



Ανάλυση Κύκλου Ζωής Βιομηχανικής Μονάδας Παραγωγής Μεθανόλης

Τομέας: Θερμότητας, Εργαστήριο Θερμικών Διεργασιών

Επιβλέπων: Σωτήριος Καρέλλας, Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα 2023

GEORGIOPOULOS ANDREAS

SCHOOL OF MECHANICAL ENGINEERING



Life Cycle Analysis of an Industrial Methanol Production Unit (Power-to-Methanol)

Department: Thermal Engineering, Laboratory of Thermal Processes

Supervisor: Sotirios Karellas, Professor NTUA

Athens 2023

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου σε όλους όσους συνέβαλαν στην εκπόνηση της διπλωματικής μου εργασίας. Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Δρ. Καρέλλα Σωτήριο για την εμπιστοσύνη του να μου αναθέσει την εργασία αυτή. Έπειτα θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά την Κα. Κοντού Βασιλική, επιβλέπουσα της παρούσας διπλωματικής εργασίας, για την πολύτιμη υποστήριξη και καθοδήγηση που μου παρείχε σε όλα τα στάδια της εκπόνησης της εργασίας. Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Κ. Σκορδούλια Νίκο για την σημαντική του συνεισφορά, με τις επιστημονικές του γνώσεις, καθώς και τον συμφοιτητή μου Σούκουλη Δημήτρη, με τον οποίο γράφαμε την διπλωματική μας εργασία την ίδια περίοδο και μοιραζόμασταν τα ίδια άγχη, βοηθώντας ο ένας τον άλλον. Έπειτα θα ήθελα να ευχαριστήσω μέσα από την καρδιά μου την οικογένειά μου για την αγάπη και την υποστήριξη και τους φίλους μου για τα υπέροχα χρόνια που έχουμε ζήσει μαζί και τέλος να ευχηθώ καλό πτυχίο στους υπόλοιπους μηχανολόγους της οικογένειας.

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.

Ονοματεπώνυμο

ΑΝΔΡΕΑΣ ΓΕΩΡΓΙΟΠΟΥΛΟΣ

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

| | |
|--|----|
| ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ | 4 |
| ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ | 6 |
| ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΠΕΡΙΛΗΨΗ..... | 8 |
| ABSTRACT..... | 9 |
| ΑΚΡΩΝΥΜΙΑ..... | 10 |
| 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ | 11 |
| 1.1 Κλιματική Αλλαγή | 11 |
| 1.2 Ανασκόπηση Διεθνούς Νομοθετικού και Κανονιστικού Πλαισίου Σχετικά με την Παραγωγή Ενέργειας από ΑΠΕ..... | 13 |
| 1.3 Αποθήκευση Ενέργειας | 14 |
| 1.4 Ανάγκη για Εναλλακτικά Καύσιμα | 15 |
| 1.5 Power-to-Fuel..... | 16 |
| 1.6 Υδρογόνο | 16 |
| 1.6.1 Γενικά..... | 16 |
| 1.6.2 Παραγωγή Υδρογόνου | 17 |
| 1.6.3 Αποθήκευση Υδρογόνου | 23 |
| 1.7 Διοξείδιο του Άνθρακα | 24 |
| 1.7.1 Δέσμευση Διοξειδίου του Άνθρακα | 24 |
| 1.8 Μεθανόλη..... | 26 |
| 1.8.1 Γενικά..... | 26 |
| 1.8.2 Αγορά..... | 27 |
| 1.8.3 Παραγωγή Μεθανόλης | 27 |
| 1.8.4 Χρήσεις Μεθανόλης | 30 |
| 2. Ανάλυση Κύκλου Ζωής..... | 31 |
| 2.1 Γενικά | 31 |
| 2.2 Προσδιορισμός Στόχου και Εύρους | 33 |
| 2.3 Κατάλογος Απογραφής Κύκλου Ζωής (LCI)..... | 34 |
| 2.4 Εκτίμηση Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων (LCIA)..... | 35 |
| 2.5 Ερμηνεία αποτελεσμάτων | 38 |
| 2.6 Βάσεις Δεδομένων και Λογισμικά | 39 |
| 2.7 Μέθοδοι Εκτίμησης Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων | 40 |
| 3. Σύστημα | 43 |
| 3.1 Εισαγωγή | 43 |
| 3.2 Λειτουργία..... | 45 |
| 3.2.1 Σενάριο 2050..... | 45 |
| 3.2.2 Σενάριο 2030..... | 46 |
| 3.2.3 Σενάριο 2023..... | 46 |
| 4. Ανάλυση Κύκλου Ζωής για το Εξεταζόμενο Σύστημα | 48 |
| 4.1 Πεδίο Εφαρμογής της Μελέτης | 48 |
| 4.2 Ποιότητα Δεδομένων | 48 |
| 4.3 Ανάλυση και Καταγραφή Δεδομένων | 51 |
| 4.3.1 Φάση Κατασκευής | 51 |

