόν πληρέστερη αποτύπωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων του συστήματος.

4.4.6 Εξεταζόμενα σενάρια

Για μία ολοκληρωμένη εικόνα των περιβαλλοντικών επιδόσεων του συστήματος θεωρείται σκόπιμη η εξέταση του υπό το σενάρια που διατυπώνονται παρακάτω :

- Ανάλυση περιβαλλοντικών επιπτώσεων βασικού συστήματος.
- Σύγκριση βασικού συστήματος με σύστημα αναφοράς (φυσικό αέριο).
- Σύγκριση συστήματος αναφοράς και εξεταζόμενου συστήματος υπό διαφορετικές πηγές ηλεκτρικής ενέργειας.
- Σύγκριση τριών μεγεθών διάταξης: 20, 500 και 1300 MW.

Πραγματοποιήθηκε επίσης ανάλυση ευαισθησίας προκειμένου να διερευνηθεί η συνεισφορά σημαντικών παραμέτρων στην συνολική περιβαλλοντική επίδοση του συστήματος. Οι περιπτώσεις που εξετάστηκαν είναι οι παρακάτω :

- Μεταβολή ολικών ενεργειακών καταναλώσεων συστήματος.
- Μεταβολή συντελεστή διαθεσιμότητας (Availability Factor, AF) βασικού συστήματος.
- Μεταβολή ετών λειτουργίας διάταξης
- Μεταβολή ποσότητας υλικών κατασκευής.

4.5 Κατάλογος απογραφής συστήματος

Για την κατασκευή του καταλόγου απογραφής χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα από την διαθέσιμη βιβλιογραφία αλλά και από την έκδοση 3.5 της βάσης δεδομένων *Ecoinvent*.

4.5.1 Βασικές παραδοχές

- Η τοποθεσία της εγκατάστασης επιλέχθηκε δίπλα στο εργοστάσιο τσιμέντου της εταιρίας Lafarge που βρίσκεται 30 χιλιόμετρα νοτιοδυτικά του λιμανιού Βιέννης.
- Ο συντελεστής διαθεσιμότητας της εγκατάστασης ορίζεται ίσος με 0,7 και τα χρόνια λειτουργίας αυτής είναι 20 έτη.

4.5.2 Μεταφορές

Για τις μεταφορές των υλικών έγιναν η παρακάτω υποθέσεις :

- Για τα υλικά της κατηγορίας “Market for” που ήταν μοντελοποιημένα για παγκόσμια γεωγραφία θεωρήθηκε επιπλέον μεταφορά ίση με 30 χιλιόμετρα, η οποία αντιστοιχεί στην απόσταση της μονάδας από το λιμάνι της Βιέννης.
- Για τα υλικά “Market for” μοντελοποιημένα για την Ευρωπαϊκή γεωγραφία δεν λήφθηκαν υπόψη επιπλέον μεταφορές, ενώ τα υλικά κατηγορίας “production for” της ίδια γεωγραφίας θεωρήθηκε ότι παράγονται στην Γερμανία και λήφθηκε υπόψη μεταφορά με φορτηγό για απόσταση 737 χιλιομέτρων.

- Για την απόρριψη των υλικών θεωρήθηκε μεταφορά 100 χιλιομέτρων μέχρι το σημείο διαλογής.
- Όλες οι μεταφορές πραγματοποιούνται με φορηγό ωφέλιμου φορτίου μεγαλύτερου των 32 τόνων εκτός των περιπτώσεων μεμονωμένων μεταφορών όπου χρησιμοποιείται φορηγό μέγιστου ωφέλιμου φορτίου 7,5 τόνων.

4.5.3 Φάση κατασκευής

4.5.3.1 Βασικές παραδοχές και περιορισμοί

- Η μοντελοποίηση του ανοξείδωτου χάλυβα έγινε με το υλικό «Steel, chromium steel 18/8, market for»
- Η αναγωγή ποσοτήτων των υλικών για τα διάφορα μεγέθη της εγκατάστασης έγινε χρησιμοποιώντας την εξίσωση αναγωγής κόστους [55] [56] με συντελεστή αναγωγής ίσο με 0,7 η οποία αποτελεί την συνηθέστερα χρησιμοποιούμενη τιμή [57] .
- Όπου δεν ήταν γνωστή η απαιτούμενη ενέργεια κατασκευής χρησιμοποιήθηκε η διεργασία “average product manufacturing”.
- Λόγω έλλειψης δεδομένων δεν λήφθηκε υπόψη η κατασκευή του τμήματος δέσμησης CO₂, των σωληνώσεων και άλλων βοηθητικών εξαρτημάτων.

4.5.3.2 Μονάδα ηλεκτρόλυσης

Για την μοντελοποίηση της κατασκευής της μονάδας ηλεκτρόλυσης χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα από την διαθέσιμη βιβλιογραφία [58], [38], που αντιστοιχούν σε μία μονάδα PEM ονομαστικής ισχύος 1 MW και για τα οποία έγινε αναγωγή των ποσοτήτων των υλικών στα υπό μελέτη μεγέθη, δηλαδή 20, 500 και 1300 MW. Οι ποσότητες των υλικών για κάθε μέγεθος συνοψίζονται στους επόμενους πίνακες.

Πίνακας 4-1 Υλικά και ενέργεια κατασκευής συστήματος ηλεκτρόλυσης

Υλικό	Ποσότητα			Μονάδα
	Μέγεθος Συστήματος (MW)			
	20	500	1303	
Χάλυβας χαμηλής κραμάτωσης	39080.7	371980.6	727149.1	kg
Ανοξείδωτος χάλυβας	15469.4	147242.3	287829.8	kg
Αλουμίνιο	219.8	2092.4	4090.2	kg
Χαλκός	36.6	348.7	681.7	kg
Πολυαιθυλένιο	2442.5	23248.8	45446.8	kg
Ηλεκτρονικά εξαρτήματα	1628.4	15499.2	30297.9	kg
Τσιμέντο	46254.3	440260.6	860623.1	kg
Ηλεκτρική ενέργεια	13189.7	125543.4	245412.8	kWh
Θερμική ενέργεια	17423.5	165841.3	324187.3	MJ

Πίνακας 4-2 Κατάλογος υλικών συντήρησης συστήματος ηλεκτρόλυσης

Υλικό	Ποσότητα			Μονάδα
	Μέγεθος Συστήματος (MW)			
	20	500	1303	
Ξυλάνθρακας	59.9	570.1	1114.4	kg
Πλατίνα	0.2	1.7	3.3	kg
Ανοξείδωτος χάλυβας	575.0	5472.8	10698.2	kg
Διοξείδιο του τιτανίου	16.8	159.6	312.0	kg

4.5.3.3 Μονάδα μεθανοποίησης, σύστημα αναβάθμισης και συμπίεσης CO₂

Για την μοντελοποίηση των συστημάτων μεθανοποίησης, αναβάθμισης SNG και συμπίεσης CO₂ χρησιμοποιήθηκαν υλικά από μελέτη [37] η οποία εξέταζε ένα σύστημα παραγωγής 36 κιλών μεθανίου την ώρα. Λόγω έλλειψης δεδομένων για την μόνωση του αντιδραστήρα, αυτή θεωρήθηκε ίση με το 5 % του βάρους του αντιδραστήρα. Για την ποσότητα του καταλύτη νικελίου χρησιμοποιήθηκε μέση τιμή κατανάλωσης ίση με 1,29E-05 κιλά καταλύτη ανά κιλό παραγόμενου μεθανίου [59], ενώ υποτέθηκε ότι η σύσταση του είναι 19 % νικέλιο και 81 % αλουμίνιο [37], [49]. Για την ποσότητα ανοξείδωτου χάλυβα του εναλλάκτη προθέρμανσης έγινε η υπόθεση ότι αυτή είναι 6,5 φορές μεγαλύτερη από την ποσότητα του εναλλάκτη ψύξης. Η αναλογία αυτή υπολογίστηκε με βάση τον κατάλογο απογραφής μίας μελέτης [60] που συγκρίνει αερόψυκτους με υδρόψυκτους συμπυκνωτές. Για τους συμπίεστες διοξειδίου του άνθρακα και συνθετικού φυσικού αερίου τα υλικά κατασκευής αντλήθηκαν από την βιβλιογραφία και αφορούν διαφραγματικούς συμπίεστες [37]. Τα χρησιμοποιούμενα υλικά και οι αντίστοιχες ποσότητες, μετά την αναγωγή τους για την εκάστοτε περίπτωση, παρουσιάζονται παρακάτω.

Πίνακας 4-3 Κατάλογος υλικών και διεργασιών συστήματος μεθανοποίησης

Υλικό/Διεργασία	Ποσότητα			Μονάδα
	Μέγεθος Συστήματος (MW)			
	20	500	1303	
Αντιδραστήρας				
Ανοξειδωτος χάλυβας	5932.5	59294.7	123582.3	kg
Διογκωμένο πολυστυρένιο	296.6	2964.7	6179.1	kg
Καταλύτης				
Κράμα αλουμινίου	949.4	25450.8	72665.7	kg
Νικέλιο 99,5 %	222.7	5969.9	17045.1	kg
Εναλλάκτες ψυκτικού κυκλώματος				
Ανοξειδωτος χάλυβας	29645.4	296304.2	617558.4	kg
Θερμή έλαση ανοξειδωτου χάλυβα	29645.4	296304.2	617558.4	kg
Εναλλάκτης προθέρμανσης				
Ανοξειδωτος χάλυβας	64231.6	641992.4	1338043.2	kg
Θερμή έλαση ανοξειδωτου χάλυβα	64231.6	641992.4	1338043.2	kg

Πίνακας 4-4 Κατάλογος υλικών συστήματος αναβάθμισης SNG

Υλικό/Διεργασία	Ποσότητα			Μονάδα
	Μέγεθος Συστήματος (MW)			
	20	500	1303	
Δοχείο εκτόνωσης				
Ανοξειδωτος χάλυβας	2627.2	25006.7	54729.3	kg
Θερμή έλαση ανοξειδωτου χάλυβα	2627.2	25006.7	54729.3	kg
Μεμβράνη αφύγρανσης				
Ανοξειδωτος χάλυβας	1525.5	14520.0	31778.3	kg
Θερμή έλαση ανοξειδωτου χάλυβα	1525.5	14520.0	31778.3	kg
Ίνες κυτταρίνης	169.5	1613.3	3530.9	kg
Συμπιεστής				
Σφυρήλατο κράμα αλουμινίου	165.3	1573.0	3442.6	kg
Χαλκός	123.7	1177.7	2577.6	kg
Ανθρακοχάλυβας	4081.5	38849.2	85024.6	kg
Μόνωση σωλήνωσης	41.5	395.3	865.1	kg
Συρματοποίηση χαλκού	123.7	1177.7	2577.6	kg
Χυτοσίδηρος	1655.2	15754.3	34479.5	kg
Αιθυλενογλυκόλη	19.5	185.5	406.1	kg
Θερμή έλαση ανοξειδωτου χάλυβα	1117.0	10631.9	23268.8	kg
Θερμή έλαση ανθρακοχάλυβα	1103.4	10502.8	22986.3	kg
Ανοξειδωτος χάλυβας	1117.0	10631.9	23268.8	kg

Πίνακας 4-5 Κατάλογος απογραφής συμπιεστή διοξειδίου του άνθρακα

Υλικό	Ποσότητα			Μονάδα
	Μέγεθος Συστήματος (MW)			
	20	500	1303	
Σφυρήλατο κράμα αλουμινίου	233.9	2337.9	4872.7	kg
Χαλκός	175.4	1753.4	3654.5	kg
Ανθρακοχάλυβας	5762.1	57592.1	120033.7	kg
Μόνωση σωλήνωσης	58.5	584.5	1218.2	kg
Συρματοποίηση χαλκού	175.4	1753.4	3654.5	kg
Χυτοσίδηρος	2336.5	23353.7	48673.8	kg
Αιθυλενογλυκόλη	27.1	271.1	564.9	kg
Θερμή έλαση ανοξειδωτου χάλυβα	1577.2	15763.9	32855.2	kWh
Θερμή έλαση ανθρακοχάλυβα	1557.7	15569.1	32449.2	MJ
Ανοξειδωτος χάλυβας	1577.2	15763.9	32855.2	kg

4.5.4 Φάση λειτουργίας και απόρριψης

4.5.4.1 Γενικά στοιχεία

Για την εγκατάσταση έγινε η παραδοχή ότι ο συντελεστής διαθεσιμότητας – εξαρτώμενος κυρίως από την λειτουργία του συστήματος ηλεκτρόλυσης - είναι ίσος με 0,7 και συνεπώς οι ετήσιες ώρες λειτουργίας του συστήματος είναι 6132. Δεδομένης της στοιχειομετρικής αναλογίας που καθορίζεται από την εξίσωση Sabatier αλλά και της παραδοχής ότι το διοξείδιο του άνθρακα είναι σε επάρκεια καθ’ όλη την διάρκεια λειτουργίας της εγκατάστασης, το υδρογόνο θεωρήθηκε ως περιοριστικό αντιδρών. Συνεπώς για το εκάστοτε μέγεθος της εγκατάστασης έγινε υπολογισμός του παραγόμενου υδρογόνου και από αυτό υπολογίσθηκαν οι υπόλοιπες ροές. Εξαιρέση αποτελεί η περίπτωση δέσμευσης όλου του CO₂ από το εργοστάσιο τσιμέντου, όπου η απαιτούμενη ποσότητα υδρογόνου υπολογίσθηκε βάση αυτού, το οποίο ορίσθηκε ίσο με 45 κιλά CO₂ ανά δευτερόλεπτο. Η ροές των στοιχείων φαίνονται στον επόμενο πίνακα.

Πίνακας 4-6 Ισολογισμοί μαζών συστήματος

Μέγεθος συστήματος [MW]	20	500	1302.7
Ισολογισμοί μαζών αντίδρασης Sabatier [kg/hr]			
Καταναλισκόμενο H ₂	388.6	10416.7	29741.1
Καταναλισκόμενο CO ₂	2116.5	56739.6	162000
Παραγόμενο CH ₄	771.7	20687.5	59065.9
Παραγόμενο H ₂ O	1733.4	46468.8	132675.2
Ισολογισμοί μαζών αντίδρασης ηλεκτρόλυσης [kg/hr]			
Παραγόμενο H ₂	388.6	10416.7	29741.1
Παραγόμενο O ₂	3077.8	82508.3	235573.4
Παραγόμενο H ₂ O	3466.4	92924.9	265314.5

Η χρήση λαδιού λίπανσης στα κινούμενα μέρη της εγκατάστασης δεν λήφθηκε υπόψη λόγω έλλειψης δεδομένων, ενώ μετά από δοκιμές που έγιναν για την επίπτωση της χρήσης λιπαντικού στον συμπιεστή CO₂ του βασικού συστήματος, ισχύος 346 kW, φαίνεται πως οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις αυτού είναι πολύ μικρές έως αμελητέες. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι, το ποσοστό αύξησης των ισοδύναμων εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα βρέθηκε ίσο με 1,47 % μεταξύ της περίπτωσης μη χρήσης λιπαντικού και της χρήσης 50 τόνων λιπαντικού κατά την διάρκεια ζωής του συμπιεστή, ήτοι 20 χρόνια [61]. Δεδομένου ότι η συνεισφορά του συμπιεστή CO₂ στις συνολικές εκπομπές ισοδύναμου διοξειδίου του άνθρακα του βασικού συστήματος είναι της τάξης του 6 %, το ποσοστό συνεισφοράς του λιπαντικού στο σύνολο της εγκατάστασης υπολογίζεται μικρότερο από 0,1 %.

Για την απόρριψη των υλικών της εγκατάστασης κατά το τέλος του κύκλου ζωής τους, θεωρήθηκε ότι αυτά ανακυκλώνονται και συνεπώς – λόγω της χρήσης του μοντέλου Cut-off για την μοντελοποίηση των διεργασιών - εκτός των επιπτώσεων που συνδέονται με την μεταφορά τους στο σημείο διαλογής, οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις από την διαδικασία ανακύκλωσης θεωρούνται μηδενικές. Εξαιρέση αποτελεί η απόρριψη του καταλύτη νικελίου ο οποίος οδηγείται σε εγκατάσταση αποτέφρωσης επικίνδυνων αποβλήτων (Hazardous waste incineration).

Τέλος, όλες οι ηλεκτρικές καταναλώσεις πλην του συστήματος ηλεκτρόλυσης προέρχονται από το ηλεκτρικό δίκτυο μέσης τάσης της Αυστρίας.

4.5.4.2 Σύστημα ηλεκτρόλυσης

Για την παραγωγή του υδρογόνου επιλέχθηκε τεχνολογία ηλεκτρόλυσης με μεμβράνη ανταλλαγής πρωτονίων (PEM : Proton Exchange Membrane) λόγω της ικανότητας της να διαχειρίζεται αποδοτικά τα μεταβαλλόμενα φορτία όπως αυτά που προέρχονται από τις πηγές ανανεώσιμων μορφών ενέργειας [31] [38] [45]. Ως προς τα τεχνικά της

χαρακτηριστικά του βασικού συστήματος αυτά αντλήθηκαν από την μονάδα ηλεκτρόλυσης *Silyzer 300* της εταιρίας *Siemens* [62] και συνοψίζονται στον επόμενο πίνακα.

Πίνακας 4-7 Τεχνικά χαρακτηριστικά ηλεκτρολύτη SILYZER 300 [62]

Παράμετρος	Τιμή	Μονάδα
Τεχνολογία	PEM	-
Ισχύς	17,5	MW
Βαθμός απόδοσης (HHV)	75.0	%
Βαθμός απόδοσης (LHV)	64.76	%
Παραγωγή H ₂	340.0	kg/hr
Χρόνος εκκίνησης	<1	min
Ελάχιστο φορτίο	≥5	%
Κατανάλωση νερού	10.0	lt/kg H ₂

Στο βασικό σύστημα η πηγή ενέργειας για την ηλεκτρόλυση προέρχεται από χερσαία αιολικά ισχύος μεταξύ 1 και 3 MW. Στα εναλλακτικά σενάρια ενέργειας χρησιμοποιείται ενέργεια από φωτοβολταϊκά πάρκα ονομαστικής ισχύος 570 kWp και ενέργεια από το ηλεκτρικό δίκτυο μέσης τάσης της Αυστρίας. Το νερό που χρησιμοποιείται είναι απιονισμένο ενώ το παραγόμενο οξυγόνο θεωρείται ότι απελευθερώνεται στην ατμόσφαιρα. Η απαιτούμενη ενέργεια για την συμπίεση του νερού στην πίεση λειτουργίας του συστήματος θεωρήθηκε ότι περιλαμβάνεται στην συνολική κατανάλωση ενέργειας αυτού.

4.5.4.3 Συστήματα μεθανοποίησης και αναβάθμισης SNG

Το σύστημα μεθανοποίησης αποτελείται από τέσσερις αδιαβατικούς αντιδραστήρες σταθερής κλίνης (fixed bed reactors) με ενδιάμεσα στάδια ψύξης ώστε να διατηρείται η βέλτιστη κινητική της αντίδρασης, δηλαδή υψηλά επίπεδα μετατροπής CO₂ και επιλεκτικότητας CH₄. Λόγω της απότομης αύξησης θερμοκρασίας στον πρώτο αντιδραστήρα, για επιπλέον έλεγχο της θερμοκρασίας γίνεται ανακυκλοφορία ποσοστού του αερίου ίσου με 0,7, το οποίο διοχετεύεται σε εναλλάκτη για προθέρμανση του αρχικού μίγματος που εισέρχεται στο σύστημα. Το μέσο ψύξης είναι νερό, ενώ ο καταλύτης που χρησιμοποιείται είναι από νικέλιο.

Όπως αναφέρθηκε και στην παράγραφο του πεδίου εφαρμογής, η απαγόμενη θερμότητα από το σύστημα ψύξης του συστήματος μεθανοποίησης θεωρείται ότι διατίθεται για θέρμανση. Ο υπολογισμός της ποσότητας αυτής, έγινε με αναγωγή των δεδομένων της διάταξης των Perna et al [22] . στα αντίστοιχα μεγέθη της παρούσας μελέτης. Με τον ίδιο τρόπο υπολογίσθηκαν και οι καταναλώσεις τους συστήματος αναβάθμισης συνθετικού φυσικού αερίου. Τα αποτελέσματα δίνονται στον επόμενο πίνακα.