| | | |
|-------|---|-----|
| 4.3.2 | Μεταφορές | 58 |
| 4.3.3 | Φάση Λειτουργίας | 58 |
| 4.3.4 | Τέλος Κύκλου Ζωής | 63 |
| 4.3.5 | Σενάρια υπό Μελέτη | 63 |
| 5. | Αποτελέσματα | 64 |
| 5.1 | Γενικές Συγκρίσεις..... | 64 |
| 5.1.1 | Πηγές ενέργειας..... | 64 |
| 5.1.2 | Εκπομπές Διοξειδίου του Άνθρακα..... | 66 |
| 5.1.3 | Οξυγόνο Ηλεκτρόλυσης | 68 |
| 5.2 | Αποτελέσματα Σεναρίου Αναφοράς | 70 |
| 5.2.1 | Αντίκτυπος Κατασκευής και Συντήρησης της Εγκατάστασης | 70 |
| 5.2.2 | Συνολική Λειτουργία | 80 |
| 5.3 | Αποτελέσματα Σεναρίου Έτους 2030 | 90 |
| 5.3.1 | Αντίκτυπος Κατασκευής και Συντήρησης της εγκατάστασης | 90 |
| 5.3.2 | Συνολική Λειτουργία | 92 |
| 5.3.3 | Δέσμευση Διοξειδίου του Άνθρακα Βιογενούς Προέλευσης..... | 96 |
| 5.3.4 | Αξιοποίηση Οξυγόνου | 98 |
| 5.4 | Αποτελέσματα Σεναρίου Έτους 2023 | 100 |
| 5.4.1 | Αντίκτυπος Κατασκευής και Συντήρησης της εγκατάστασης | 100 |
| 5.4.2 | Συνολική Λειτουργία | 104 |
| 5.5 | Σύγκριση Μονάδων | 107 |
| 5.5.1 | Κατασκευή και Συντήρηση..... | 107 |
| 5.5.2 | Ηλεκτρόλυση..... | 110 |
| 5.5.3 | Συνολικός Αντίκτυπος Μονάδων..... | 113 |
| 5.6 | Αντίκτυπος στις Τελικές Κατηγορίες Επιπτώσεων | 116 |
| 6. | Ανάλυση Αβεβαιότητας και Ευαισθησίας | 122 |
| 6.1 | Ανάλυση Αβεβαιότητας..... | 122 |
| 6.2 | Ανάλυση Ευαισθησίας..... | 126 |
| 7. | Συμπεράσματα | 130 |
| 7.1 | Συζήτηση Αποτελεσμάτων | 130 |
| 7.2 | Προτάσεις για Μελλοντική Εργασία | 131 |
| 8. | Βιβλιογραφία | 133 |
| 9. | Κατάλογος πινάκων..... | 141 |
| 10. | Κατάλογος εικόνων | 144 |
| 11. | Κατάλογος διαγραμμάτων..... | 145 |

ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία πραγματοποιήθηκε η Ανάλυση Κύκλου Ζωής ενός συστήματος παραγωγής πράσινης μεθανόλης. Το σύστημα αυτό εξετάζεται στο πλαίσιο του προγράμματος GreenDEALCO₂ το οποίο έχει ως στόχο την εύρεση βιώσιμων εναλλακτικών τρόπων χρησιμοποίησης των σταθμών που χρησιμοποιούν άνθρακα και είναι εκτός λειτουργίας ή κοντά στο τέλος ζωής τους. Ένας τέτοιος τρόπος είναι η παραγωγή πράσινων καυσίμων όπως η μεθανόλη. Στο σενάριο βάσης εξετάζεται η παραγωγή πράσινης μεθανόλης μέσω καταλυτικής υδρογόνωσης διοξειδίου του άνθρακα, το οποίο δεσμεύεται από ηλεκτροπαραγωγό σταθμό βιομάζας ισχύος 375 MW. Ο σταθμός βρίσκεται στην Ελλάδα και δύναται να καλύψει μέρος της απαιτούμενης ενέργειας για την διαδικασία παραγωγής 206.5 t/h πράσινης μεθανόλης για 20 έτη, με την υπόλοιπη ενέργεια να προέρχεται από ΑΠΕ. Ο σταθμός βιομάζας θεωρείται ότι είναι πρώην λιγνιτικός σταθμός. Το απαιτούμενο υδρογόνο παράγεται μέσω ηλεκτρόλυσης. Η ανάλυση εκτείνεται από την καταγραφή και επεξεργασία των πρώτων υλών, έως και τον καθαρισμό της μεθανόλης, ενώ εξετάζεται και η διαχείριση των αποβλήτων κατά την λειτουργία αλλά και μετά το τέλος ζωής της εγκατάστασης.