Πίνακας 4-8 Λειτουργικές παράμετροι συστημάτων μεθανοποίησης και αναβάθμισης

Μέγεθος συστήματος [MW]	20	500	1302.7
Παραγωγή SNG [kg/hr]	819.2	21962.0	62704.7
Ισχύς συστήματος ψύξης [kW]	1889.0	50638.6	144580.7
Απαγόμενη θερμότητα ανά κύκλο ζωής [MWh]	231662.5	6210315.4	17731379.6
Ισχύς συστήματος αναβάθμισης [kW]	26.9	722.2	2061.9
Κατανάλωση συστήματος αναβάθμισης ανά κύκλο ζωής [MWh]	3303.8	88566.8	252871.4

4.5.4.4 Σύστημα δέσμευσης και συμπίεσης CO₂

Τα λειτουργικά χαρακτηριστικά του συστήματος δέσμευσης διοξειδίου του άνθρακα λήφθηκαν από την βιβλιογραφία [63], ενώ η απαιτούμενη ισχύς για την συμπίεση του διοξειδίου του άνθρακα από το 1,6 στα 20 bar υπολογίσθηκε μέσω *Aspen*. Τα δεδομένα συνοψίζονται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 4-9 Λειτουργικές παράμετροι συστήματος διοξειδίου του άνθρακα

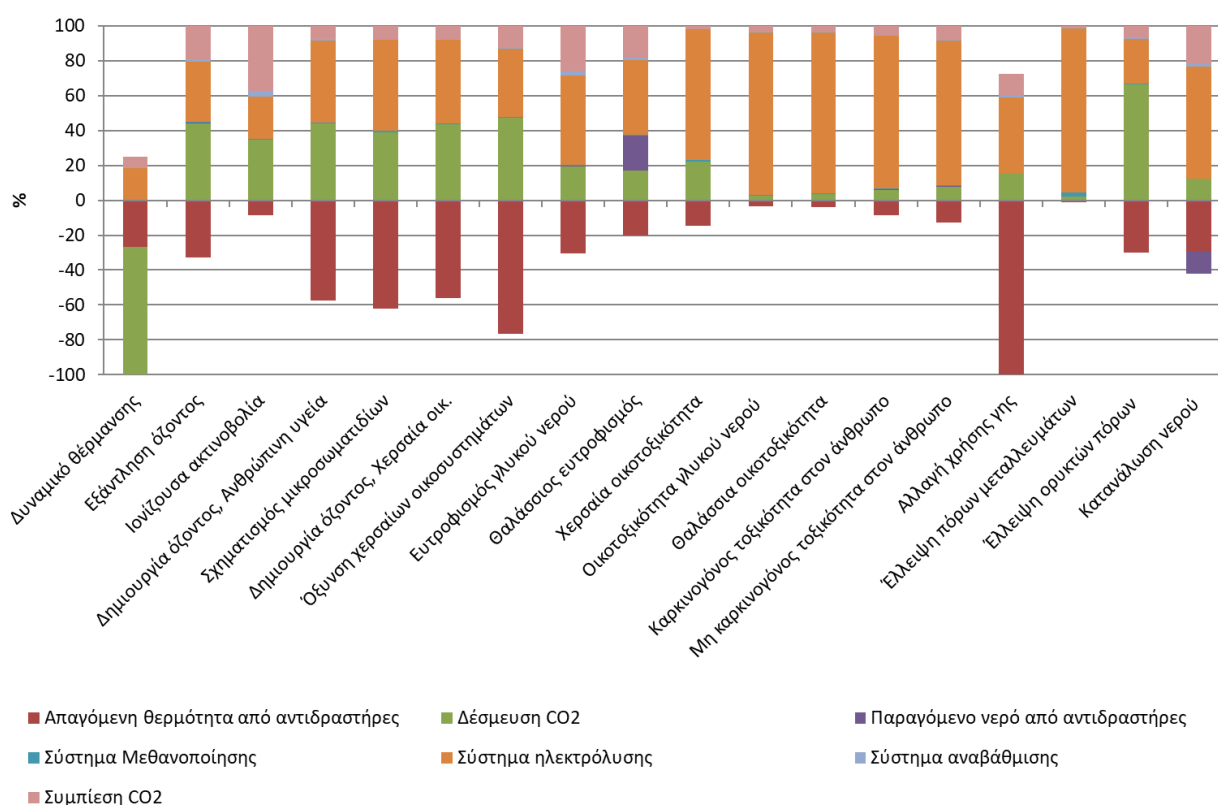
Μέγεθος συστήματος [MW]	20	500	1302.7
Συμπίεση CO₂			
Ροή CO ₂ [kg/hr]	2116.5	56739.6	162000.0
Ισχύς συμπιεστή CO ₂ [kW]	346.2	9280.1	26496.0
Κατανάλωση ενέργειας από συμπιεστή ανά κύκλο ζωής [MWh]	42454.7	1138108.3	3249469.4
Λειτουργικές παράμετροι συστήματος δέσμευσης ανά κιλό δεσμευόμενου CO₂			
Κατανάλωση χημικού MEA [kg MEA/kg CO ₂]	2.84E-04		
Απαιτούμενη θερμότητα [MJ/kg CO ₂]	3.48		
Απαιτούμενη ηλ. ενέργεια [kWh/kg CO ₂]	2.40E-02		

5. Αποτελέσματα

Στο παρόν κεφάλαιο παρατίθενται τα αποτελέσματα της ανάλυσης κύκλου ζωής του βασικού συστήματος και των διαφορετικών σεναρίων που ορίστηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο (βλ. κεφ. 4.4.6). **Όλα τα αποτελέσματα είναι ανηγμένα στην λειτουργική μονάδα.**

5.1 Αποτελέσματα βασικού συστήματος

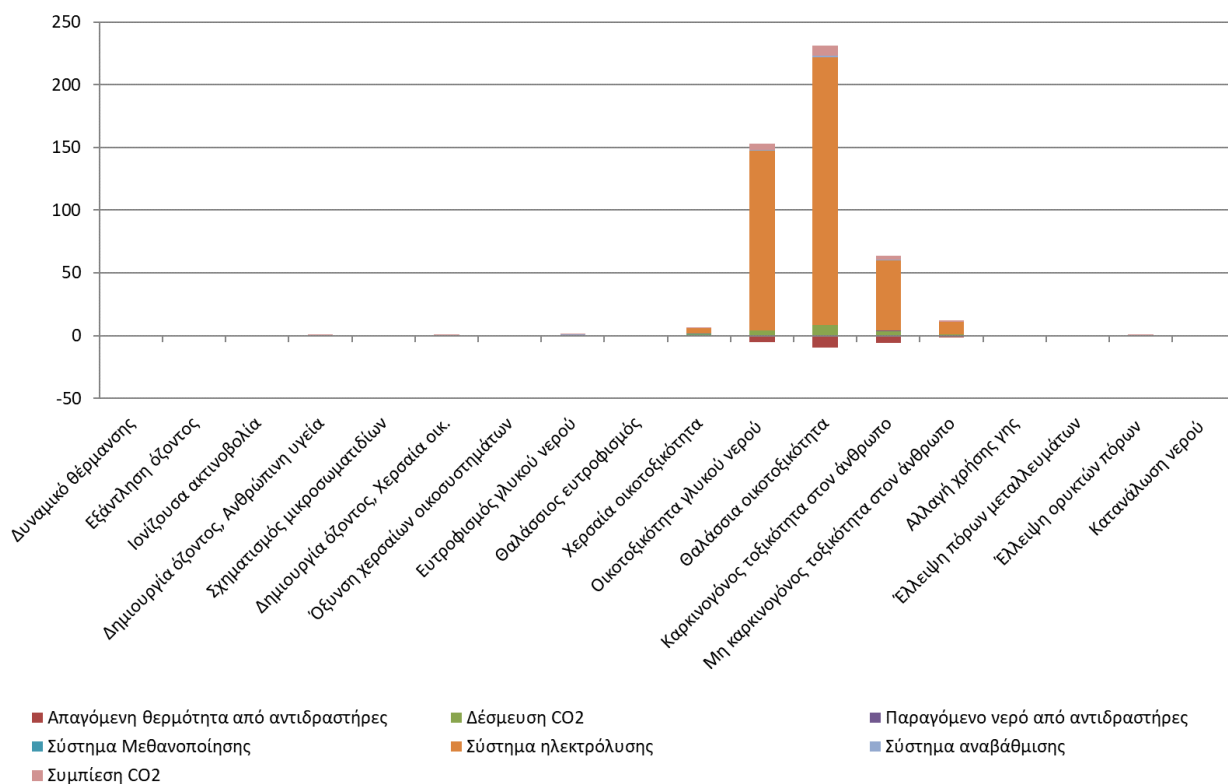
Παρακάτω παρουσιάζονται αναλυτικά τα αποτελέσματα χαρακτηρισμού και κανονικοποίησης του βασικού συστήματος ανά λειτουργική μονάδα, στα οποία φαίνονται ξεχωριστά τα ποσοστά συνεισφοράς του κύκλου ζωής κάθε τμήματος της μονάδας.



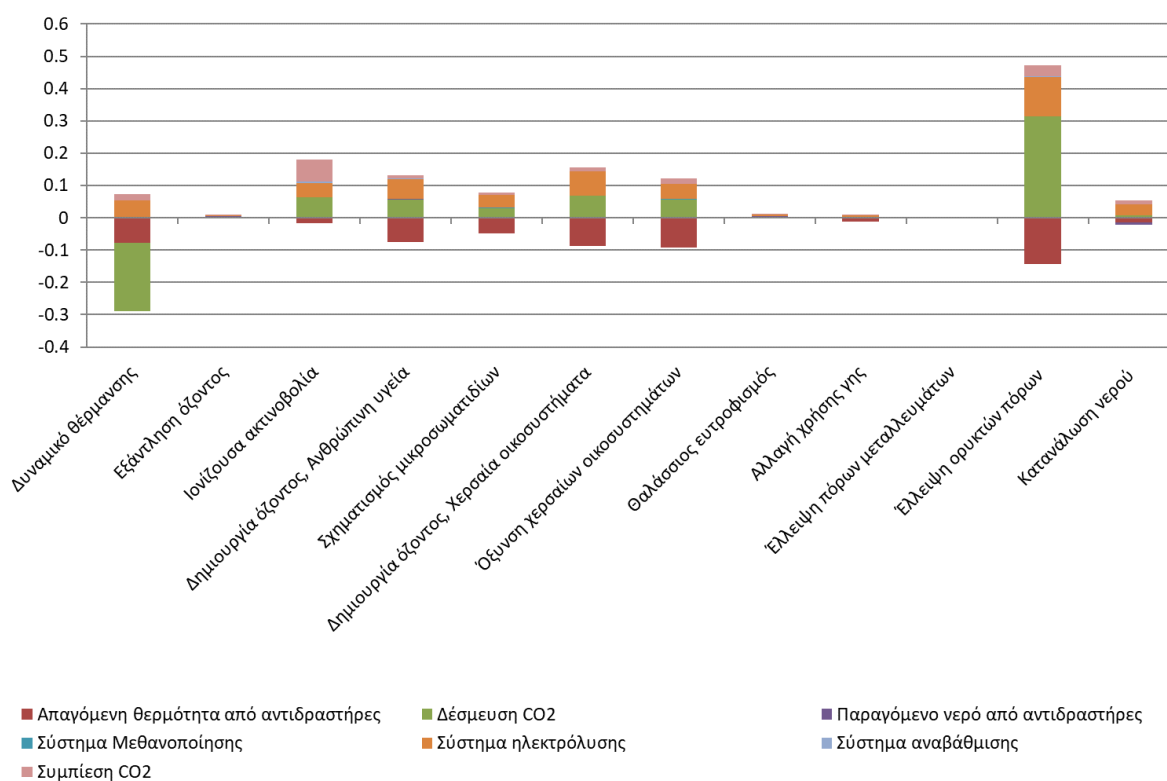
Εικόνα 5-1 Αποτελέσματα χαρακτηρισμού βασικού συστήματος

Παρά το γεγονός ότι η ενέργεια που καταναλώνει η ηλεκτρόλυση προέρχεται από ανεμογεννήτριες, αυτή ευθύνεται για το μεγαλύτερο αποτύπωμα σε όλες τις κατηγορίες πλην της όξυνσης χερσαίων οικοσυστημάτων (ΟΧΟ), της εξάντλησης όζοντος (ΕΟ), της ιονίζουσας ακτινοβολίας (ΙΑ) και της έλλειψης ορυκτών πόρων (ΕΟΠ). Σε αυτές τις κατηγορίες η κατανάλωση ηλεκτρισμού και κυρίως της θερμότητας από το σύστημα δέσμευσης διοξειδίου έχει μεγαλύτερη επίπτωση. Ειδικότερα στην κατηγορία έλλειψης ορυκτών πόρων (ΕΟΠ), το ποσοστό της θερμότητας που παράγεται από φυσικό αέριο συνεισφέρει στο υψηλό αποτύπωμα του τμήματος δέσμευσης. Σημαντική είναι η θετική

επίδραση της απαγόμενης θερμότητας σε όλες τις κατηγορίες επιπτώσεων. Το σύστημα επιτυγχάνει αρνητικό ισοζύγιο άνθρακα, ίσο με $-1742.1 \text{ kg CO}_2\text{-eq}$ ανά τόνο παραγόμενου SNG.

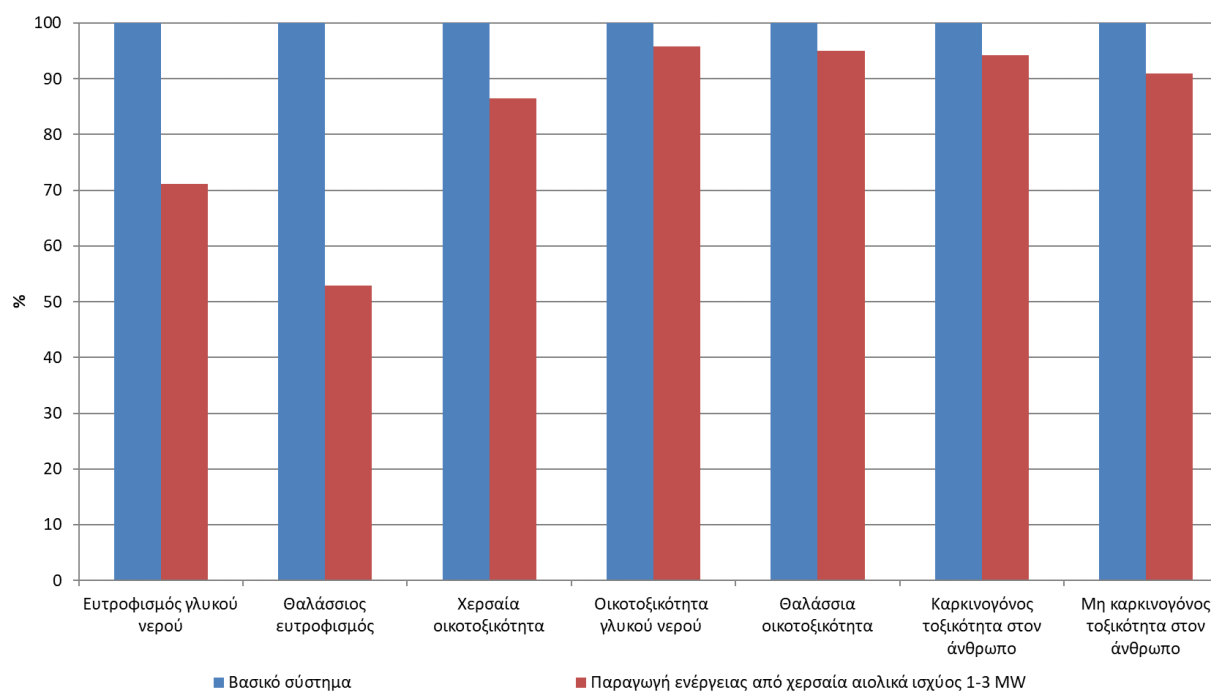


Εικόνα 5-2 Αποτελέσματα κανονικοποίησης βασικού συστήματος

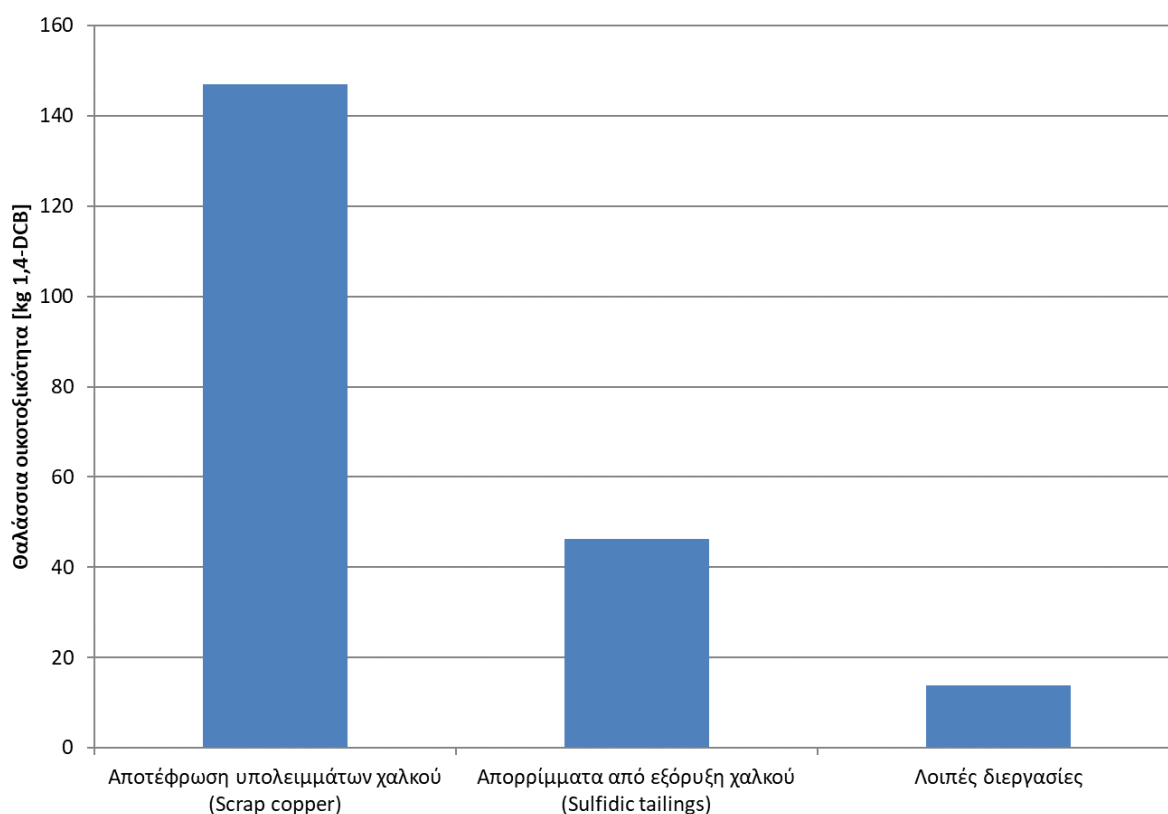


Εικόνα 5-3 Αποτελέσματα κανονικοποίησης βασικού συστήματος χωρίς τις κατηγορίες τοξικότητας και ευτροφισμού γλυκού νερού

Στην κανονικοποίηση φαίνεται πως οι κατηγορίες τοξικότητας κυριαρχούν. Όπως φαίνεται στα επόμενα διαγράμματα, αυτό οφείλεται κυρίως στον κύκλο ζωής της ανεμογεννήτριας και ειδικότερα στην επιλογή της αποτέφρωσης (incineration) των χάλκινων τμημάτων των ανεμογεννητριών αντί για την ανακύκλωση τους, το οποίο πιθανότατα οφείλεται σε λάθος μοντελοποίηση, καθώς στην περιγραφή της εν λόγω διεργασίας γίνεται αναφορά στην ανακύκλωση.

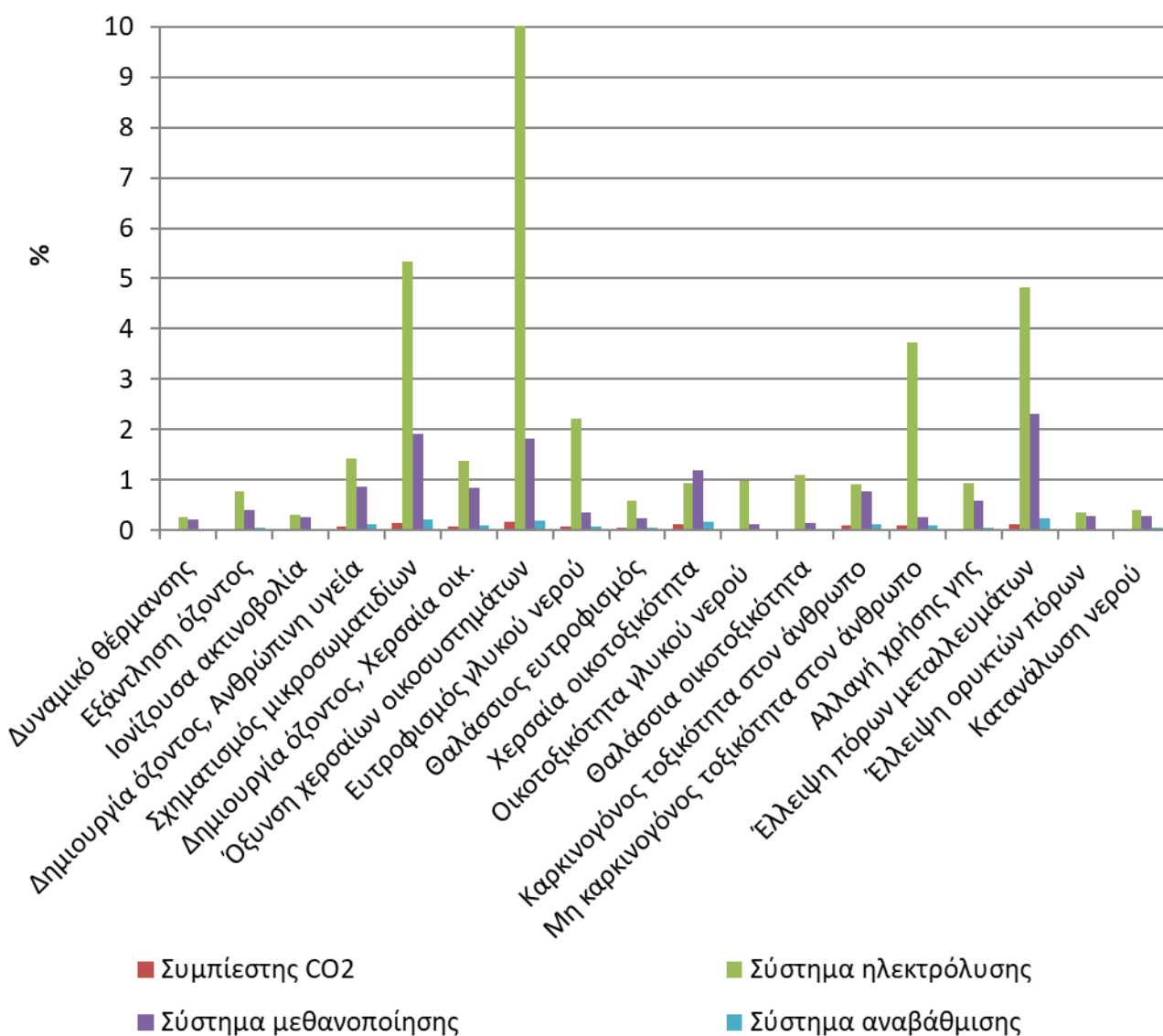


Εικόνα 5-4 Συνεισφορά της παραγωγής ενέργειας από χερσαία αιολικά στις κατηγορίες οικοτοξικότητας και ευτροφισμού.



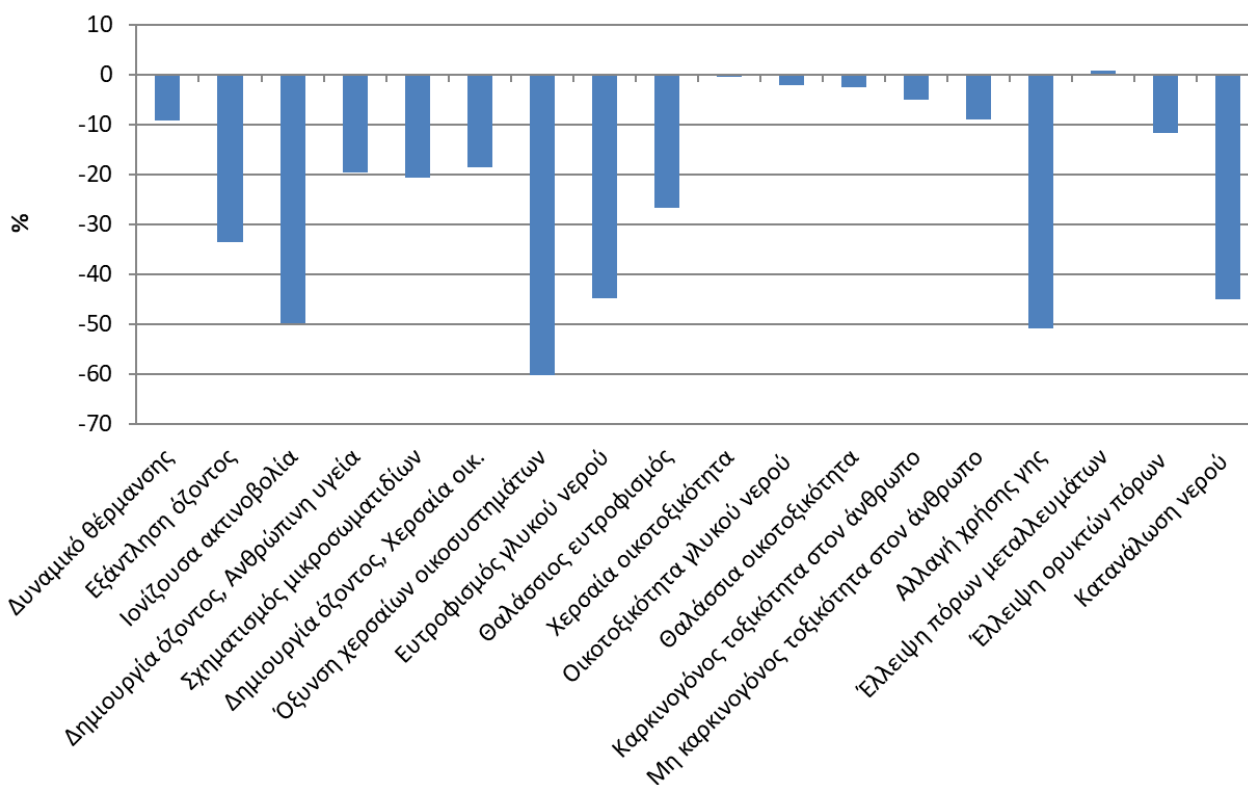
Εικόνα 5-5 Συνεισφορά διεργασιών του κύκλου ζωής χερσαίων αιολικών στην θαλάσσια οικοτοξικότητα

Σχετικά με την φάση κατασκευής και απόρριψης των τμημάτων του συστήματος, η συνεισφορά τους στις συνολικές επιπτώσεις του κύκλου ζωής είναι αμελητέες εκτός από τις κατηγορίες ΣΜ, ΟΧΟ, ΜΚΤΑ και ΕΠΜ, όπου το σύστημα ηλεκτρόλυσης ευθύνεται για το 5 %, 10 %, 4 % και 5 % των επιπτώσεων αντίστοιχα. Η μεγαλύτερη συνεισφορά προέρχεται από την εφοδιαστική αλυσίδα την πλατίνας που χρησιμοποιείται στην συντήρηση του συστήματος ηλεκτρόλυσης εκτός της κατηγορίας ΜΚΤΑ όπου οι επιπτώσεις οφείλονται κυρίως στον χρυσό που χρησιμοποιείται στα ηλεκτρονικά εξαρτήματα. Η κατασκευή του συστήματος μεθανοποίησης συνεισφέρει 1 και 2 % στις κατηγορίες ΔΟΑ, ΣΜ, ΟΧΟ, ΧΟ και ΕΠΜ το οποίο οφείλεται στις υψηλές ποσότητες χάλυβα που απαιτούνται στην κατασκευή κυρίως του προθερμαντήρα και του συστήματος ψύξης και δευτερευόντως στο νικέλιο του καταλύτη.



Εικόνα 5-6 Συνεισφορά φάσεων κατασκευής και απόρριψης των τμημάτων της εγκατάστασης στον κύκλο ζωής του βασικού συστήματος

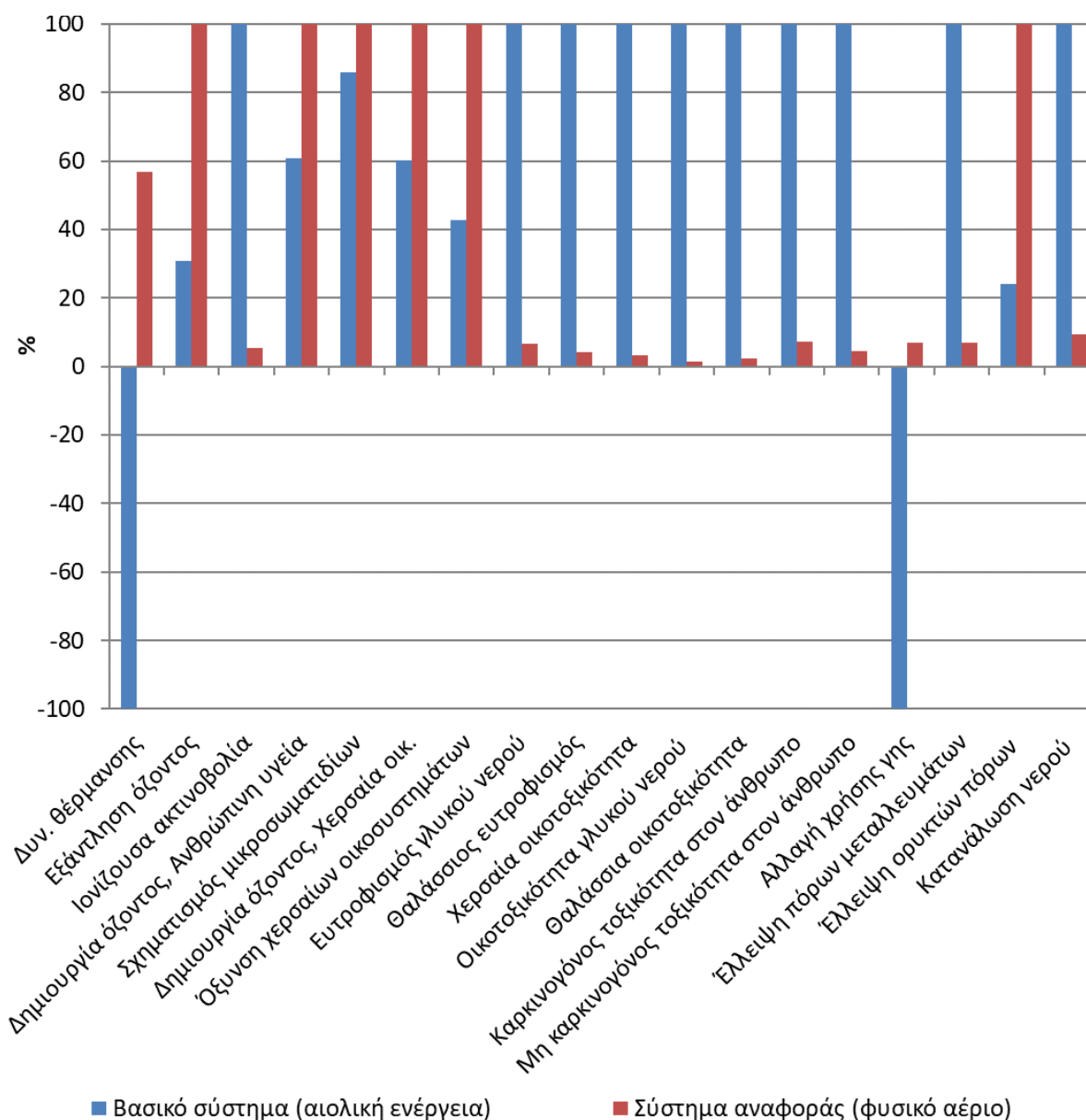
Επιπροσθέτως, έγινε ανάλυση της περίπτωσης κατά την όλες οι ηλεκτρικές καταναλώσεις του συστήματος καλύπτονται από αιολική ενέργεια. Για τα συστήματα συμπίεσης CO₂ και αναβάθμισης SNG, η βελτίωση του συνολικού αποτυπώματος ήταν δραματική με σχεδόν όλες τις επιπτώσεις να μειώνονται πάνω από 90 %. Στις κατηγορίες ΧΟ, ΟΓΝ, ΘΟ και ΚΤΑ οι μειώσεις ήταν μικρότερη, από 11 έως 70 %, αφού όπως αναφέρθηκε παραπάνω σε αυτές τις κατηγορίες οι αιολική ενέργεια έχει υψηλές επιπτώσεις. Οι μειώσεις στο αποτύπωμα της διεργασίας δέσμευσης CO₂ ήταν χαμηλότερες, έως 25 %, δεδομένου ότι η μεγαλύτερη συνεισφορά στις επιπτώσεις προέρχεται από την κατανάλωση θερμότητας. Η μόνη κατηγορία επιπτώσεων στην οποία υπήρχε αύξηση του αποτυπώματος ήταν η ΕΠΜ, ίση με 0,75 %. Η συνολική ποσοστιαία μείωση των επιπτώσεων του συστήματος φαίνεται στο επόμενο διάγραμμα.



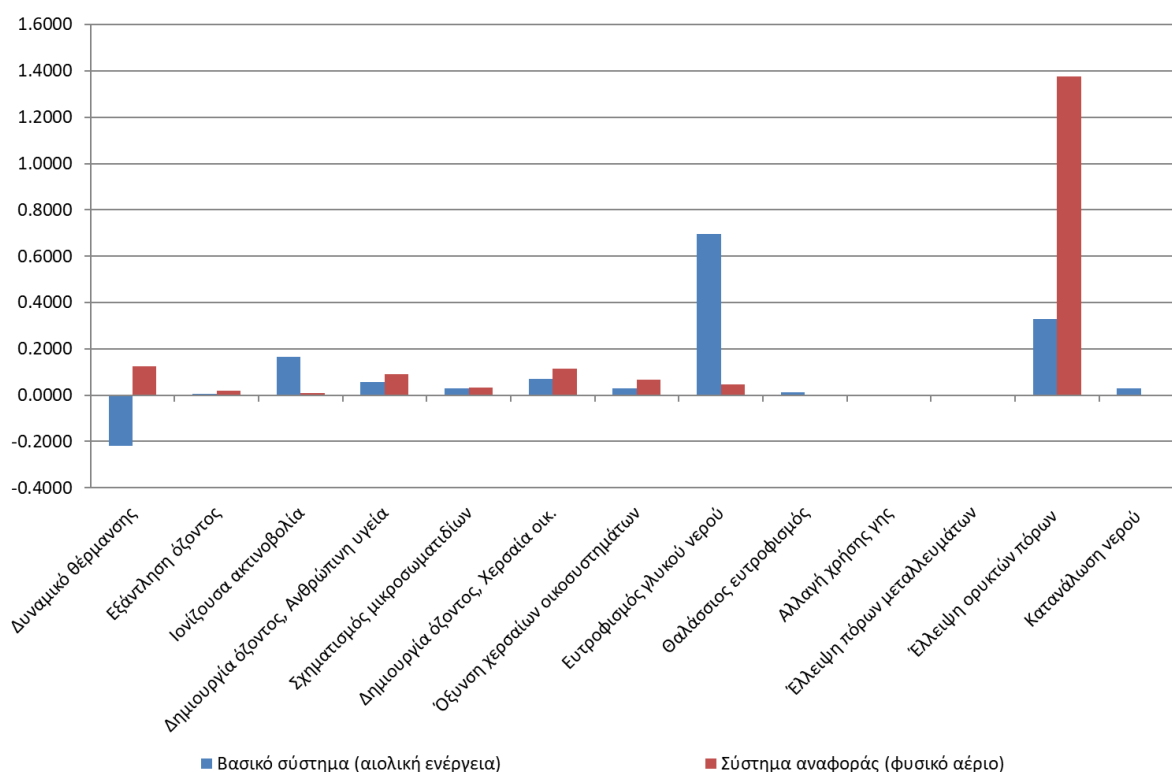
Εικόνα 5-7 Ποσοστιαία μεταβολή επιπτώσεων για αποκλειστική χρήση αιολικής ενέργειας

5.2 Σύγκριση βασικού συστήματος με σύστημα αναφοράς

Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα χαρακτηρισμού και κανονικοποίησης της σύγκρισης μεταξύ του βασικού συστήματος και του συστήματος αναφοράς.



Εικόνα 5-8 Σύγκριση αποτελεσμάτων χαρακτηρισμού βασικού συστήματος με σύστημα αναφοράς(Παραγωγή και μεταφορά 1 τόνου Φ.Α στην Αυστρία)

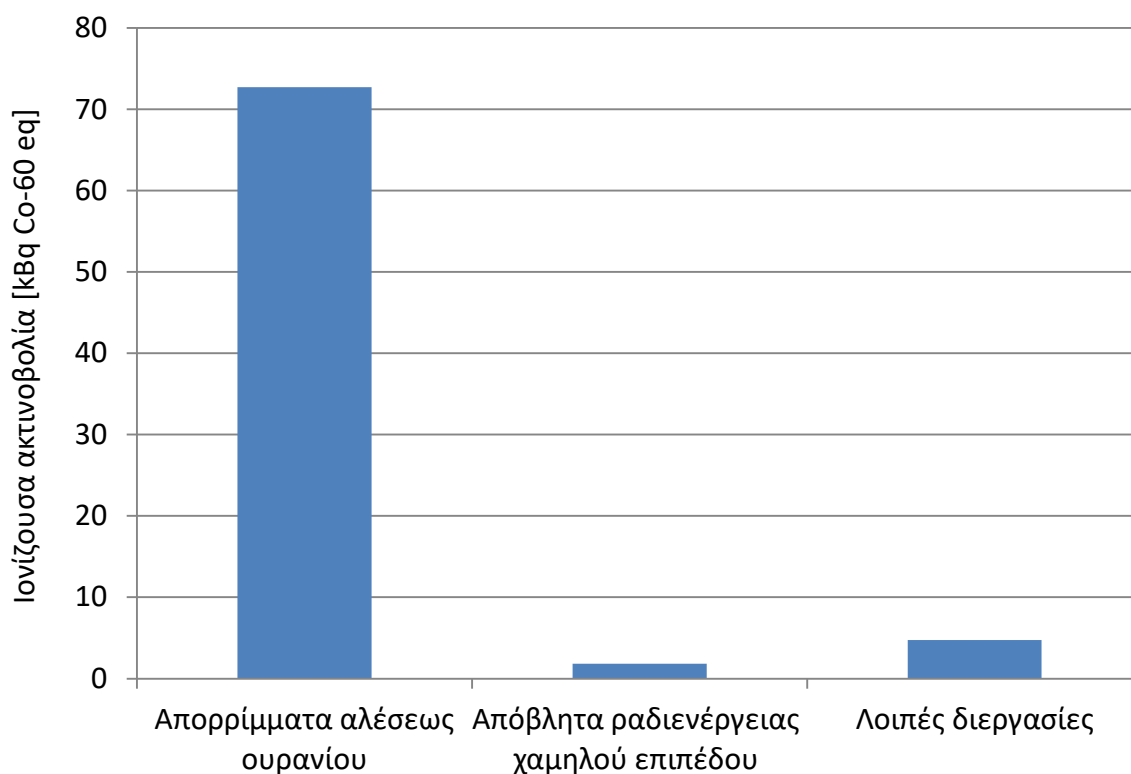


Εικόνα 5-9 Σύγκριση αποτελεσμάτων κανονικοποίησης βασικού συστήματος με σύστημα αναφοράς(Παραγωγή και μεταφορά 1 τόνου Φ.Α στην Αυστρία)

Όπως φαίνεται από τα αποτελέσματα χαρακτηρισμού, το βασικό σύστημα μειώνει σημαντικά τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα σε σχέση με το συμβατικό σενάριο το οποίο εκπέμπει 990.6 κιλά CO₂-eq ανά τόνο φυσικού αερίου, αλλά έχει μεγαλύτερη συνεισφορά σε αρκετές κατηγορίες επιπτώσεων όπως της ιονίζουσας ακτινοβολίας, της εκπομπής μικροσωματιδίων, όλες τις κατηγορίες τοξικότητας, την έλλειψη πόρων μεταλλευμάτων και τέλος στην κατανάλωση νερού.

Σχετικά με τις κατηγορίες οικοτοξικότητας και ευτροφισμού, ο λόγος υπέρσχυσης του βασικού συστήματος αναλύθηκε στην προηγούμενη παράγραφο και σχετίζεται με την επιλογή αποτέφρωσης του χαλκού από τις ανεμογεννήτριες. Στην κατηγορία έλλειψης πόρων μεταλλευμάτων η επίπτωση του βασικού συστήματος είναι 14 φορές μεγαλύτερη, γεγονός που οφείλεται στην εξόρυξη πρώτων υλών, κυρίως για την κατασκευή των ανεμογεννητριών.

Στα αποτελέσματα χαρακτηρισμού σημαντική φαίνεται η διαφορά στην κατηγορία της αλλαγής χρήσης γης λόγω της αξιοποίησης της απαγόμενης θερμότητας αφού αυτή αντικαθιστά διεργασία παραγωγής θερμότητας με σημαντική διείσδυση βιομάζας, η οποία όμως σύμφωνα με την κανονικοποίηση έχει αμελητέα περιβαλλοντική επίδραση συγκριτικά με τη μείωση των επιπτώσεων στην έλλειψη ορυκτών πόρων, ίση με 76 %.

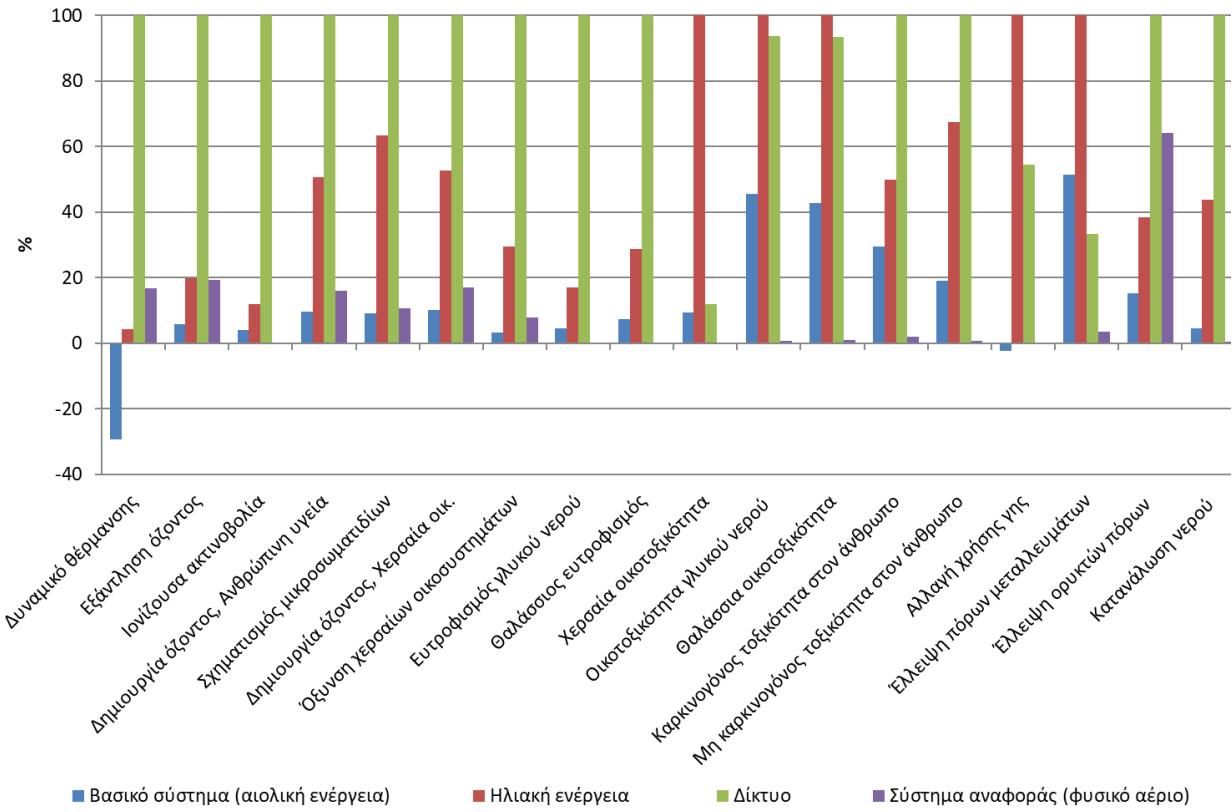


Εικόνα 5-10 Συνεισφορά διεργασιών βασικού συστήματος στην ιονίζουσα ακτινοβολία

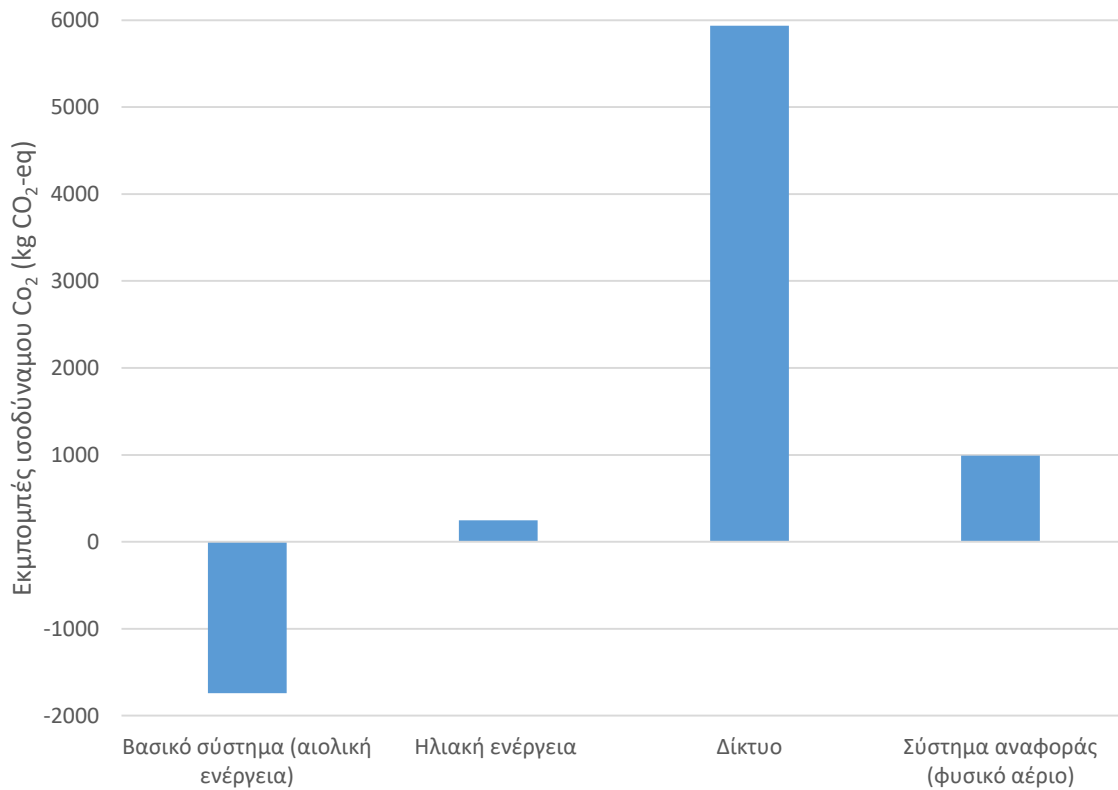
Εκτός της κατανάλωσης νερού που οφείλεται προφανώς στην κατανάλωση του από τον ηλεκτρολύτη, στις υπόλοιπες κατηγορίες και ειδικότερα στην κατηγορία της ιονίζουσας ακτινοβολίας, οι αυξημένες επιπτώσεις του βασικού συστήματος οφείλονται στην χρήση ηλεκτρικής ενέργειας από το δίκτυο και ειδικότερα στο ποσοστό αυτής που προέρχεται από πυρηνική ενέργεια.

5.3 Σύγκριση συμβατικού σεναρίου με σύστημα προϊόντος υπό διαφορετικές πηγές ηλεκτρικής ενέργειας.

Στα προηγούμενα κεφάλαια έγινε φανερή η θετική περιβαλλοντική επίδραση του υπό μελέτη συστήματος στις περισσότερες κατηγορίες επιπτώσεων συγκριτικά με το συμβατικό σενάριο ενέργειας του φυσικού αερίου. Όπως διαπιστώθηκε, οι επιδόσεις αυτές οφείλονται στο μεγαλύτερο ποσοστό τους στην επιλογή της αιολικής ενέργειας για την κάλυψη των ηλεκτρικών αναγκών του ηλεκτρολύτη. Για μια ολοκληρωμένη εικόνα σχετικά με την επίδραση της πηγής ενέργειας ηλεκτρολύτη στην περιβαλλοντική απόδοση του συστήματος, γίνεται σύγκριση των προηγούμενων σεναρίων με το εξεταζόμενο σύστημα υπό διαφορετικές πηγές ενέργειας, ήτοι από ηλιακή ενέργεια και από το ηλεκτρικό δίκτυο της Αυστρίας. Τα αποτελέσματα χαρακτηρισμού και κανονικοποίησης παρουσιάζονται παρακάτω.

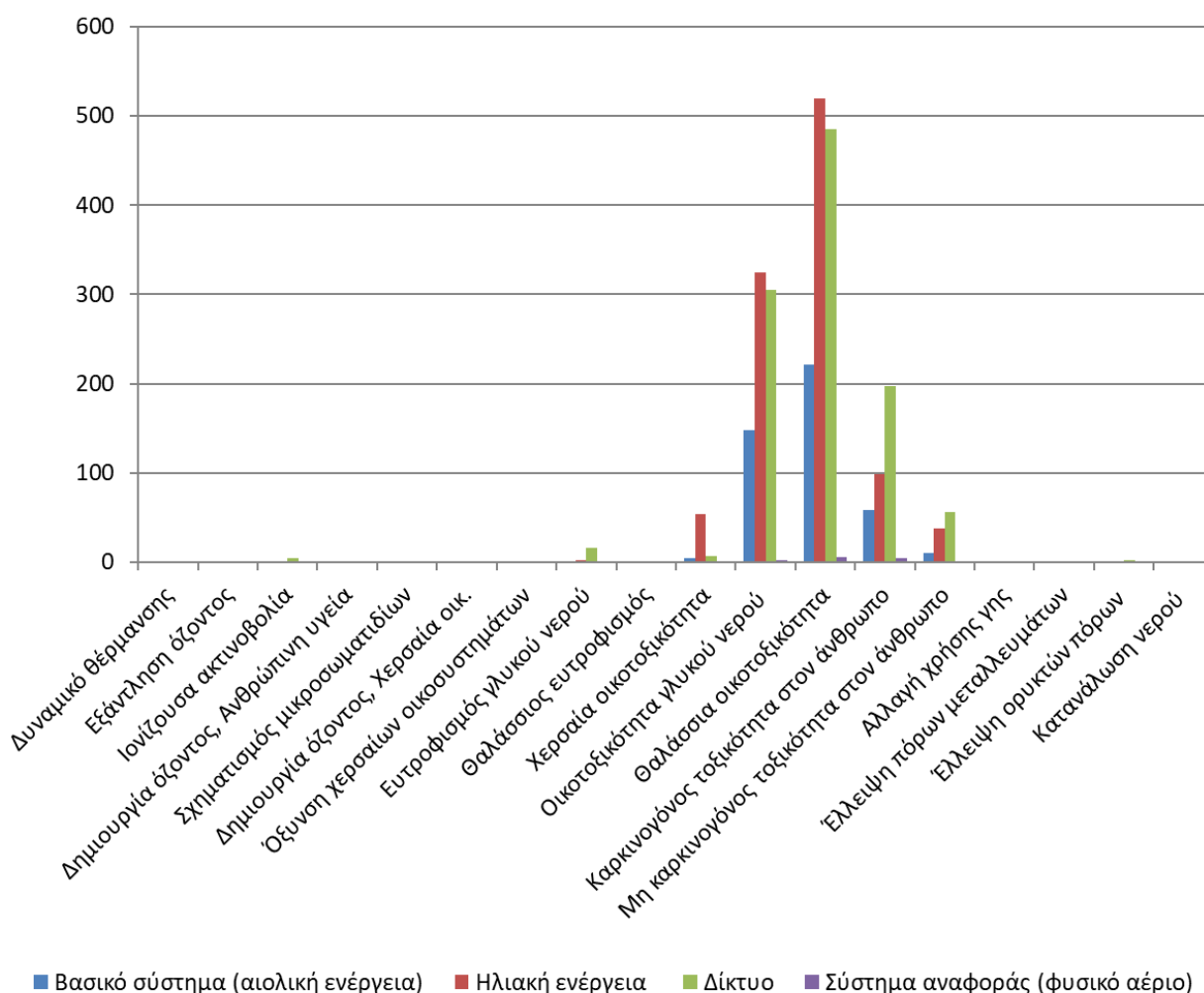


Εικόνα 5-11 Σύγκριση αποτελεσμάτων χαρακτηρισμού συμβατικού σεναρίου και συστήματος προϊόντος υπό διαφορετικές πηγές ενέργειας

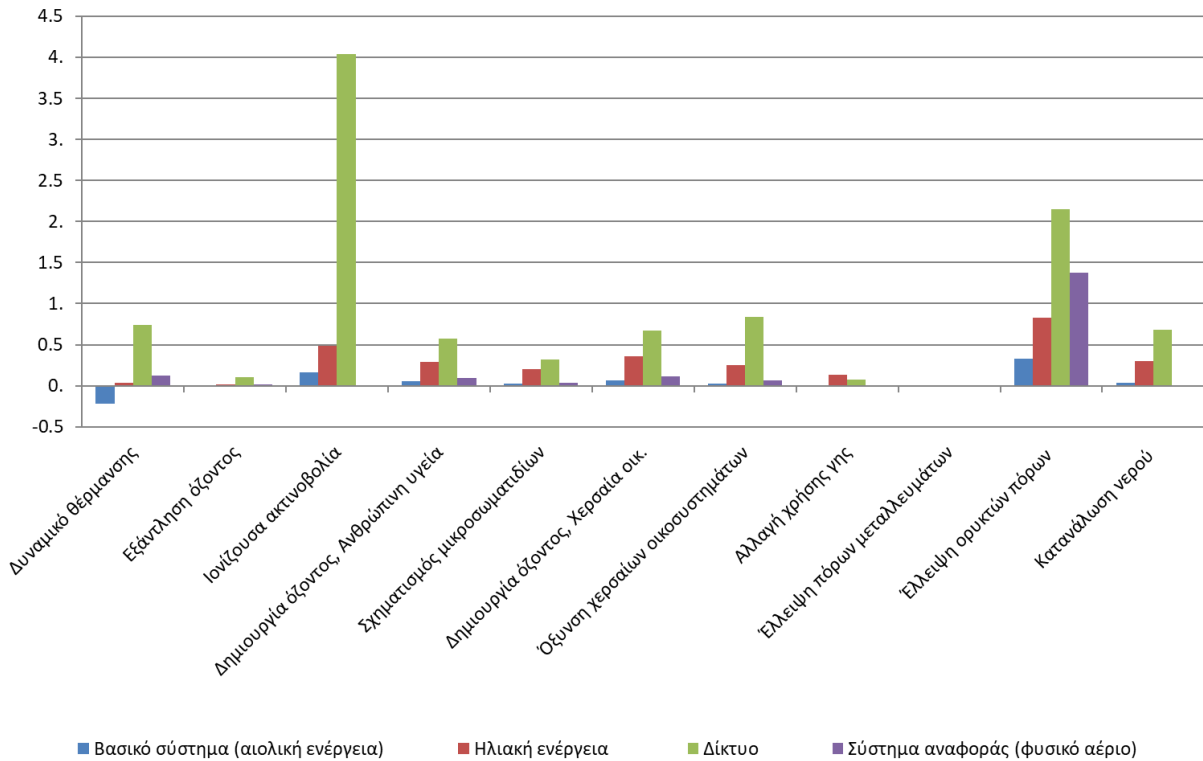


Εικόνα 5-12 Ισοδύναμες εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα για τα διαφορετικά σενάρια

Τα αποτελέσματα χαρακτηρισμού αποκαλύπτουν πως η επιλογή κάλυψης των ηλεκτρικών αναγκών της ηλεκτρόλυσης με ενέργεια από φωτοβολταϊκά πάρκα, καθιστά την μονάδα Power-to-SNG σημαντικά υποδεέστερη συγκριτικά με το φυσικό αέριο, σε όλες τις κατηγορίες επιπτώσεων πλην του δυναμικού θέρμανσης και της έλλειψης ορυκτών πόρων. Χαρακτηριστική είναι η επίπτωση του συστήματος ηλιακής ενέργειας στην χερσαία οικοτοξικότητα, ξεπερνώντας όλες τις υπόλοιπες περιπτώσεις κατά τουλάχιστον 90 %, γεγονός που οφείλεται στη εξόρυξη πρώτων υλών που απαιτούνται για την παραγωγή των πολυκρυσταλλικών πάνελ πυριτίου. Το σενάριο αυτό είναι επίσης κυρίαρχο τόσο στην οικοτοξικότητα γλυκού νερού και θάλασσας – οφειλόμενο όπως και στο βασικό σενάριο στην αποτέφρωση του χαλκού – όσο και στην αλλαγή χρήση γης και την έλλειψη πόρων μεταλλευμάτων.

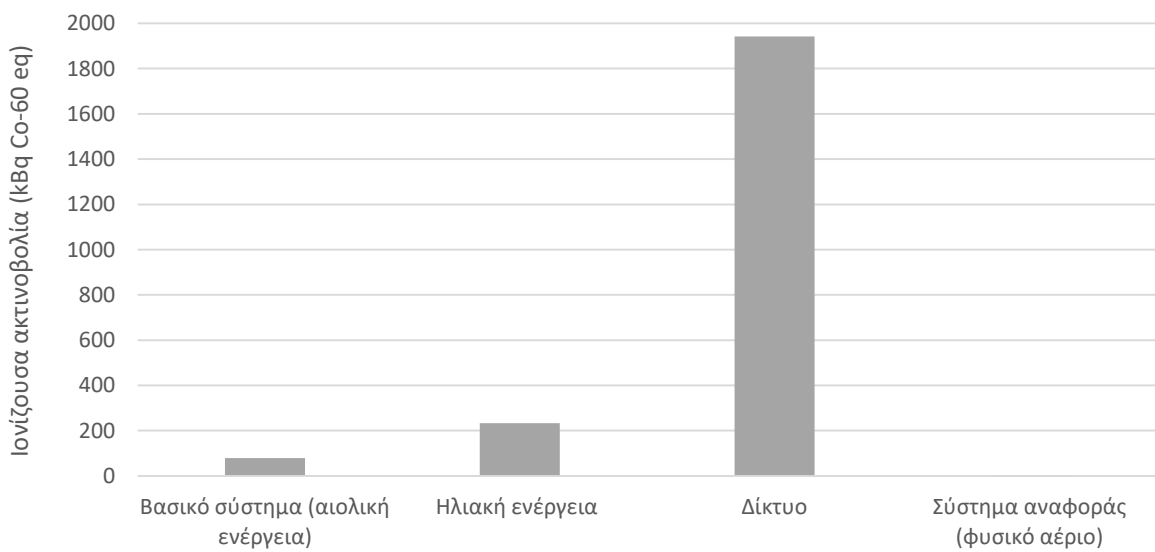


Εικόνα 5-13 Σύγκριση αποτελεσμάτων κανονικοποίησης σεναρίων συστήματος με φυσικό αέριο



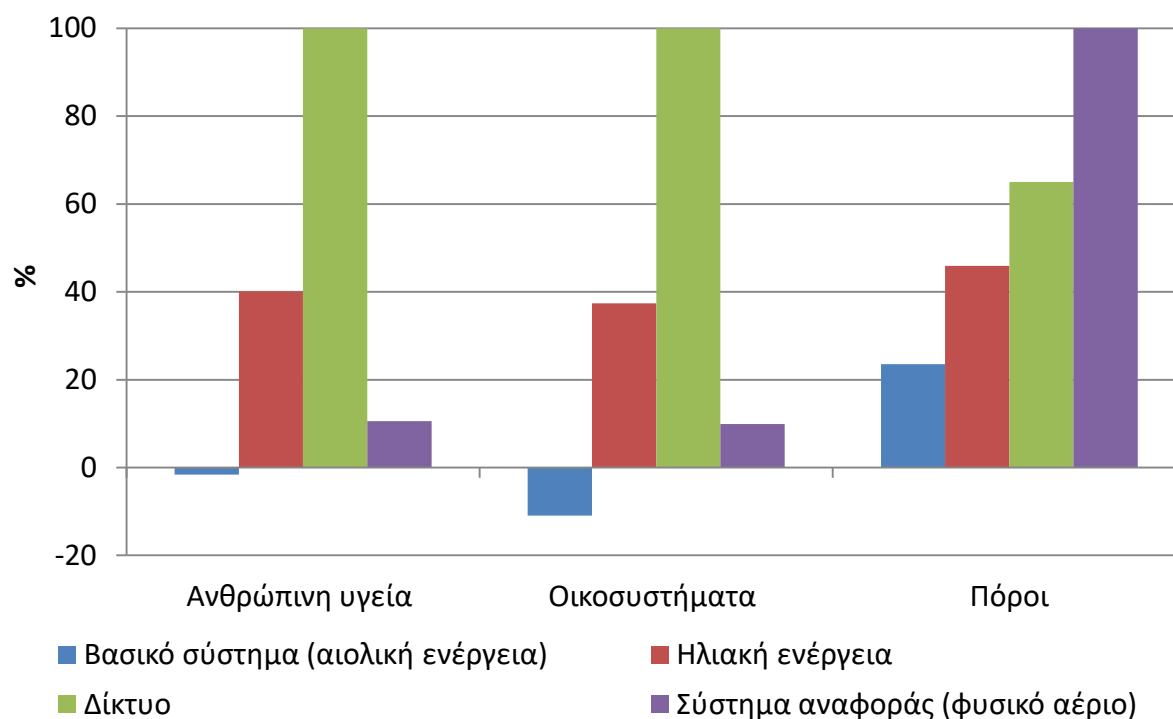
Εικόνα 5-14 Σύγκριση αποτελεσμάτων κανονικοποίησης βασικού συστήματος με εναλλακτικές πηγές ενέργειας χωρίς τις κατηγορίες τοξικότητας και ευτροφισμού

Σε όλες τις υπόλοιπες κατηγορίες το σενάριο χρήσης ενέργειας από το δίκτυο καταλαμβάνει την πρώτη θέση καθιστώντας την τη χειρότερη εκδοχή από τις τέσσερις, υπό όρους συνολικής περιβαλλοντικής απόδοσης. Όπως φαίνεται χαρακτηριστικά και στο παραπάνω διάγραμμα κανονικοποίησης, όταν η ηλεκτρική ενέργεια που απαιτείται για την ηλεκτρολύση καλύπτεται από το δίκτυο η συνεισφορά του συστήματος Power-to-SNG στην ιονίζουσα ακτινοβολία είναι 8 φορές μεγαλύτερη από το σενάριο ηλιακής ενέργειας και 24 φορές από το βασικό σενάριο.

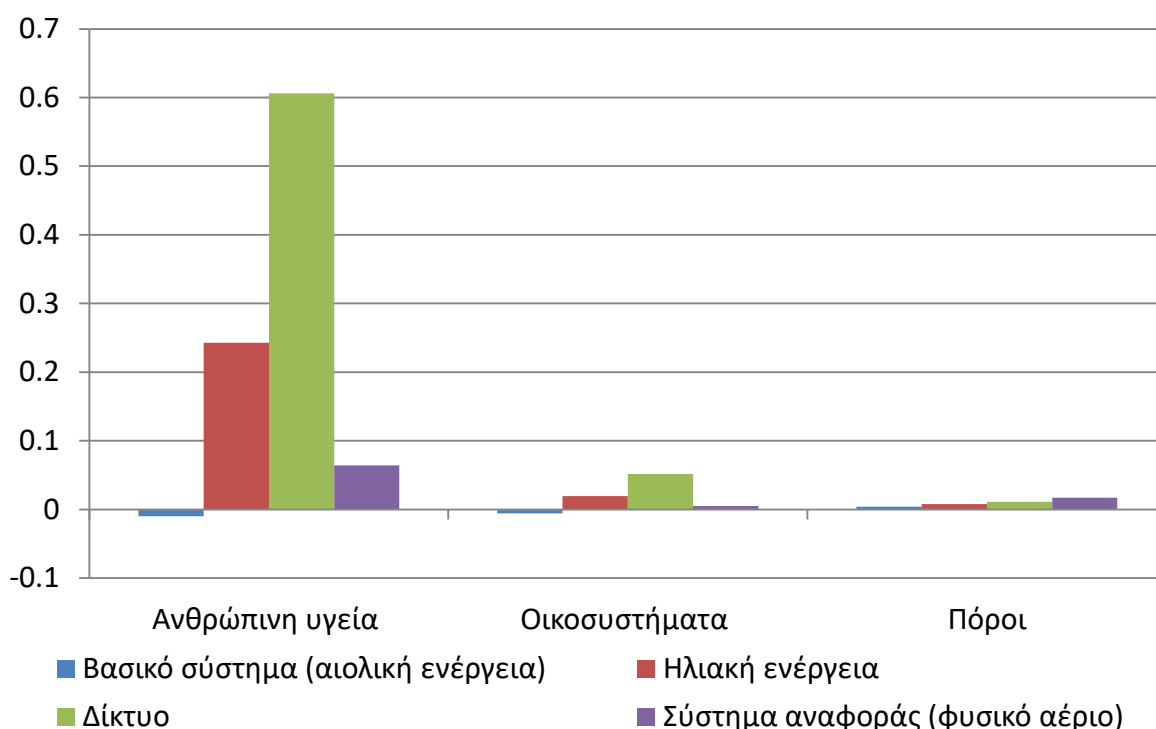


Εικόνα 5-15 Ισοδύναμες εκπομπές ιονίζουσας ακτινοβολίας για διαφορετικά σενάρια

Στα επόμενα διαγράμματα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα χαρακτηρισμού και κανονικοποίησης από την σύγκριση των διαφορετικών σεναρίων σε επίπεδο endpoint.



Εικόνα 5-16 Σύγκριση αποτελεσμάτων χαρακτηρισμού διαφορετικών σεναρίων σε επίπεδο endpoint



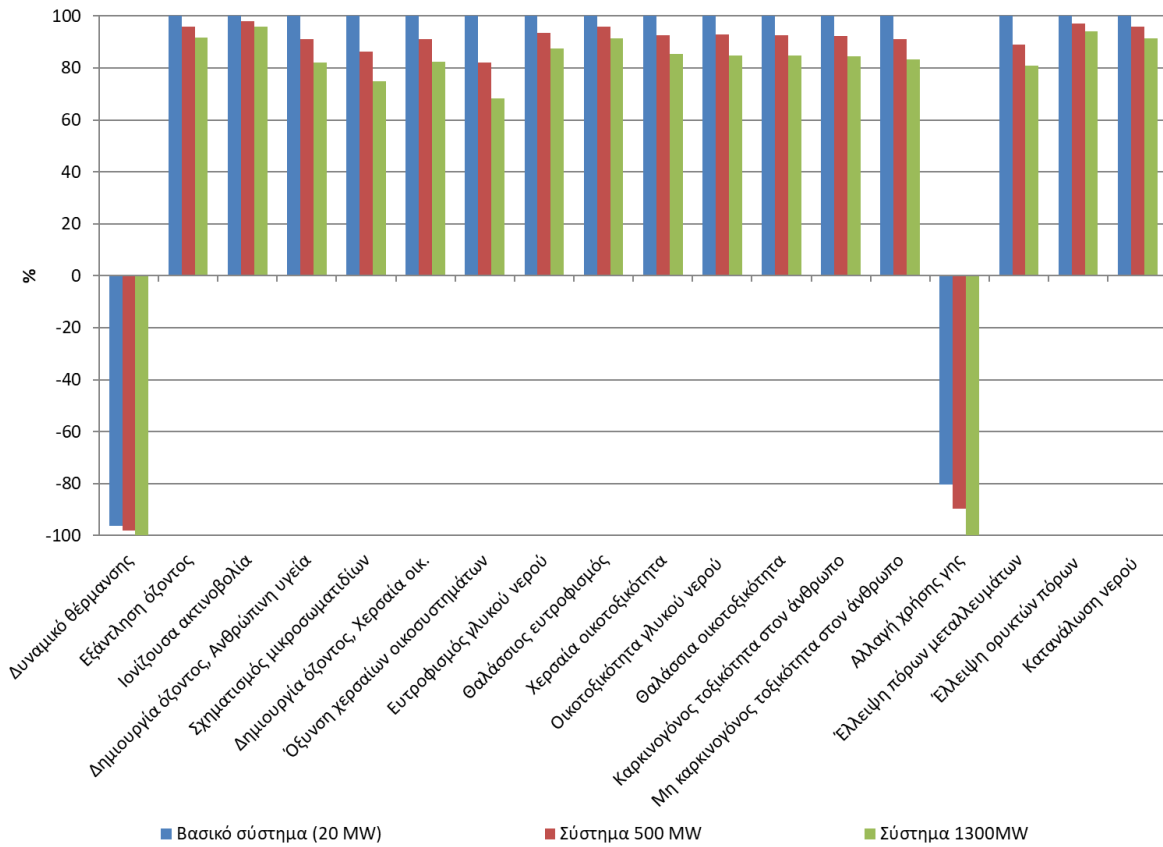
Εικόνα 5-17 Σύγκριση αποτελεσμάτων κανονικοποίησης σεναρίων σε επίπεδο endpoint

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της ανάλυσης σε επίπεδο endpoint, οι επιπτώσεις της μονάδας PtSNG στην ανθρώπινη υγεία και στα οικοσυστήματα, αυξάνονται κατά μία τάξη μεγέθους σε σχέση με το συμβατικό σενάριο, στην περίπτωση χρήσης ηλεκτρικής ενέργειας από το δίκτυο. Σημειώνεται ότι η διαφορά που παρατηρείται στην κατηγορία των πόρων, δηλαδή η υπερίσχυση του φυσικού αερίου σε αντίθεση με το επίπεδο midpoint όπου η περίπτωση του δικτύου παρουσίαζε αρκετά μεγαλύτερο αποτύπωμα, οφείλεται στο γεγονός ότι σε αυτή την κατηγορία η μέθοδος endpoint αναθέτει διαφορετικούς συντελεστές χαρακτηρισμού για κάθε ουσία, με το φυσικό αέριο να έχει τη μεγαλύτερη βαρύτητα ανάμεσα στα ορυκτά καύσιμα [54].

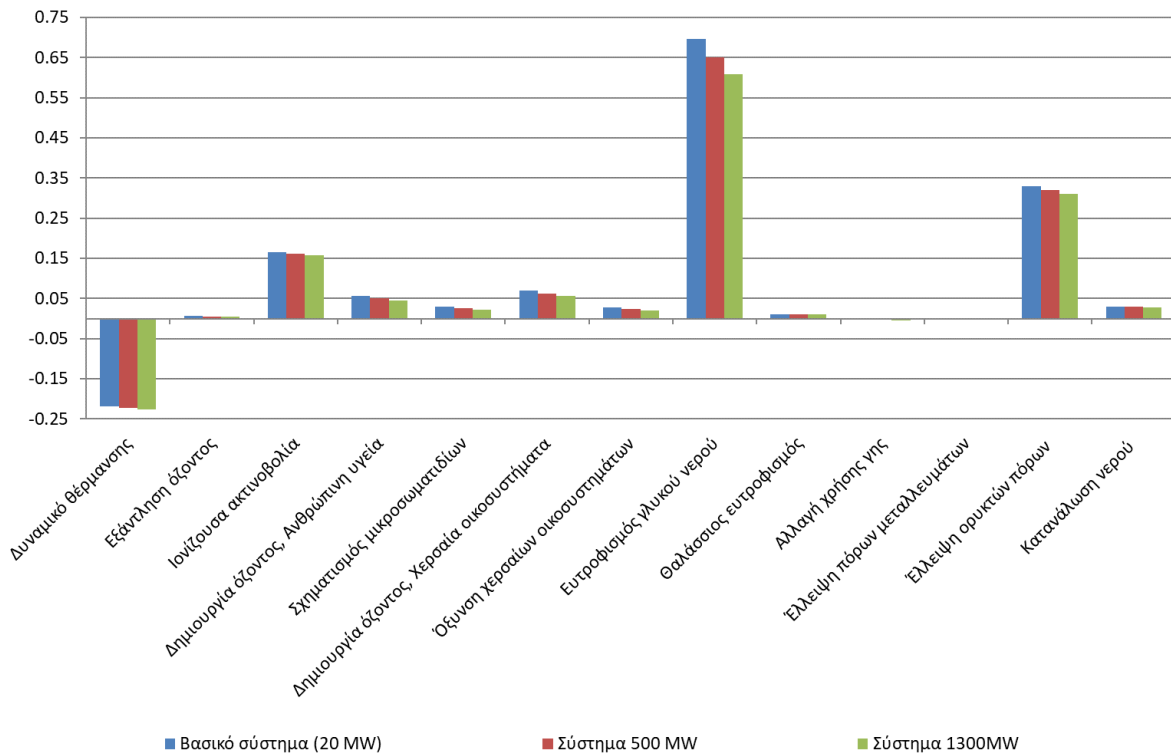
Τέλος, η περίπτωση χρήσης ηλιακής ενέργειας έχει επίσης σημαντικά μεγαλύτερες επιπτώσεις στις κατηγορίες της ανθρώπινης υγείας και των οικοσυστημάτων σε σχέση με την περίπτωση της παραγωγής φυσικού αερίου.

5.4 Σύγκριση συστημάτων διαφορετικών μεγεθών

Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από την σύγκριση τριών διαφορετικών συστημάτων, αναφορικά με το μέγεθος τους. Αυτά είναι το βασικό σύστημα ισχύος 20 MW, ένα σύστημα ισχύος 500 MW και τέλος ένα με ισχύ 1303 MW. Το τελευταίο διαστασιολογήθηκε έτσι ώστε να μπορεί να μετατρέψει όλο το διοξείδιο του άνθρακα που παράγεται από ένα εργοστάσιο τσιμέντου, το οποίο ορίσθηκε στα 45 kg CO₂ το δευτερόλεπτο. Δεδομένου του πολύ μεγάλου μεγέθους του συστήματος ηλεκτρόλυσης των δυο τελευταίων σεναρίων, αυτά λογίζονται ως μελλοντικά σενάρια – έτη 2030 και 2050 αντίστοιχα - και ως εκ τούτου ο βαθμός απόδοσης τους θεωρείται βελτιωμένος. Σύμφωνα με την βιβλιογραφία οι βαθμοί απόδοσης για συστήματα ηλεκτρόλυσης της τεχνολογίας PEM αναμένεται να είναι σε αυτά τα έτη ίσοι με 69,44 % [64] και 76,10 % [65] αντίστοιχα, με βάση την κατώτερη θερμογόνο ικανότητα του υδρογόνου. Συγκριτικά αναφέρεται ότι ο σημερινός βαθμός απόδοσης είναι ίσος με 64,76 % [62].



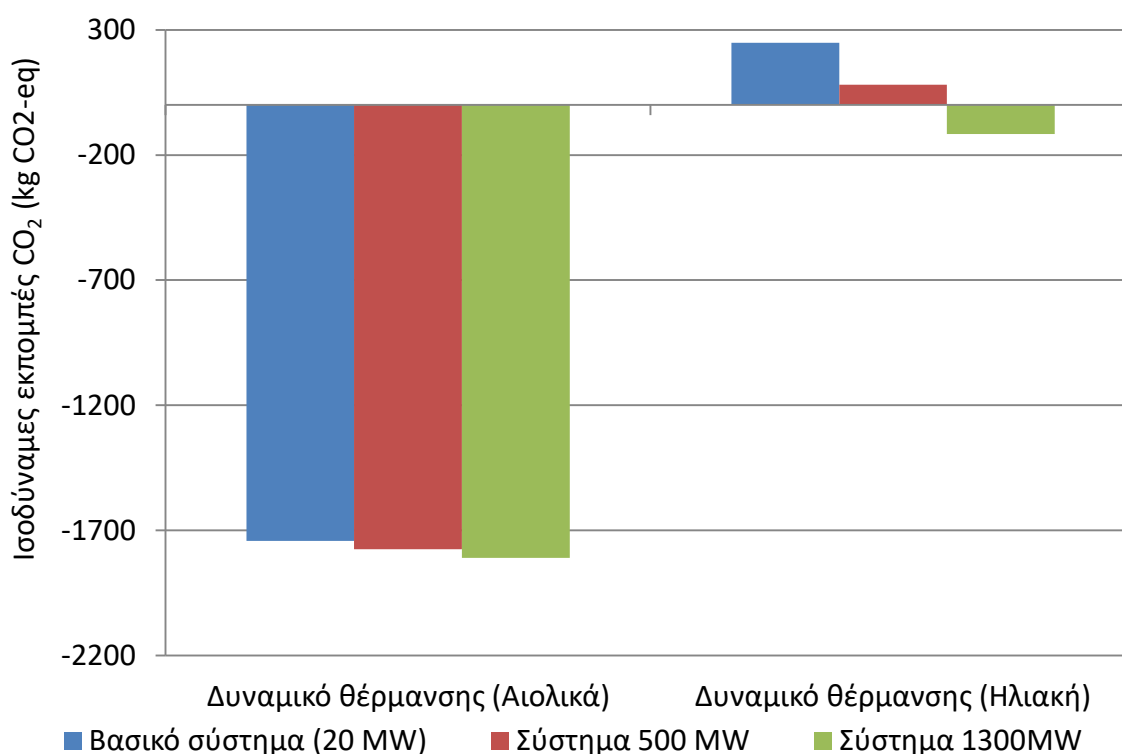
Εικόνα 5-18 Σύγκριση αποτελεσμάτων χαρακτηρισμού μεταξύ βασικού συστήματος (20 MW), συστήματος 500 MW και 1300 MW



Εικόνα 5-19 Σύγκριση αποτελεσμάτων κανονικοποίησης μεταξύ βασικού συστήματος (20 MW), συστήματος 500 MW και 1300 MW

Η βελτίωση του βαθμού απόδοσης κατά 7 % και 18 % στα μελλοντικά σενάρια είχε μικρή επίδραση στην μείωση του δυναμικού θέρμανσης, ίση με 2 % και 4 % αντίστοιχα, το οποίο είναι αναμενόμενο καθώς όπως έδειξε και η ανάλυση του βασικού συστήματος, η συνεισφορά του συστήματος ηλεκτρόλυσης σε αυτή την κατηγορία είναι ίση με 14,5 %. Στην κατηγορία της ΟΧΟ όμως βλέπουμε μείωση των επιπτώσεων κατά 18 και 32 %, το οποίο αφενός οφείλεται στην μείωση της χρήσης ηλεκτρικής ενέργειας, αφετέρου στην μείωση της ποσότητας των υλικών κατασκευής του συστήματος, λόγω του συντελεστή αναγωγής που λήφθηκε υπόψη. Το ίδιο φαινόμενο παρατηρείται και στην κατηγορία σχηματισμού μικροσωματιδίων με μικρότερη όμως συμβολή.

Η περίπτωση της ηλιακής ενέργειας είναι διαφορετική, στην οποία παρατηρείται σημαντική μείωση των ισοδύναμων εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα ίση με 68 % και 147 % αντίστοιχα, με αποτέλεσμα να επιτυγχάνει αρνητικό ισοζύγιο στο σενάριο του 2050 ίσο με -116 kg CO₂-eq.



Εικόνα 5-20 Μεταβολή ισοδύναμων εκπομπών διοξειδίου για τα σενάρια 20, 500 και 1300 MW

5.5 Ανάλυση ευαισθησίας

Σε αυτή την παράγραφο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της ανάλυσης ευαισθησίας που πραγματοποιήθηκε για τις σημαντικότερες υποθέσεις που έγιναν κατά την διάρκεια της παρούσας εργασίας. Αυτές είναι η επιλογή συντελεστή διαθεσιμότητας ίσου με 0,7, ο ορισμός των ετών λειτουργίας της εγκατάστασης στα 20 έτη. Επιπλέον εξετάστηκε και η επίδραση από την μεταβολή των υλικών του συστήματος μεθανοποίησης και του συστήματος ηλεκτρόλυσης, όπως επίσης και από την μεταβολή των ενεργειακών

καταναλώσεων του συστήματος. Στον επόμενο πίνακα συνοψίζονται οι μεταβολές που εφαρμόστηκαν σε για κάθε περίπτωση.

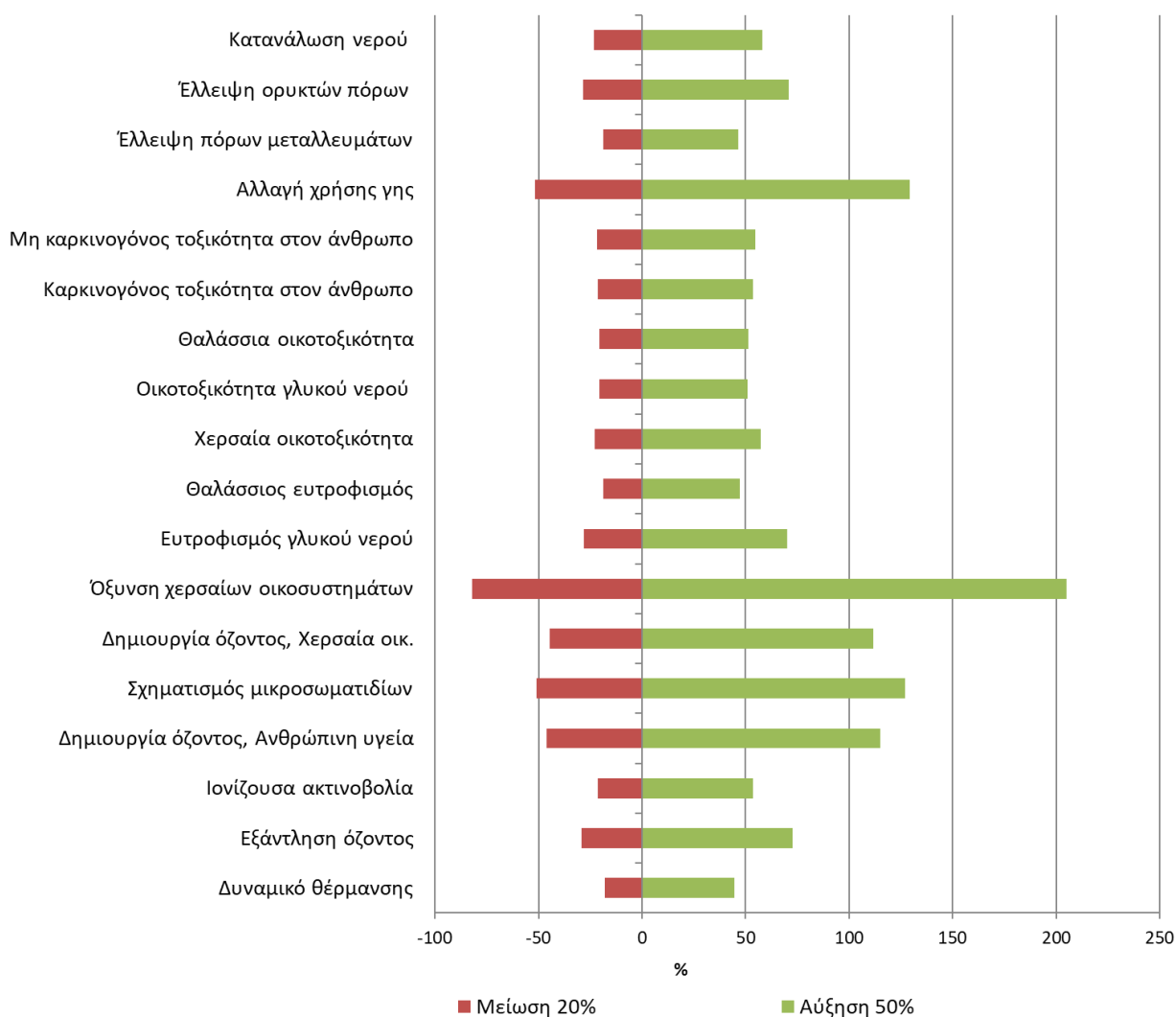
Πίνακας 5-1 Ανάλυση ευαισθησίας: Ποσοστά μεταβολών παραμέτρων

Παράμετρος	Εύρος ποσοστού μεταβολής %
Συντελεστής διαθεσιμότητας (AF)	[-14.3, 14.3]
Έτη λειτουργίας	[-15, 100]
Ενεργειακές καταναλώσεις	[-20, 50]
Ποσότητα υλικών κατασκευής συστήματος μεθανοποίησης	[-30, 30]
Ποσότητα υλικών κατασκευής συστήματος ηλεκτρόλυσης	[-30, 30]

Στο επόμενο διάγραμμα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της ανάλυσης ευαισθησίας για την μεταβολή των ενεργειακών καταναλώσεων κατά -20 % και + 50 %. Στις περισσότερες κατηγορίες επιπτώσεων η ποσοστιαία μεταβολή αυτών είναι σχεδόν ίση με την αντίστοιχη μεταβολή στις ενεργειακές καταναλώσεις, γεγονός που υποδεικνύει την ολοκληρωτική εξάρτηση αυτών από την κατανάλωση ενέργειας.

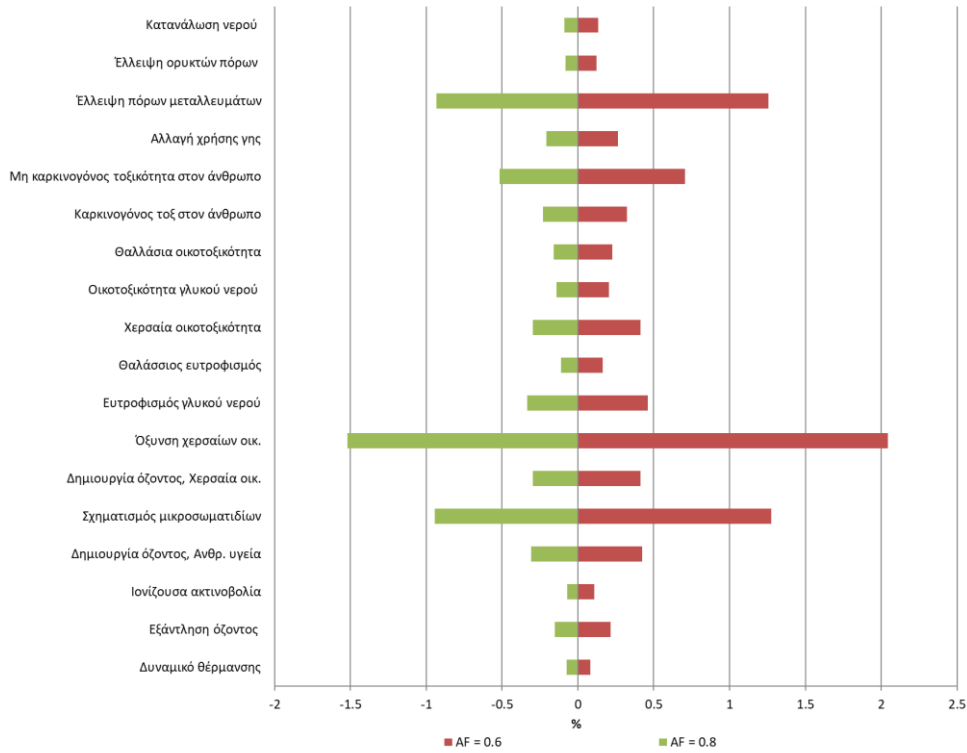
Η μεταβολή των ενεργειακών καταναλώσεων στην κατηγορία ΟΧΟ είχε ως αποτέλεσμα την μεταβολή της ποσοστιαίας συνεισφοράς κατά τέσσερις φορές, δηλαδή -82 και 205 % αντίστοιχα. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η αξιοποιούμενη θερμότητα από τους αντιδραστήρες, η οποία έχει μεγάλη συνεισφορά στη μείωση των επιπτώσεων αυτής της κατηγορίας (ίση με 76 % στο βασικό σενάριο) παρέμεινε ίδια οπότε η συνεισφορά της στα σενάρια μείωσης και αύξησης των καταναλώσεων, ήταν αντίστοιχα μεγαλύτερη και μικρότερη.

Στις κατηγορίες ΑΧΓ, ΔΟΧ, ΔΟΑ και ΣΜ, οι ποσοστιαίες μεταβολές στις συνεισφορές είναι κατά 2,5 φορές μεγαλύτερες από την αντίστοιχη των ενεργειακών καταναλώσεων, δηλαδή της τάξης του 50 % για την περίπτωση της μείωσης και της τάξης του 130 % για την περίπτωση αύξησης των ενεργειακών καταναλώσεων. Όπως και πριν, αυτό οφείλεται στην μεταβολή της αναλογίας μεταξύ της αξιοποιούμενης απαγόμενης θερμότητας και τις ενεργειακές καταναλώσεις, με την διαφορά ότι σε αυτές τις κατηγορίες εκτός της κατανάλωσης ενέργειας στο σύστημα ηλεκτρόλυσης, η συνεισφορά των υπόλοιπων καταναλώσεων είναι μικρότερη από ότι στην κατηγορία ΟΧΟ και συνεπώς η μεταβολή .

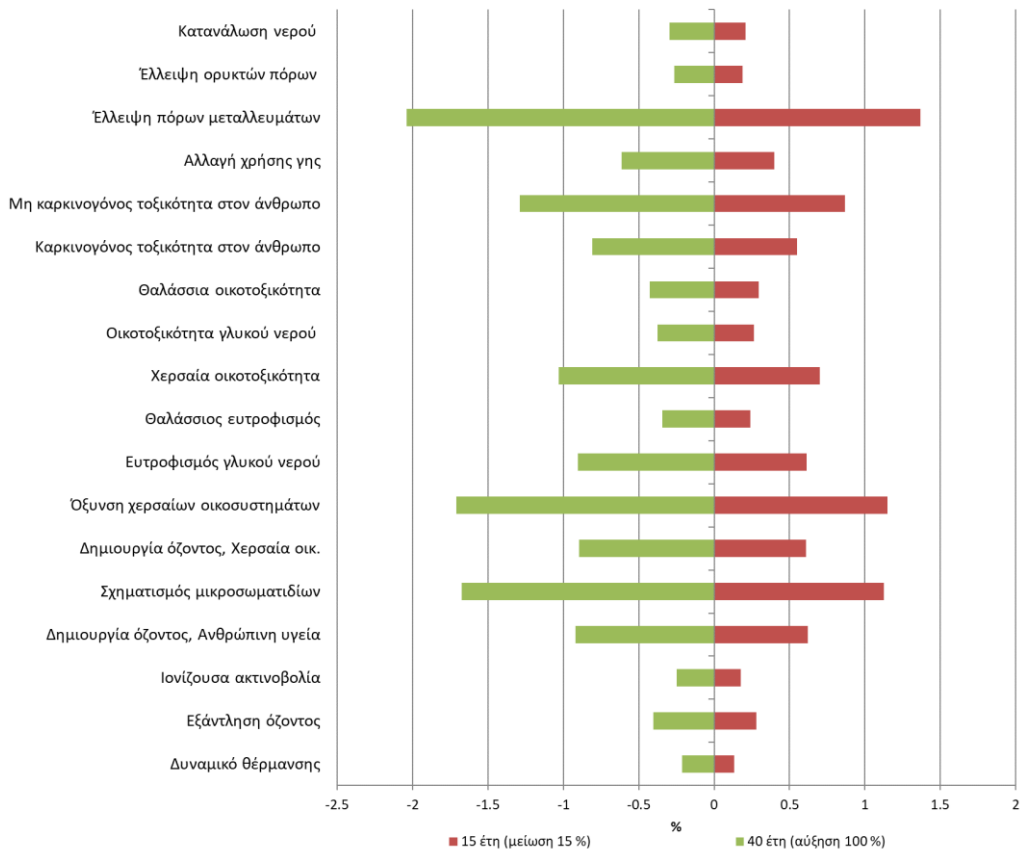


Εικόνα 5-21 Ποσοστιαία μεταβολή επιπτώσεων βασικού συστήματος με μεταβολή των ολικών ενεργειακών καταναλώσεων

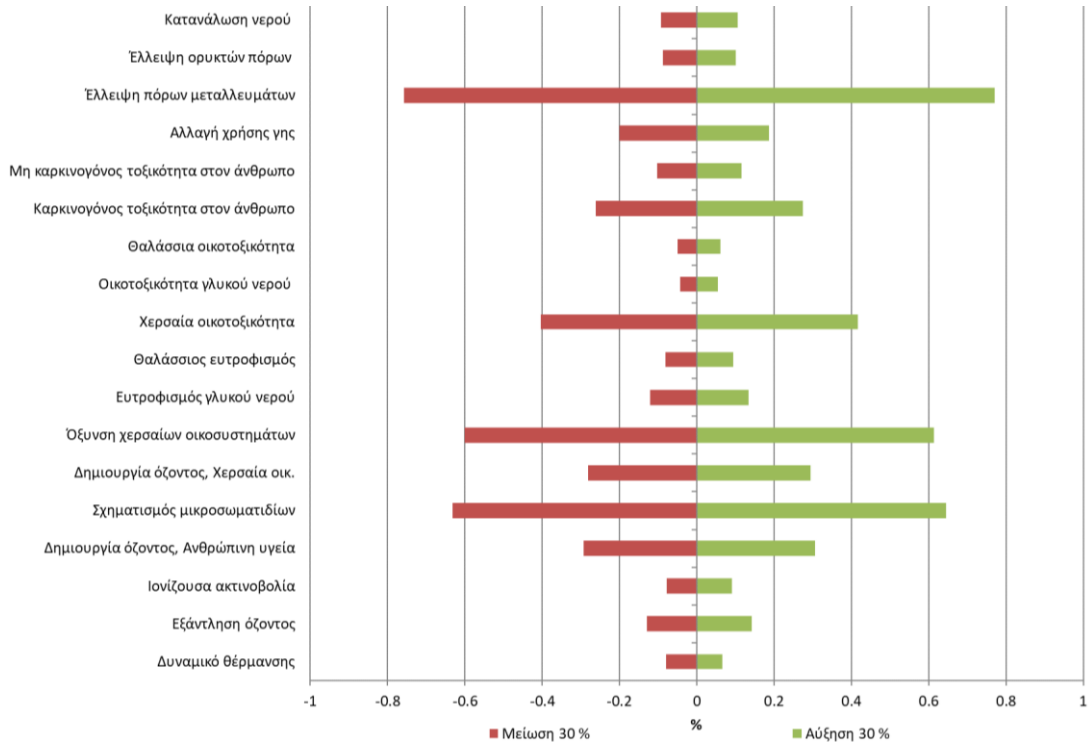
Στα επόμενα διαγράμματα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από την ανάλυση ευαισθησίας για την μεταβολή του συντελεστή διαθεσιμότητας, των ετών λειτουργίας της εγκατάστασης, της ποσότητας υλικών του συστήματος ηλεκτρόλυσης και της ποσότητας υλικών του συστήματος μεθανοποίησης αντίστοιχα. Οι ποσοστιαίες μεταβολές για αυτές τις περιπτώσεις είναι αμελητέες σε σχέση με το ποσοστό μεταβολής της αντίστοιχης παραμέτρου, το οποίο οφείλεται στην πολύ μικρή συνεισφορά της φάσης κατασκευής της εγκατάστασης σε σχέση με αυτή της λειτουργίας.



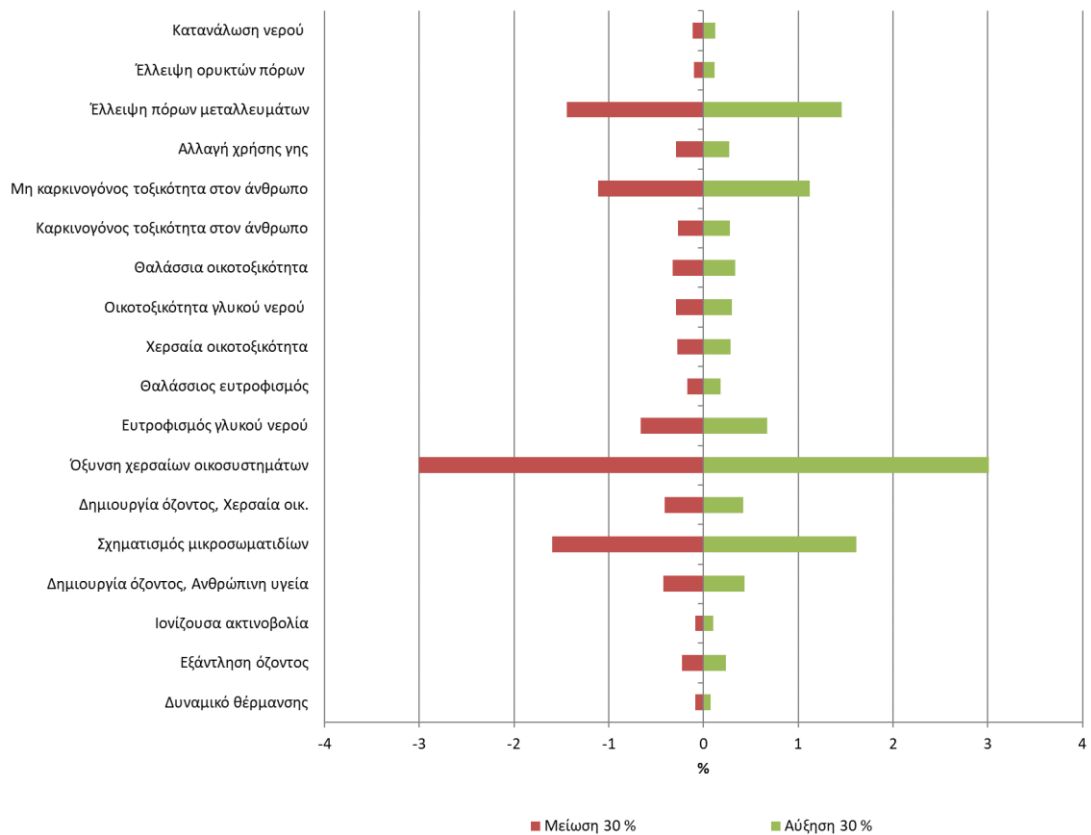
Εικόνα 5-22 Ποσοστιαία μεταβολή επιπτώσεων βασικού συστήματος με μεταβολή του συντελεστή διαθεσιμότητας



Εικόνα 5-23 Ποσοστιαία μεταβολή επιπτώσεων βασικού συστήματος με μεταβολή των ετών λειτουργίας της μονάδας



Εικόνα 5-24 Ποσοστιαία μεταβολή επιπτώσεων βασικού συστήματος με μεταβολή υλικών του συστήματος μεθανοποίησης



Εικόνα 5-25 Ποσοστιαία μεταβολή επιπτώσεων βασικού συστήματος με μεταβολή των υλικών του συστήματος ηλεκτρόλυσης

6. Συμπεράσματα και προτάσεις

6.1 Συζήτηση αποτελεσμάτων και συμπεράσματα

Στην παρούσα εργασία πραγματοποιήθηκε η ανάλυση κύκλου ζωής μίας μονάδας Power-to-SNG με σκοπό τον υπολογισμό των επιπτώσεων της παραγωγής συνθετικού φυσικού αερίου, αλλά και της σύγκρισης αυτών με την συμβατική περίπτωση φυσικού αερίου. Χρησιμοποιώντας την μέθοδο *Recipe 2016*, υπολογίσθηκε η συνεισφορά του συστήματος στις 18 κατηγορίες επιπτώσεων του επιπέδου midpoint, σε μία σειρά διαφορετικών περιπτώσεων. Η ανάλυση του βασικού συστήματος, το οποίο χρησιμοποιεί αιολική ενέργεια για τους σκοπούς της ηλεκτρόλυσης, έδειξε ότι η ενέργεια αυτή είναι υπεύθυνη για το μεγαλύτερο ποσοστό του αποτυπώματος σε όλες σχεδόν τις κατηγορίες αποτελώντας τον καθοριστικό παράγοντα της περιβαλλοντικής απόδοσής του. Δεύτερη σε σειρά συνεισφοράς, ήταν η επίπτωση της απαιτούμενης θερμότητας για την διεργασία δέσμευσης CO₂. Η αξιοποίηση της απαγόμενης θερμότητας από τους αντιδραστήρες αποδείχθηκε πρωταρχικής σημασίας με το ποσοστό συνεισφοράς της στην μείωση των επιπτώσεων στην κλιματική αλλαγή να είναι ίσο με 21 %, ενώ στις κατηγορίες όξυνσης χερσαίων οικοσυστημάτων και αλλαγής χρήσης γης, το ποσοστό μείωσης ήταν 43 και 58 % αντίστοιχα.

Οι συνεισφορά από τις φάσεις κατασκευής και απόρριψης του συστήματος ήταν αμελητέες σε όλες τις περιπτώσεις πλην της όξυνσης χερσαίων οικοσυστημάτων (OXO) όπου η συνεισφορά βρέθηκε ίση με 10 %. Το περιβαλλοντικό αποτύπωμα του βασικού συστήματος στις κατηγορίες οικοτοξικότητας εξαρτάται σχεδόν αποκλειστικά από την επιλογή της μεθόδου απόρριψης των υλικών των ανεμογεννητριών και σύμφωνα με τα αποτελέσματα κανονικοποίησης, λαμβάνει κυρίαρχο ρόλο ανάμεσα σε όλες τις κατηγορίες επιπτώσεων στην περίπτωση που τα χάλκινα τμήματα αποτεφρώνονται. Το βασικού συστήματος επιτυγχάνει αρνητικό ισοζύγιο άνθρακα ίσο με -1742 kg CO₂ ανά τόνο SNG, ενώ η σύγκριση του με αυτό του φυσικού αερίου έδειξε ότι η μείωση των εκπομπών είναι της τάξης του 270 %. Σημαντική είναι επίσης η μείωση των επιπτώσεων στην κατηγορία της έλλειψης ορυκτών πόρων, η οποία βρέθηκε ίση με 76 %.

Για το σενάριο χρήσης ηλιακής ενέργειας, η μείωση των επιπτώσεων στις κατηγορίες της κλιματικής αλλαγής και της έλλειψης ορυκτών πόρων υπολογίσθηκαν ίσες με -74 % και -40 % αντίστοιχα, αλλά το σύστημα στην περίπτωση αυτή είχε σημαντικά μεγαλύτερες επιπτώσεις σε όλες τις άλλες κατηγορίες επιπτώσεων σε σχέση με το φυσικό αέριο. Χαρακτηριστική είναι η επίπτωση του συστήματος ηλιακής ενέργειας στην χερσαία οικοτοξικότητα αλλά και στην έλλειψη πόρων μεταλλευμάτων, ξεπερνώντας όλες τις υπόλοιπες περιπτώσεις κατά τουλάχιστον 90 και 50 % αντίστοιχα, γεγονός που οφείλεται στη εξόρυξη πρώτων υλών που απαιτούνται για την παραγωγή των πολυκρυσταλλικών πάνελ πυριτίου. Το περιβαλλοντικό αποτύπωμα για την περίπτωση χρήσης ενέργειας από το δίκτυο ήταν κυρίαρχο σχεδόν σε όλες τις κατηγορίες επιπτώσεων, ενώ χαρακτηριστικά αναφέρεται ότι οι εκπομπές διοξειδίου ήταν 6 φορές μεγαλύτερες από το σενάριο του φυσικού αερίου ενώ η ιονίζουσα ακτινοβολία 24 φορές μεγαλύτερη από αυτή του βασικού συστήματος. Περαιτέρω

ανάλυση σε επίπεδο endpoint επιβεβαιώνει τα παραπάνω, με τις επιπτώσεις στις κατηγορίες τόσο της ανθρώπινης υγείας όσο και της ποιότητας οικοσυστημάτων να είναι μεγαλύτερες κατά 4 φορές για την περίπτωση της ηλιακής ενέργειας και κατά 10 φορές για το σενάριο χρήσης δικτύου, συγκριτικά με το σενάριο του φυσικού αερίου.

Σχετικά με τα μελλοντικά σενάρια για το 2030 και 2050, η βελτίωση του βαθμού απόδοσης ηλεκτρόλυσης κατά 7 και 18 % συνέβαλε στην μείωση των εκπομπών CO₂ του βασικού συστήματος κατά 2 και 4 % αντίστοιχα, ενώ η μείωση για το σύστημα ηλιακής ενέργειας ήταν σημαντικά μεγαλύτερη, ίση με 68 και 147 % αντίστοιχα. Στο τελευταίο το σύστημα ηλιακής ενέργειας επιτυγχάνει αρνητικό ισοζύγιο άνθρακα ίσο με -116 kg CO₂-eq.

Η ανάλυση ευαισθησίας επιβεβαιώνει την αμελητέα συνεισφορά της φάσης κατασκευής στις συνολικές επιπτώσεις του συστήματος με μέγιστη αύξηση των επιπτώσεων 3 % στην περίπτωσης αύξησης των υλικών του συστήματος ηλεκτρόλυσης κατά 30 %. Αντιθέτως η ποσοστιαία μεταβολή των ολικών ενεργειακών καταναλώσεων του συστήματος είχε σημαντική συνεισφορά στις επιπτώσεις των κατηγοριών ΑΧΓ, ΔΟΑ, ΔΟΧ και ΣΜ των οποίων η ποσοστιαία μεταβολή ήταν 2,5 φορές μεγαλύτερη από την αντίστοιχη μεταβολή, ενώ στην κατηγορία ΟΧΟ η αντίστοιχη μεταβολή ήταν 4 φορές μεγαλύτερη.

6.2 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Λόγω της παράλειψης των συνοδευτικών τμημάτων της εγκατάστασης, όπως για παράδειγμα των δεξαμενών και των σωληνώσεων, αλλά και της έλλειψης αναλυτικών δεδομένων κατασκευής των τμημάτων που λήφθηκαν υπόψη, η ακρίβεια των αποτελεσμάτων συνεισφοράς της φάσης κατασκευής και απόρριψης στο συνολικό αποτύπωμα του συστήματος είναι περιορισμένη. Κατά συνέπεια, η εκπόνηση μίας ανάλυσης κύκλου ζωής χρησιμοποιώντας εξειδικευμένα (foreground) δεδομένα κατασκευής για το σύνολο των μερών της εγκατάστασης, θα συνεισέφερε στην ακριβέστερη αποτύπωση των επιπτώσεων αυτής. Επιπλέον, η επέκταση των ορίων του συστήματος ώστε να εμπεριέχεται και η φάση παραγωγής ηλεκτρισμού (Power-to-SNG-to-Power) θα ήταν επίσης ουσιώδης προκειμένου να γίνει σύγκριση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων του συστήματος με τις αντίστοιχες επιπτώσεις άλλων συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας όπως η μπαταρίες και η αντλησιοταμίευση. Τέλος, η αξιοποίηση του παραγόμενου οξυγόνου από την ηλεκτρόλυση, φάνηκε πως έχει σημαντικές δυνατότητες για βελτίωση του αποτυπώματος του συστήματος, στην περίπτωση αντικατάστασης αυτού που παράγεται με την συμβατική κρυογονική μέθοδο, η οποία όμως δεν λήφθηκε υπόψη λόγω έλλειψης δεδομένων σχετικά με τις ενδιάμεσες καταναλώσεις μέχρι την διάθεση αυτού στην αγορά (συμπίεση, καθαρισμός κ.α). Ως εκ τούτου, προτείνεται η συλλογή των εν λόγω δεδομένων και η επέκταση των ορίων του εξεταζόμενου συστήματος ώστε να λαμβάνεται υπόψη η μείωση των επιπτώσεων από την αντικατάσταση του παραγόμενου με την κρυογονική μέθοδο οξυγόνου.

Ευρετήριο Πινάκων

Πίνακας 2-1 Σύνοψη αποτελεσμάτων βιβλιογραφικής ανασκόπησης	24
Πίνακας 4-1 Υλικά και ενέργεια κατασκευής συστήματος ηλεκτρόλυσης.....	39
Πίνακας 4-2 Κατάλογος υλικών συντήρησης συστήματος ηλεκτρόλυσης.....	39
Πίνακας 4-3 Κατάλογος υλικών και διεργασιών συστήματος μεθανοποίησης	40
Πίνακας 4-4 Κατάλογος υλικών συστήματος αναβάθμισης SNG.....	40
Πίνακας 4-5 Κατάλογος απογραφής συμπιεστή διοξειδίου του άνθρακα	41
Πίνακας 4-6 Ισολογισμοί μαζών συστήματος.....	42
Πίνακας 4-7 Τεχνικά χαρακτηριστικά ηλεκτρολύτη SILYZER 300 [62].....	43
Πίνακας 4-8 Λειτουργικές παράμετροι συστημάτων μεθανοποίησης και αναβάθμισης	44
Πίνακας 4-9 Λειτουργικές παράμετροι συστήματος διοξειδίου του άνθρακα.....	44
Πίνακας 5-1 Ανάλυση ευαισθησίας: Ποσοστά μεταβολών παραμέτρων	61
Πίνακας I-1 Πίνακας εισόδου SimaPro για κατασκευή συστήματος ηλεκτρόλυσης	74
Πίνακας I-2 Πίνακας εισόδου SimaPro για συντήρηση συστήματος ηλεκτρόλυσης	74
Πίνακας I-3 Πίνακας εισόδου SimaPro για κατασκευή συστήματος μεθανοποίησης.....	75
Πίνακας I-4 Πίνακας εισόδου SimaPro για κατασκευή συστήματος αναβάθμισης.....	76
Πίνακας I-5 Πίνακας εισόδου Sima Pro για κατασκευή συμπιεστή CO2	77
Πίνακας I-6 Πίνακας εισόδων διεργασιών φάσης λειτουργίας συστήματος.....	78
Πίνακας II-1 Αποτελέσματα χαρακτηρισμού βασικού συστήματος, ανά λειτουργική μονάδα	79
Πίνακας II-2 Αποτελέσματα χαρακτηρισμού συστήματος 20 MW με ολική κάλυψη ηλεκτρικών από αιολική ενέργεια	80
Πίνακας II-3 Αποτελέσματα χαρακτηρισμού συστήματος 20 MW με χρήση ηλιακής ενέργειας, ανά λειτουργική μονάδα.....	81
Πίνακας II-4 Αποτελέσματα χαρακτηρισμού συστήματος 20 MW με χρήση ηλεκτρισμού από το δίκτυο, ανά λειτουργική μονάδα.....	82
Πίνακας II-5 Σύγκριση αποτελεσμάτων χαρακτηρισμού συστήματος προϊόντος υπό διαφορετικές πηγές ενέργειας με σενάριο φυσικού αερίου, ανά λειτουργική μονάδα.	83
Πίνακας II-6 Σύγκριση αποτελεσμάτων χαρακτηρισμού συστημάτων διαφορετικών μεγεθών, ανά λειτουργική μονάδα. Χρήση αιολικής ενέργειας.....	84
Πίνακας II-7 Σύγκριση αποτελεσμάτων χαρακτηρισμού συστημάτων διαφορετικών μεγεθών, ανά λειτουργική μονάδα. Χρήση ηλιακής ενέργειας.....	85

Ευρετήριο Εικόνων

Εικόνα 1-1: Διαχρονική μεταβολή της συγκέντρωσης διοξειδίου του άνθρακα στην ατμόσφαιρα [2]	10
Εικόνα 1-2: Συγκέντρωση διοξειδίου του άνθρακα στο παρατηρητήριο Mauna Loa [3]	11
Εικόνα 1-3: Προβλέψεις θέρμανσης για το 2100. Εκπομπές και αναμενόμενη θέρμανση βάση δεσμεύσεων και σημερινών πολιτικών [8]	12
Εικόνα 1-4: Ιστορικότητα ισοδύναμων εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα ανά τομέα οικονομίας [13]	13
Εικόνα 1-5: Ποσότητα εγκατεστημένης ισχύος από ΑΠΕ φθηνότερη από νέες εγκαταστάσεις ορυκτών καυσίμων [20]	14
Εικόνα 1-6: Τάσεις κόστους ανά μονάδα εγκατεστημένης ισχύος, συντελεστών εκμεταλλευσιμότητας και ανηγμένου κόστους ενέργειας ανά τεχνολογία για το 2010 και το 2020 [20]	15
Εικόνα 2-1 Εφοδιαστική αλυσίδα συστημάτων Power-to-Gas [27]	17
Εικόνα 2-2 Χρόνος αποφόρτισης συναρτήσει της χωρητικότητας για διάφορα συστήματα αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας [34]	18
Εικόνα 2-3 Διάγραμμα Sankey απωλειών ενέργειας κατά τα διαδοχικά στάδια μετατροπών ενός συστήματος Power-to-SNG-to-Power [34]	19
Εικόνα 2-4: Απλουστευμένη απεικόνιση ηλεκτρολυτικής κυψέλης PEM [39]	20
Εικόνα 3-1: Στάδια ανάλυσης κύκλου ζωής [51]	26
Εικόνα 3-2: παράδειγμα βασικής διεργασίας : απλουστευμένη αναπαράσταση έλασης φύλλου χάλυβα [51]	28
Εικόνα 3-3 Απεικόνιση παραδείγματος δείκτη κατηγορίας επίπτωσης	30
Εικόνα 4-1: Σχηματική αναπαράσταση εξεταζόμενης διάταξης [22]	33
Εικόνα 5-1 Αποτελέσματα χαρακτηρισμού βασικού συστήματος	45
Εικόνα 5-2 Αποτελέσματα κανονικοποίησης βασικού συστήματος	46
Εικόνα 5-3 Αποτελέσματα κανονικοποίησης βασικού συστήματος χωρίς τις κατηγορίες τοξικότητας και ευτροφισμού γλυκού νερού	47
Εικόνα 5-4 Συνεισφορά της επιλεγμένης διεργασίας παραγωγής ενέργειας από χερσαία αιολικά στις κατηγορίες οικοτοξικότητας και ευτροφισμού	48
Εικόνα 5-5 Συνεισφορά διεργασιών του κύκλου ζωής χερσαίων αιολικών στην θαλάσσια οικοτοξικότητα	48
Εικόνα 5-6 Συνεισφορά φάσεων κατασκευής και απόρριψης των τμημάτων της εγκατάστασης στον κύκλο ζωής του βασικού συστήματος	49
Εικόνα 5-7 Ποσοστιαία μεταβολή επιπτώσεων για αποκλειστική χρήση αιολικής ενέργειας	50
Εικόνα 5-8 Σύγκριση αποτελεσμάτων χαρακτηρισμού βασικού συστήματος με σύστημα αναφοράς(Παραγωγή και μεταφορά 1 τόνου Φ.Α στην Αυστρία)	51
Εικόνα 5-9 Σύγκριση αποτελεσμάτων κανονικοποίησης βασικού συστήματος με σύστημα αναφοράς(Παραγωγή και μεταφορά 1 τόνου Φ.Α στην Αυστρία)	52
Εικόνα 5-10 Συνεισφορά διεργασιών βασικού συστήματος στην ιονίζουσα ακτινοβολία	53
Εικόνα 5-11 Σύγκριση αποτελεσμάτων χαρακτηρισμού συμβατικού σεναρίου και συστήματος προϊόντος υπό διαφορετικές πηγές ενέργειας	54

Εικόνα 5-12 Ισοδύναμες εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα για τα διαφορετικά σενάρια	54
Εικόνα 5-13 Σύγκριση αποτελεσμάτων κανονικοποίησης σεναρίων συστήματος με φυσικό αέριο	55
Εικόνα 5-14 Σύγκριση αποτελεσμάτων κανονικοποίησης βασικού συστήματος με εναλλακτικές πηγές ενέργειας χωρίς τις κατηγορίες τοξικότητας και ευτροφισμού	56
Εικόνα 5-15 Ισοδύναμες εκπομπές ιονίζουσας ακτινοβολίας για διαφορετικά σενάρια	56
Εικόνα 5-16 Σύγκριση αποτελεσμάτων χαρακτηρισμού διαφορετικών σεναρίων σε επίπεδο endpoint	57
Εικόνα 5-17 Σύγκριση αποτελεσμάτων κανονικοποίησης σεναρίων σε επίπεδο endpoint	57
Εικόνα 5-18 Σύγκριση αποτελεσμάτων χαρακτηρισμού μεταξύ βασικού συστήματος (20 MW), συστήματος 500 MW και 1300 MW	59
Εικόνα 5-19 Σύγκριση αποτελεσμάτων κανονικοποίησης μεταξύ βασικού συστήματος (20 MW), συστήματος 500 MW και 1300 MW	59
Εικόνα 5-20 Μεταβολή ισοδύναμων εκπομπών διοξειδίου για τα σενάρια 20, 500 και 1300 MW	60
Εικόνα 5-21 Ποσοστιαία μεταβολή επιπτώσεων βασικού συστήματος με μεταβολή των ολικών ενεργειακών καταναλώσεων	62
Εικόνα 5-22 Ποσοστιαία μεταβολή επιπτώσεων βασικού συστήματος με μεταβολή του συντελεστή διαθεσιμότητας	63
Εικόνα 5-23 Ποσοστιαία μεταβολή επιπτώσεων βασικού συστήματος με μεταβολή των ετών λειτουργίας της μονάδας	63
Εικόνα 5-24 Ποσοστιαία μεταβολή επιπτώσεων βασικού συστήματος με μεταβολή υλικών του συστήματος μεθανοποίησης	64
Εικόνα 5-25 Ποσοστιαία μεταβολή επιπτώσεων βασικού συστήματος με μεταβολή των υλικών του συστήματος ηλεκτρόλυσης	64

Βιβλιογραφία

- [1] L. Hoesung , «Climate Change Synthesis Report 2023 - Summary for Policymakers,» 2023.
- [2] U. Nations, «What is Climate Change?,» 2020. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.un.org/en/climatechange/what-is-climate-change>.
- [3] «Berkeley Earth, Data visualization : 10000 years of carbon dioxide.,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://berkeleyearth.org/dv/10000-years-of-carbon-dioxide/>.
- [4] NOAA Global Monitoring Laboratory & Scripps Institution of Oceanography, «Atmospheric CO2 at Mauna Loa Observatory,» 2023. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://gml.noaa.gov/ccgg/trends/mlo.html>.
- [5] (UNFCCC), United Nations Climate Change, «What is the Paris Agreement?,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement>.
- [6] European Commission, «2030 Climate & Energy Framework,» [Ηλεκτρονικό]. Available: https://climate.ec.europa.eu/eu-action/climate-strategies-targets/2030-climate-energy-framework_en.
- [7] Ευρωπαϊκό Συμβούλιο Συμβούλιο της Ευρωπαϊκής Ένωσης, «Δέσμη Fit for 55,» 2023. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.consilium.europa.eu/el/policies/green-deal/fit-for-55-the-eu-plan-for-a-green-transition/>.
- [8] National Oceanic and Atmospheric Administration, US Department of Commerce, «Greenhouse gases continued to increase rapidly in 2022.,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.noaa.gov/news-release/greenhouse-gases-continued-to-increase-rapidly-in-2022>.
- [9] A. Olhoff και et al., «World Meteorological Organization (WMO), United in Science 2022.,» [Ηλεκτρονικό]. Available: https://public.wmo.int/en/resources/united_in_science.
- [10] Climate Action Tracker, «2100 Warming Projections,» 2022. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://climateactiontracker.org/global/temperatures/>.
- [11] International Energy Agency (IEA), «Fuels and technologies: Gas, 2020,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.iea.org/fuels-and-technologies/gas>.
- [12] C. McGlade και et al., «The future role of natural gas in the UK: A bridge to nowhere?,» 2017.
- [13] T. Bruckner και et al., «Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change, Chapter 7: Energy Systems,» 2014.
- [14] US Energy Information Administration, «Natural gas explained Natural gas pipelines,» 2022. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.eia.gov/energyexplained/natural-gas/natural-gas-pipelines.php>.

- [15] «Climate Watch,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.climatewatchdata.org/ghg-emissions?breakBy=sector&source=Climate%20Watch>.
- [16] ΓΕΚ ΤΕΡΝΑ, « Πλεονεκτήματα ΑΠ.,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.terna-energy.com/i-etaireia/pleonektimata-ape/>.
- [17] IRENA International Renewable Energy Agency, «RENEWABLE ENERGY BENEFITS: UNDERSTANDING THE SOCIO-ECONOMICS,» 2017. [Ηλεκτρονικό].
- [18] J. Jaeger, «Would Resources Institute, Explaining the Exponential Growth of Renewable Energy,» 2021. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.wri.org/insights/growth-renewable-energy-sector-explained>.
- [19] United Nations Climate Change (UNFCCC), «About Carbon Pricing,» [Ηλεκτρονικό]. Available: [https://unfccc.int/about-us/regional-collaboration-centres/the-ciaca/about-carbon-pricing#What-is-Carbon-Pricing?-](https://unfccc.int/about-us/regional-collaboration-centres/the-ciaca/about-carbon-pricing#What-is-Carbon-Pricing?-.).
- [20] J. Carl και D. Fedor, «Tracking global carbon revenues: A survey of carbon taxes versus cap-and-trade in the real world,» 2016.
- [21] European Commission, «EU Emissions Trading System (EU ETS),» [Ηλεκτρονικό]. Available: https://climate.ec.europa.eu/eu-action/eu-emissions-trading-system-eu-ets_en.
- [22] IRENA, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi, «Renewable Power Generation Costs in 2020.,» 2021.
- [23] H. Blanco και A. Faaij, «A review at the role of storage in energy systems with a focus on Power to Gas and long-term storage,» 2018.
- [24] A. Perna και et al., «SNG Generation via Power to Gas Technology: Plant Design and Annual Performance Assessment,» 2020.
- [25] Y. Yasuda και et al., «C-E (curtailment – Energy share) map: An objective and quantitative measure to evaluate wind and solar curtailment,» 2022.
- [26] H. K. H. L. Changgwon Choe, «Feasibility study of power-to-gas as simultaneous renewable energy storage,» 2023.
- [27] IEA International Energy Agency, «Grid-Scale Storage,» 2022. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.iea.org/reports/grid-scale-storage>, License: CC BY 4.0.
- [28] «The \$2.5 trillion reason we can't rely on batteries to cleanup the grid,» MIT Technology review, 2018. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.technologyreview.com/2018/07/27/141282/the-25-trillion-reason-we-cant-rely-on-batteries-to-clean-up-the-grid/>.
- [29] Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems ISE, «General principle of the power to gas concept,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.ise.fraunhofer.de/en/business-areas/hydrogen-technologies-and-electrical-energy-storage/electrolysis-and-power-to-gas/power-to-gas.html>.
- [30] A. Matthew , A. Pellow και et al., «Hydrogen or batteries for grid storage? A net energy analysis,» 2015.
- [31] Deloitte, «Energy storage: Tracking the technologies that will transform the power sector,» 2014.

- [32] California ISO (CAISO), «Managing oversupply, Production and curtailment data,» 2022. [Ηλεκτρονικό]. Available: <http://www.caiso.com/informed/Pages/ManagingOversupply.aspx>.
- [33] M. Keddar και et al., «Power quality improvement for 20 MW PEM water electrolysis system,» 2022.
- [34] T. Schaaf και e. al., «Methanation of CO₂ - storage of renewable energy in a gas distribution system,» 2014.
- [35] K. Ghaib και et al., «Chemical Methanation of CO₂: A Review,» 2016.
- [36] R. Chauvy και et al., «Environmental impacts of the production of synthetic natural gas from industrial carbon dioxide,» 2022.
- [37] C. Wulf και et al., «Review of Power-to-Gas Projects in Europe,» 2018.
- [38] IEA Bioenergy Technology collaboration programme, «Task 44 Flexible Bioenergy and System Integration: Best Practices e-gas plant,» 2021.
- [39] S. Rönsch και et al., «Review on methanation – From fundamentals to current project,» 2016.
- [40] N. Gerloff, «Comparative Life-Cycle Assessment Analysis of Power-to-Methane Plants Including Different Water Electrolysis Technologies and CO₂ Sources While Applying Various Energy Scenarios,» 2021.
- [41] K. Bareiß και et al., «Life cycle assessment of hydrogen from proton exchange membrane water electrolysis in future energy systems,» 2019.
- [42] US Department of Energy, Office of Energy Efficiency & Renewable Energy, «Hydrogen Production: Electrolysis,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-production-electrolysis>.
- [43] R. Currie, «Design and Simulation of Novel Sabatier Reactors for the Thermocatalytic Conversion of CO₂ into Renewable Natural Gas,» 2019.
- [44] S. Schirrmeister και et al., «Innovative large-scale energy storage technologies and Power-to-Gas concepts after optimisation, Demonstration plant Falkenhagen commissioned/ commissioning report,» 2019.
- [45] J. Artz και et al., «Sustainable Conversion of Carbon Dioxide: An Integrated Review of Catalysis and Life Cycle Assessment,» 2018.
- [46] M. Thema και et al., «Power-to-Gas: Electrolysis and methanation status review,» 2019.
- [47] S. Rönsch και et al., «Review on methanation – From fundamentals to current project,» 2016.
- [48] R. Chauvy και et al., «Production of synthetic natural gas from industrial carbon dioxide,» 2020.
- [49] D. Sun και D. S. Simakov, «Thermal management of a Sabatier reactor for CO₂ conversion into CH₄: Simulation-based analysis,» 2016.
- [50] E. V. Puga και et al., «Holistic View on Synthetic Natural Gas Production: A Technical, Economic and Environmental Analysis,» 2022.
- [51] M. Z. Hauschild και et al., «Life Cycle Assessment Theory and Practice,» 2018.

- [52] INTERNATIONAL STANDARD ISO 14040, « Environmental management, Life cycle assessment, Principles and framework.,» Second edition 2006-07-01.
- [53] I. S. I. 14044, «Environmental management, Life cycle assessment, Requirements and guidelines.,» First edition 2006-07-01.
- [54] PRé Sustainability, «SimaPro database manual, Methods library,» June 2020.
- [55] H. Topsøe, «From solid fuels to substitute natural gas (SNG) using TREMP™, Topsøe Recycle Energy-efficient Methanation Process.».
- [56] US Department of Energy, National energy technology laboratory, «Capital Cost Scaling methodology,» 2013.
- [57] D. S. Remer και et al., «Process Plants, Costs of Scaled-up Units,» 1993.
- [58] X. Zhang και et al., «Life Cycle Assessment of Power-to-Gas, Approaches, system variations and their environmental implications, Electronic Supplementary Information,» 2018.
- [59] E. A. Μαχαίρας , «Ανάλυση Κύκλου Ζωής (LCA) Βιομηχανικής Μονάδας Παραγωγής, Αποθήκευσης και Αξιοποίησης Ανανεώσιμου H₂ (Power-to-H₂-to-Power).,» 2022.
- [60] L. Grond και et al., «Systems analyses Power to Gas: A technology review, Deliverable 1: Technology Review, Final Report,» 2013.
- [61] X. Zhang και et al., «Life Cycle Assessment of Power-to-Gas, Approaches, system variations and their environmental implications,» 2017.
- [62] F. Asdrubali και et al., «Comparative life cycle assessment of an innovative CSP air-cooled system and conventional condensers,» 2015.
- [63] J. J. Schulthess, «RECIPROCATING COMPRESSOR LUBRICATION – LUBRICANT DILUTION WITH NATURAL GAS SPECIES AND THE IMPACT ON LUBRICATION RATES AT VARIOUS OPERATING CONDITIONS,» Fort Collins, Colorado, 2021.
- [64] Siemens, «SILYZER 300,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://new.siemens.com/content/dam/internet/siemens-com/global/products-services/energy/renewable-energy/hydrogen-solutions/silyzer/>.
- [65] K. Volkart και et al., «Life cycle assessment of carbon capture and storage in power generation and industry in Europe,» 2013.
- [66] European Commission, «Horizon Europe, Clean Hydrogen Joint Undertaking, Strategic Research and Innovation Agenda 2021 – 2027».
- [67] International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi, IRENA, «Green Hydrogen Cost Reduction: Scaling up Electrolysers to Meet the 1.5°C Climate Goal,» 2020.

Παράρτημα Ι Πίνακες εισόδων Sima Pro

Πίνακας Ι-1 Πίνακας εισόδου SimaPro για κατασκευή συστήματος ηλεκτρόλυσης

Υλικό/Διεργασία	Αντιστοιχία με Ecoinvent
Χάλυβας χαμηλής κραμάτωσης	Steel, low-alloyed {GLO} market for Cut-off, U
Ανοξείδωτος χάλυβας	Steel, chromium steel 18/8 {GLO} market for Cut-off, U
Αλουμίνιο	Aluminium, cast alloy {GLO} market for Cut-off, U
Χαλκός	Copper {GLO} market for Cut-off, U
Πολυαιθυλένιο	Polyethylene, high density, granulate, recycled {Europe without Switzerland} market for polyethylene, high density, granulate, recycled Cut-off, U
Ηλεκτρονικά εξαρτήματα	Electronic component, passive, unspecified {GLO} market for Cut-off, U
Τσιμέντο	Concrete, normal {GLO} market group for concrete, normal Cut-off, U
Ηλεκτρική ενέργεια	Electricity, medium voltage {FR} market for Cut-off, U
Θερμική ενέργεια	Heat, district or industrial, natural gas {RER} market group for Cut-off, U
Χερσαίες μεταφορές	Transport, freight, lorry >32 metric ton, euro6 {RER} market for transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO6 Cut-off, U

Πίνακας Ι-2 Πίνακας εισόδου SimaPro για συντήρηση συστήματος ηλεκτρόλυσης

Υλικό/Διεργασία	Παράμετρος από Ecoinvent
Ξυλάνθρακας	Charcoal {GLO} market for Cut-off, U
Πλατίνα	Platinum {GLO} market for Cut-off, U
Ανοξείδωτος χάλυβας	Steel, chromium steel 18/8, hot rolled {RER} production Cut-off, U
Διοξείδιο του τιτανίου	Titanium dioxide {RER} market for Cut-off, U
Χερσαίες μεταφορές	Transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, euro6 {RER} market for transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO6 Cut-off, U

Πίνακας I-3 Πίνακας εισόδου SimaPro για κατασκευή συστήματος μεθανοποίησης

Υλικό/Διεργασία	Παράμετρος από Ecoinvent
Ανοξείδωτος χάλυβας	Steel, chromium steel 18/8, hot rolled {RER} production Cut-off, U
Διογκωμένο πολυστυρένιο	Polystyrene foam slab for perimeter insulation {GLO} market for Cut-off, U
Κράμα αλουμινίου	Nickel, 99.5% {GLO} market for Cut-off, U
Νικέλιο 99,5 %	Nickel, 99.5% {GLO} market for Cut-off, U
Θερμή έλαση ανοξείδωτου χάλυβα	Sheet rolling, chromium steel {GLO} market for Cut-off, U
Μέση διεργασία επεξεργασίας ανοξείδωτου χάλυβα	Metal working, average for chromium steel product manufacturing {GLO} market for Cut-off, U
Χερσαίες μεταφορές	Transport, freight, lorry >32 metric ton, euro6 {RER} market for transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO6 Cut-off, U

Πίνακας Ι-4 Πίνακας εισόδου SimaPro για κατασκευή συστήματος αναβάθμισης

Υλικό/Διεργασία	Παράμετρος από Ecoinvent
Ανοξείδωτος χάλυβας	Steel, chromium steel 18/8, hot rolled {RER} production Cut-off, U
Θερμή έλαση ανοξείδωτου χάλυβα	Sheet rolling, chromium steel {GLO} market for Cut-off, U
Ίνες κυτταρίνης	Cellulose fibre, inclusive blowing in {CH} production Cut-off, U
Σφυρήλατο κράμα αλουμινίου	Aluminium, wrought alloy {GLO} market for Cut-off, U
Χαλκός	Copper {GLO} market for Cut-off, U
Ανθρακοχάλυβας	Reinforcing steel {GLO} market for Cut-off, U
Μόνωση σωλήνωσης	Tube insulation, elastomere {GLO} market for Cut-off, U
Συρματοποίηση χαλκού	Wire drawing, copper {GLO} market for Cut-off, U
Χυτοσίδηρος	Cast iron {GLO} market for Cut-off, U
Αιθυλενογλυκόλη	Ethylene glycol {GLO} market for Cut-off, U
Θερμή έλαση ανθρακοχάλυβα	Sheet rolling, steel {GLO} market for Cut-off, U
Χερσαίες μεταφορές	Transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, euro6 {RER} market for transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO6 Cut-off, U

Πίνακας Ι-5 Πίνακας εισόδου Sima Pro για κατασκευή συμπιεστή CO2

Υλικό/Διεργασία	Παράμετρος από Ecoinvent
Σφυρήλατο κράμα αλουμινίου	Aluminium, wrought alloy {GLO} market for Cut-off, U
Χαλκός	Copper {GLO} market for Cut-off, U
Ανθρακοχάλυβας	Reinforcing steel {GLO} market for Cut-off, U
Μόνωση σωλήνωσης	Tube insulation, elastomere {GLO} market for Cut-off, U
Συρματοποίηση χαλκού	Wire drawing, copper {GLO} market for Cut-off, U
Χυτοσίδηρος	Cast iron {GLO} market for Cut-off, U
Αιθυλενογλυκόλη	Ethylene glycol {GLO} market for Cut-off, U
Θερμή έλαση ανοξείδωτου χάλυβα	Sheet rolling, chromium steel {GLO} market for Cut-off, U
Θερμή έλαση ανθρακοχάλυβα	Sheet rolling, steel {GLO} market for Cut-off, U
Ανοξείδωτος χάλυβας	Steel, chromium steel 18/8, hot rolled {RER} production Cut-off, U
Χερσαίες μεταφορές	Transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, euro6 {RER} market for transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO6 Cut-off, U

Πίνακας I-6 Πίνακας εισόδων διεργασιών φάσης λειτουργίας συστήματος

Διεργασία	Παράμετρος από Ecoinvent
Ηλεκτρισμός από δίκτυο	Electricity, medium voltage {AT} market for Cut-off, U
Ηλεκτρισμός από αιολικά	Electricity, high voltage {AT} electricity production, wind, 1-3MW turbine, onshore Cut-off, U
Ηλεκτρισμός από ηλιακά	Electricity, low voltage {AT} electricity production, photovoltaic, 570kWp open ground installation, multi-Si Cut-off, U
Κατανάλωση θερμότητας συστήματος δέσμησης διοξειδίου του άνθρακα	Heat, from steam, in chemical industry {RER} steam production, as energy carrier, in chemical industry Cut-off, U
Απαγόμενη θερμότητα από αντιδραστήρες, επέκταση συστήματος	Heat, district or industrial, other than natural gas {Europe without Switzerland} market for heat, district or industrial, other than natural gas Cut-off, U
Νερό ηλεκτρόλυσης	Water, deionised, from tap water, at user {Europe without Switzerland} market for water, deionised, from tap water, at user Cut-off, U
Απόρριψη νικελίου, αποτέρφωση	Hazardous waste, for incineration {CH} treatment of hazardous waste, hazardous waste incineration Cut-off, U
Επεξεργασία παραγόμενου νερού	Wastewater, average {Europe without Switzerland} market for wastewater, average Cut-off, U
Χημικό MEA διεργασίας δέσμησης CO ₂	Monoethanolamine {GLO} market for Cut-off, U
Παραγωγή οξυγόνου, επέκταση συστήματος	Oxygen, liquid {RER} market for Cut-off, U

Παράρτημα II Πίνακες χαρακτηρισμού

Πίνακας II-1 Αποτελέσματα χαρακτηρισμού βασικού συστήματος, ανά λειτουργική μονάδα

Κατηγορία επιπτώσεων	Μονάδα	Σύνολο	Απαγόμενη Θερμότητα από αντιδραστήρες	Δέσμευση CO2	Παραγόμενο νερό από αντιδραστήρες	Σύστημα Μεθανοποίησης	Σύστημα ηλεκτροδότησης	Σύστημα αναβάθμισης	Συμπίεση CO2
Κλιματική αλλαγή	kg CO2 eq	-1.74E+03	-6.20E+02	-1.70E+03	1.06E+00	3.73E+00	4.20E+02	1.14E+01	1.40E+02
Εξάντληση όζοντος	kg CFC11 eq	3.60E-04	-1.75E-04	2.35E-04	3.01E-06	1.42E-06	1.85E-04	8.12E-06	1.02E-04
Ιονίζουσα ακτινοβολία	kBq Co-60 eq	7.93E+01	-7.61E+00	3.01E+01	1.26E-01	2.02E-01	2.13E+01	2.56E+00	3.26E+01
Δημιουργία όζοντος, Ανθρώπινη υγεία	kg NOx eq	1.15E+00	-1.54E+00	1.18E+00	3.86E-03	1.01E-02	1.27E+00	1.74E-02	2.07E-01
Σχηματισμός μικροσωματιδίων	kg PM2.5 eq	7.51E-01	-1.23E+00	7.69E-01	2.91E-03	1.44E-02	1.04E+00	1.28E-02	1.45E-01
Δημιουργία όζοντος, Χερσαία οικ.	kg NOx eq	1.22E+00	-1.56E+00	1.21E+00	3.93E-03	1.04E-02	1.34E+00	1.76E-02	2.10E-01
Όξυνση χερσαίων οικοσυστημάτων	kg SO2 eq	1.17E+00	-3.79E+00	2.33E+00	8.16E-03	2.13E-02	1.94E+00	4.93E-02	6.07E-01
Ευτροφισμός γλυκού νερού	kg P eq	4.52E-01	-1.99E-01	1.27E-01	2.44E-03	1.59E-03	3.35E-01	1.37E-02	1.72E-01
Θαλάσσιος ευτροφισμός	kg N eq	4.88E-02	-1.25E-02	1.05E-02	1.23E-02	1.19E-04	2.63E-02	8.86E-04	1.11E-02
Χερσαία οικοτοξικότητα	kg 1,4-DCB	5.20E+03	-9.04E+02	1.36E+03	4.34E+00	6.24E+01	4.56E+03	1.67E+01	1.08E+02
Οικοτοξικότητα γλυκού νερού	kg 1,4-DCB	1.81E+02	-6.66E+00	5.11E+00	7.68E-02	2.37E-01	1.76E+02	5.51E-01	6.40E+00
Θαλάσσια οικοτοξικότητα	kg 1,4-DCB	2.29E+02	-9.79E+00	8.58E+00	1.05E-01	3.40E-01	2.20E+02	7.42E-01	8.56E+00
Καρκινογόνος τοξικότητα στον άνθρωπο	kg 1,4-DCB	1.62E+02	-1.54E+01	1.06E+01	2.25E-01	1.25E+00	1.55E+02	9.17E-01	9.44E+00
Μη καρκινογόνος τοξικότητα στον άνθρωπο	kg 1,4-DCB	1.57E+03	-2.28E+02	1.43E+02	6.08E+00	4.23E+00	1.49E+03	1.24E+01	1.43E+02
Αλλαγή χρήσης γης	m2a crop eq	-1.95E+01	-7.05E+01	1.06E+01	5.40E-02	1.13E-01	3.09E+01	6.85E-01	8.64E+00
Έλλειψη πόρων μεταλλευμάτων	kg Cu eq	1.45E+01	-1.61E-01	2.85E-01	2.09E-02	3.34E-01	1.38E+01	4.63E-02	1.56E-01
Έλλειψη ορυκτών πόρων	kg oil eq	3.23E+02	-1.39E+02	3.07E+02	2.23E-01	8.99E-01	1.18E+02	2.68E+00	3.30E+01
Κατανάλωση νερού	m3	8.16E+00	-4.09E+00	1.73E+00	-1.89E+00	2.33E-02	9.06E+00	2.43E-01	3.08E+00

Πίνακας II-2 Αποτελέσματα χαρακτηρισμού συστήματος 20 MW με ολική κάλυψη ηλεκτρικών από αιολική ενέργεια

Κατηγορία επιπτώσεων	Μονάδα	Σύνολο	Απαγόμενη Θερμότητα από αντιδραστήρες	Δέσμευση CO2	Παραγόμενο νερό από αντιδραστήρες	Σύστημα Μεθανοποίησης	Σύστημα ηλεκτρόλυσης	Σύστημα αναβάθμισης	Συμπίεση CO2
Κλιματική αλλαγή	kg CO2 eq	-1.90E+03	-6.20E+02	-1.72E+03	1.06E+00	3.73E+00	4.20E+02	1.06E+00	7.51E+00
Εξάντληση όζοντος	kg CFC11 eq	2.39E-04	-1.75E-04	2.21E-04	3.01E-06	1.42E-06	1.85E-04	4.36E-07	3.22E-06
Ιονίζουσα ακτινοβολία	kBq Co-60 eq	3.98E+01	-7.61E+00	2.54E+01	1.26E-01	2.02E-01	2.14E+01	4.90E-02	3.57E-01
Δημιουργία όζοντος, Ανθρώπινη υγεία	kg NOx eq	9.23E-01	-1.54E+00	1.15E+00	3.86E-03	1.01E-02	1.27E+00	3.02E-03	2.26E-02
Σχηματισμός μικροσωματιδίων	kg PM2.5 eq	5.95E-01	-1.23E+00	7.50E-01	2.91E-03	1.44E-02	1.04E+00	2.89E-03	1.81E-02
Δημιουργία όζοντος, Χερσαία οικ.	kg NOx eq	9.97E-01	-1.56E+00	1.18E+00	3.93E-03	1.04E-02	1.34E+00	3.15E-03	2.37E-02
Όξυνση χερσαίων οικοσυστημάτων	kg SO2 eq	4.63E-01	-3.79E+00	2.25E+00	8.17E-03	2.13E-02	1.94E+00	4.72E-03	3.31E-02
Ευτροφισμός γλυκού νερού	kg P eq	2.49E-01	-1.99E-01	1.03E-01	2.44E-03	1.59E-03	3.35E-01	7.53E-04	5.89E-03
Θαλάσσιος ευτροφισμός	kg N eq	3.58E-02	-1.25E-02	8.99E-03	1.23E-02	1.19E-04	2.63E-02	5.90E-05	4.72E-04
Χερσαία οικοτοξικότητα	kg 1,4-DCB	5.17E+03	-9.04E+02	1.35E+03	4.34E+00	6.24E+01	4.56E+03	1.48E+01	8.43E+01
Οικοτοξικότητα γλυκού νερού	kg 1,4-DCB	1.77E+02	-6.66E+00	4.62E+00	7.68E-02	2.37E-01	1.76E+02	2.92E-01	3.07E+00
Θαλάσσια οικοτοξικότητα	kg 1,4-DCB	2.23E+02	-9.79E+00	7.89E+00	1.05E-01	3.40E-01	2.20E+02	3.75E-01	3.85E+00
Καρκινογόνος τοξικότητα στον άνθρωπο	kg 1,4-DCB	1.53E+02	-1.54E+01	9.64E+00	2.25E-01	1.25E+00	1.55E+02	3.99E-01	2.78E+00
Μη καρκινογόνος τοξικότητα στον άνθρωπο	kg 1,4-DCB	1.43E+03	-2.28E+02	1.26E+02	6.08E+00	4.23E+00	1.49E+03	3.41E+00	2.65E+01
Αλλαγή χρήσης γης	m2a crop eq	-2.94E+01	-7.05E+01	9.38E+00	5.40E-02	1.13E-01	3.09E+01	5.41E-02	5.37E-01
Έλλειψη πόρων μεταλλευμάτων	kg Cu eq	1.46E+01	-1.61E-01	2.98E-01	2.09E-02	3.34E-01	1.38E+01	5.32E-02	2.45E-01
Έλλειψη ορυκτών πόρων	kg oil eq	2.85E+02	-1.39E+02	3.03E+02	2.23E-01	9.00E-01	1.18E+02	2.73E-01	2.11E+00
Κατανάλωση νερού	m3	4.49E+00	-4.09E+00	1.29E+00	-1.89E+00	2.33E-02	9.06E+00	9.70E-03	8.00E-02

Πίνακας II-3 Αποτελέσματα χαρακτηρισμού συστήματος 20 MW με χρήση ηλιακής ενέργειας, ανά λειτουργική μονάδα

Κατηγορία επιπτώσεων	Μονάδα	Σύνολο	Απαγόμενη Θερμότητα από αντιδραστήρες	Δέσμευση CO2	Παραγόμενο νερό από αντιδραστήρες	Σύστημα Μεθανοποίησης	Σύστημα ηλεκτρόλυσης	Σύστημα αναβάθμισης	Συμπίεση CO2
Κλιματική αλλαγή	kg CO2 eq	2.48E+02	-6.20E+02	-1.70E+03	1.06E+00	3.73E+00	2.41E+03	1.14E+01	1.40E+02
Εξάντληση όζοντος	kg CFC11 eq	1.21E-03	-1.75E-04	2.35E-04	3.01E-06	1.42E-06	1.03E-03	8.12E-06	1.02E-04
Ιονίζουσα ακτινοβολία	kBq Co-60 eq	2.34E+02	-7.61E+00	3.01E+01	1.26E-01	2.02E-01	1.76E+02	2.56E+00	3.26E+01
Δημιουργία όζοντος, Ανθρώπινη υγεία	kg NOx eq	6.00E+00	-1.54E+00	1.18E+00	3.86E-03	1.01E-02	6.12E+00	1.74E-02	2.07E-01
Σχηματισμός μικροσωματιδίων	kg PM2.5 eq	5.14E+00	-1.23E+00	7.69E-01	2.91E-03	1.44E-02	5.43E+00	1.28E-02	1.45E-01
Δημιουργία όζοντος, Χερσαία οικ.	kg NOx eq	6.30E+00	-1.56E+00	1.21E+00	3.93E-03	1.04E-02	6.41E+00	1.76E-02	2.10E-01
Όξυνση χερσαίων οικοσυστημάτων	kg SO2 eq	1.01E+01	-3.79E+00	2.33E+00	8.16E-03	2.13E-02	1.09E+01	4.93E-02	6.07E-01
Ευτροφισμός γλυκού νερού	kg P eq	1.72E+00	-1.99E-01	1.27E-01	2.44E-03	1.59E-03	1.60E+00	1.37E-02	1.72E-01
Θαλάσσιος ευτροφισμός	kg N eq	1.90E-01	-1.25E-02	1.05E-02	1.23E-02	1.19E-04	1.68E-01	8.86E-04	1.11E-02
Χερσαία οικοτοξικότητα	kg 1,4-DCB	5.53E+04	-9.04E+02	1.36E+03	4.34E+00	6.24E+01	5.47E+04	1.67E+01	1.08E+02
Οικοτοξικότητα γλυκού νερού	kg 1,4-DCB	3.99E+02	-6.66E+00	5.11E+00	7.68E-02	2.37E-01	3.93E+02	5.51E-01	6.40E+00
Θαλάσσια οικοτοξικότητα	kg 1,4-DCB	5.36E+02	-9.79E+00	8.58E+00	1.05E-01	3.40E-01	5.27E+02	7.42E-01	8.56E+00
Καρκινογόνος τοξικότητα στον άνθρωπο	kg 1,4-DCB	2.73E+02	-1.54E+01	1.06E+01	2.25E-01	1.25E+00	2.66E+02	9.17E-01	9.44E+00
Μη καρκινογόνος τοξικότητα στον άνθρωπο	kg 1,4-DCB	5.59E+03	-2.28E+02	1.43E+02	6.08E+00	4.23E+00	5.51E+03	1.24E+01	1.43E+02
Αλλαγή χρήσης γης	m2a crop eq	8.24E+02	-7.05E+01	1.06E+01	5.40E-02	1.13E-01	8.74E+02	6.85E-01	8.64E+00
Έλλειψη πόρων μεταλλευμάτων	kg Cu eq	2.82E+01	-1.61E-01	2.85E-01	2.09E-02	3.34E-01	2.76E+01	4.63E-02	1.56E-01
Έλλειψη ορυκτών πόρων	kg oil eq	8.09E+02	-1.39E+02	3.07E+02	2.23E-01	8.99E-01	6.05E+02	2.68E+00	3.30E+01
Κατανάλωση νερού	m3	7.93E+01	-4.09E+00	1.73E+00	-1.89E+00	2.33E-02	8.02E+01	2.43E-01	3.08E+00

Πίνακας II-4 Αποτελέσματα χαρακτηρισμού συστήματος 20 MW με χρήση ηλεκτρισμού από το δίκτυο, ανά λειτουργική μονάδα

Κατηγορία επιπτώσεων	Μονάδα	Σύνολο	Απαγόμενη Θερμότητα από αντιδραστήρες	Δέσμευση CO2	Παραγόμενο νερό από αντιδραστήρες	Σύστημα Μεθανοποίησης	Σύστημα ηλεκτρόλυσης	Σύστημα αναβάθμισης	Συμπύεση CO2
Κλιματική αλλαγή	kg CO2 eq	5.94E+03	-6.20E+02	-1.70E+03	1.06E+00	3.73E+00	8.10E+03	1.14E+01	1.40E+02
Εξάντληση όζοντος	kg CFC11 eq	6.06E-03	-1.75E-04	2.35E-04	3.01E-06	1.42E-06	5.89E-03	8.12E-06	1.02E-04
Ιονίζουσα ακτινοβολία	kBq Co-60 eq	1.94E+03	-7.61E+00	3.01E+01	1.26E-01	2.02E-01	1.88E+03	2.56E+00	3.26E+01
Δημιουργία όζοντος, Ανθρώπινη υγεία	kg NOx eq	1.18E+01	-1.54E+00	1.18E+00	3.86E-03	1.01E-02	1.19E+01	1.74E-02	2.07E-01
Σχηματισμός μικροσωματιδίων	kg PM2.5 eq	8.10E+00	-1.23E+00	7.69E-01	2.91E-03	1.44E-02	8.39E+00	1.28E-02	1.45E-01
Δημιουργία όζοντος, Χερσαία οικ.	kg NOx eq	1.20E+01	-1.56E+00	1.21E+00	3.93E-03	1.04E-02	1.21E+01	1.76E-02	2.10E-01
Όξυνση χερσαίων οικοσυστημάτων	kg SO2 eq	3.43E+01	-3.79E+00	2.33E+00	8.16E-03	2.13E-02	3.51E+01	4.93E-02	6.07E-01
Ευτροφισμός γλυκού νερού	kg P eq	1.00E+01	-1.99E-01	1.27E-01	2.44E-03	1.59E-03	9.92E+00	1.37E-02	1.72E-01
Θαλάσσιος ευτροφισμός	kg N eq	6.63E-01	-1.25E-02	1.05E-02	1.23E-02	1.19E-04	6.41E-01	8.86E-04	1.11E-02
Χερσαία οικοτοξικότητα	kg 1,4-DCB	6.60E+03	-9.04E+02	1.36E+03	4.34E+00	6.24E+01	5.96E+03	1.67E+01	1.08E+02
Οικοτοξικότητα γλυκού νερού	kg 1,4-DCB	3.74E+02	-6.66E+00	5.11E+00	7.68E-02	2.37E-01	3.68E+02	5.51E-01	6.40E+00
Θαλάσσια οικοτοξικότητα	kg 1,4-DCB	5.01E+02	-9.79E+00	8.58E+00	1.05E-01	3.40E-01	4.92E+02	7.42E-01	8.56E+00
Καρκινογόνος τοξικότητα στον άνθρωπο	kg 1,4-DCB	5.46E+02	-1.54E+01	1.06E+01	2.25E-01	1.25E+00	5.39E+02	9.17E-01	9.44E+00
Μη καρκινογόνος τοξικότητα στον άνθρωπο	kg 1,4-DCB	8.28E+03	-2.28E+02	1.43E+02	6.08E+00	4.23E+00	8.20E+03	1.24E+01	1.43E+02
Αλλαγή χρήσης γης	m2a crop eq	4.49E+02	-7.05E+01	1.06E+01	5.40E-02	1.13E-01	4.99E+02	6.85E-01	8.64E+00
Έλλειψη πόρων μεταλλευμάτων	kg Cu eq	9.41E+00	-1.61E-01	2.85E-01	2.09E-02	3.34E-01	8.72E+00	4.63E-02	1.56E-01
Έλλειψη ορυκτών πόρων	kg oil eq	2.11E+03	-1.39E+02	3.07E+02	2.23E-01	8.99E-01	1.90E+03	2.68E+00	3.30E+01
Κατανάλωση νερού	m3	1.81E+02	-4.09E+00	1.73E+00	-1.89E+00	2.33E-02	1.82E+02	2.43E-01	3.08E+00

Πίνακας II-5 Σύγκριση αποτελεσμάτων χαρακτηρισμού συστήματος προϊόντος υπό διαφορετικές πηγές ενέργειας με σενάριο φυσικού αερίου, ανά λειτουργική μονάδα.

Κατηγορία επιπτώσεων	Μονάδα	Σύστημα αναφοράς	Ηλιακή ενέργεια	Δίκτυο	Φυσικό αέριο (1 τόνος)
Κλιματική αλλαγή	kg CO2 eq	-1.74E+03	2.48E+02	5.94E+03	9.91E+02
Εξάντληση όζοντος	kg CFC11 eq	3.60E-04	1.21E-03	6.06E-03	1.17E-03
Ιονίζουσα ακτινοβολία	kBq Co-60 eq	7.93E+01	2.34E+02	1.94E+03	4.22E+00
Δημιουργία όζοντος, Ανθρώπινη υγεία	kg NOx eq	1.15E+00	6.00E+00	1.18E+01	1.89E+00
Σχηματισμός μικροσωματιδίων	kg PM2.5 eq	7.51E-01	5.14E+00	8.10E+00	8.74E-01
Δημιουργία όζοντος, Χερσαία οικ.	kg NOx eq	1.22E+00	6.30E+00	1.20E+01	2.04E+00
Οξυνση χερσαίων οικοσυστημάτων	kg SO2 eq	1.17E+00	1.01E+01	3.43E+01	2.73E+00
Ευτροφισμός γλυκού νερού	kg P eq	4.52E-01	1.72E+00	1.00E+01	3.00E-02
Θαλάσσιος ευτροφισμός	kg N eq	4.88E-02	1.90E-01	6.63E-01	2.06E-03
Χερσαία οικοτοξικότητα	kg 1,4-DCB	5.20E+03	5.53E+04	6.60E+03	1.73E+02
Οικοτοξικότητα γλυκού νερού	kg 1,4-DCB	1.81E+02	3.99E+02	3.74E+02	2.52E+00
Θαλάσσια οικοτοξικότητα	kg 1,4-DCB	2.29E+02	5.36E+02	5.01E+02	5.29E+00
Καρκινογόνος τοξικότητα στον άνθρωπο	kg 1,4-DCB	1.62E+02	2.73E+02	5.46E+02	1.15E+01
Μη καρκινογόνος τοξικότητα στον άνθρωπο	kg 1,4-DCB	1.57E+03	5.59E+03	8.28E+03	6.97E+01
Αλλαγή χρήσης γης	m2a crop eq	-1.95E+01	8.24E+02	4.49E+02	1.33E+00
Έλλειψη πόρων μεταλλευμάτων	kg Cu eq	1.45E+01	2.82E+01	9.41E+00	1.02E+00
Έλλειψη ορυκτών πόρων	kg oil eq	3.23E+02	8.09E+02	2.11E+03	1.35E+03
Κατανάλωση νερού	m3	8.16E+00	7.93E+01	1.81E+02	7.57E-01

Πίνακας II-6 Σύγκριση αποτελεσμάτων χαρακτηρισμού συστημάτων διαφορετικών μεγεθών, ανά λειτουργική μονάδα. Χρήση αιολικής ενέργειας.

Κατηγορία επιπτώσεων	Μονάδα	Σύστημα αναφοράς	Σύστημα 500 MW	Σύστημα 1300 MW
Κλιματική αλλαγή	kg CO ₂ eq	-1.74E+03	-1.78E+03	-1.81E+03
Εξάντληση όζοντος	kg CFC11 eq	3.60E-04	3.45E-04	3.30E-04
Ιονίζουσα ακτινοβολία	kBq Co-60 eq	7.93E+01	7.76E+01	7.60E+01
Δημιουργία όζοντος, Ανθρώπινη υγεία	kg NO _x eq	1.15E+00	1.05E+00	9.42E-01
Σχηματισμός μικροσωματιδίων	kg PM _{2.5} eq	7.51E-01	6.48E-01	5.62E-01
Δημιουργία όζοντος, Χερσαία οικ.	kg NO _x eq	1.22E+00	1.12E+00	1.01E+00
Όξυνση χερσαίων οικοσυστημάτων	kg SO ₂ eq	1.17E+00	9.56E-01	7.95E-01
Ευτροφισμός γλυκού νερού	kg P eq	4.52E-01	4.23E-01	3.95E-01
Θαλάσσιος ευτροφισμός	kg N eq	4.88E-02	4.68E-02	4.46E-02
Χερσαία οικοτοξικότητα	kg 1,4-DCB	5.20E+03	4.82E+03	4.44E+03
Οικοτοξικότητα γλυκού νερού	kg 1,4-DCB	1.81E+02	1.68E+02	1.54E+02
Θαλάσσια οικοτοξικότητα	kg 1,4-DCB	2.29E+02	2.12E+02	1.94E+02
Καρκινογόνος τοξικότητα στον άνθρωπο	kg 1,4-DCB	1.62E+02	1.49E+02	1.37E+02
Μη καρκινογόνος τοξικότητα στον άνθρωπο	kg 1,4-DCB	1.57E+03	1.44E+03	1.31E+03
Αλλαγή χρήσης γης	m ² a crop eq	-1.95E+01	-2.18E+01	-2.43E+01
Έλλειψη πόρων μεταλλευμάτων	kg Cu eq	1.45E+01	1.29E+01	1.18E+01
Έλλειψη ορυκτών πόρων	kg oil eq	3.23E+02	3.14E+02	3.04E+02
Κατανάλωση νερού	m ³	8.16E+00	7.82E+00	7.45E+00

Πίνακας II-7 Σύγκριση αποτελεσμάτων χαρακτηρισμού συστημάτων διαφορετικών μεγεθών, ανά λειτουργική μονάδα. Χρήση ηλιακής ενέργειας.

Κατηγορία επιπτώσεων	Μονάδα	Σύστημα αναφοράς	Σύστημα 500 MW	Σύστημα 1300 MW
Κλιματική αλλαγή	kg CO2 eq	2.48E+02	8.06E+01	-1.16E+02
Εξάντληση όζοντος	kg CFC11 eq	1.21E-03	1.13E-03	1.05E-03
Ιονίζουσα ακτινοβολία	kBq Co-60 eq	2.34E+02	2.21E+02	2.07E+02
Δημιουργία όζοντος, Ανθρώπινη υγεία	kg NOx eq	6.00E+00	5.57E+00	5.07E+00
Σχηματισμός μικροσωματιδίων	kg PM2.5 eq	5.14E+00	4.74E+00	4.30E+00
Δημιουργία όζοντος, Χερσαία οικ.	kg NOx eq	6.30E+00	5.85E+00	5.33E+00
Όξυνση χερσαίων οικοσυστημάτων	kg SO2 eq	1.01E+01	9.31E+00	8.42E+00
Ευτροφισμός γλυκού νερού	kg P eq	1.72E+00	1.60E+00	1.47E+00
Θαλάσσιος ευτροφισμός	kg N eq	1.90E-01	1.78E-01	1.65E-01
Χερσαία οικοτοξικότητα	kg 1,4-DCB	5.53E+04	5.16E+04	4.71E+04
Οικοτοξικότητα γλυκού νερού	kg 1,4-DCB	3.99E+02	3.71E+02	3.39E+02
Θαλάσσια οικοτοξικότητα	kg 1,4-DCB	5.36E+02	4.99E+02	4.56E+02
Καρκινογόνος τοξικότητα στον άνθρωπο	kg 1,4-DCB	2.73E+02	2.53E+02	2.31E+02
Μη καρκινογόνος τοξικότητα στον άνθρωπο	kg 1,4-DCB	5.59E+03	5.18E+03	4.73E+03
Αλλαγή χρήσης γης	m2a crop eq	8.24E+02	7.65E+02	6.93E+02
Έλλειψη πόρων μεταλλευμάτων	kg Cu eq	2.82E+01	2.57E+01	2.34E+01
Έλλειψη ορυκτών πόρων	kg oil eq	8.09E+02	7.67E+02	7.18E+02
Κατανάλωση νερού	m3	7.93E+01	7.41E+01	6.80E+01