Το σενάριο βάσης λόγω της κλίμακας του, κρίθηκε ανέφικτο για το έτος 2023, λόγω της τεράστιας δυναμικότητας παραγωγής και του μεγέθους των δύο ηλεκτρολυτών (1 GW έκαστος), ενώ σύμφωνα με τις προβλέψεις θα είναι δυνατόν να υλοποιηθεί το έτος 2050. Εξετάζονται δύο ακόμα μεγέθη παραγωγής για την εγκατάσταση αξιοποιώντας τον ίδιο σταθμό βιομάζας, στα σενάρια αυτά τα οποία δύναται να πραγματοποιηθούν τα έτη 2030 και 2023 αντίστοιχα, η ισχύς της ηλεκτρόλυσης ανέρχεται στα 500 και 20 MW, με αντίστοιχες παραγωγές μεθανόλης 48 t/h και 1.8 t/h. Επίσης εξετάζονται διάφορα υποσενάρια, όπως η κάλυψη των αναγκών ενέργειας από διαφορετικές πηγές και η επίδραση της αξιοποίησης ή εκπομπής του οξυγόνου που παράγεται από την ηλεκτρόλυση. Επίσης καθώς το διοξείδιο του άνθρακα που δεσμεύεται από τα καυσαέρια του εργοστασίου βιομάζας είναι βιογενούς προελεύσεως δεν έχει αντίκτυπο στο περιβάλλον ως ρύπος, επομένως εξετάζονται δύο σενάρια, ένα για το οποίο η δέσμευσή του θεωρείται ότι έχει θετικό αντίκτυπο και ένα για το οποίο θεωρείται ότι έχει ουδέτερο. Τέλος πραγματοποιήθηκε μία ανάλυση ευαισθησίας. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της μελέτης, παρατηρήθηκε μείωση του περιβαλλοντικού αντικτύπου με την κλιμάκωση της παραγωγής, ενώ το δυναμικό θέρμανσης του πλανήτη για το σενάριο βάσης υπολογίστηκε ίσο με -1190 kg CO₂-eq/ton MeOH.

Το λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε για την μελέτη είναι το SimaPro v.9.1.1, ο κατάλογος απογραφής καταστρώθηκε με την βάση δεδομένων Ecoinvent 3.8 και οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις υπολογίστηκαν με την μέθοδο ReCiPe 2016. Από τις 18 κατηγορίες επιπτώσεων της μεθόδου «midpoint», αναλύθηκε επιπλέον το δυναμικό θέρμανσης του πλανήτη (global warming potential). Ως λειτουργική μονάδα του συστήματος ορίστηκε ο 1 τόνος παραγόμενης μεθανόλης.

ABSTRACT

In the present diploma thesis, a Life Cycle Analysis of a green methanol production system was conducted. The system is examined within the framework of the GreenDEALCO2 program, which aims to find sustainable alternative uses for coal-fired power plants that are either decommissioned or nearing the end of their operational life. One such alternative use is the production of green fuels such as methanol. In the baseline scenario, the production of green methanol is examined through catalytic hydrogenation of carbon dioxide, which is captured by a biomass power plant with a capacity of 375 MW. The power plant is located in Greece and is capable of supplying a portion of the required energy for the production process, which amounts to 206.5 t/h of green methanol over a period of 20 years, with the remaining energy sourced from renewable energy sources. The biomass power plant is considered to be a former lignite power plant. The required hydrogen is produced through electrolysis. The analysis covers the entire life cycle of the system, from the raw materials processing to methanol purification and also includes the management of waste during operation and after the end of the facility's life.

The baseline scenario, due to its scale, was deemed unfeasible for the year 2023, primarily because of the enormous production capacity and the size of the two electrolyzers (1 GW each). However, according to projections, it is expected to be achievable by the year 2050. Two additional production scales are examined for the facility, utilizing the same biomass plant. In these scenarios, which could be implemented by the years 2030 and 2023 respectively, electrolysis power capacities of 500 MW and 20 MW are considered, resulting in methanol productions of 48 t/h and 1.8 t/h, respectively. Various sub-scenarios are also examined, including different energy supply sources and the impact of oxygen utilization or emission after electrolysis. Additionally, as the captured carbon dioxide from the biomass plant is considered to be of biogenic origin and does not pose an environmental pollutant, two scenarios are explored, one assuming a positive impact and one assuming a neutral impact from the capture. Finally a sensitivity analysis was conducted. According to the study results, a reduction in environmental impact was observed with the scaling up of production, while the global warming potential for the baseline scenario was calculated to be -1190 kg CO₂-eq/ton MeOH.

The software used for the study is SimaPro v.9.1.1, the inventory database was constructed using Ecoinvent 3.8, and the environmental impacts were calculated using the ReCiPe 2016 method. Among the 18 impact categories of the midpoint method, the global warming potential was additionally analyzed. The functional unit of the system was defined as one ton of produced methanol.

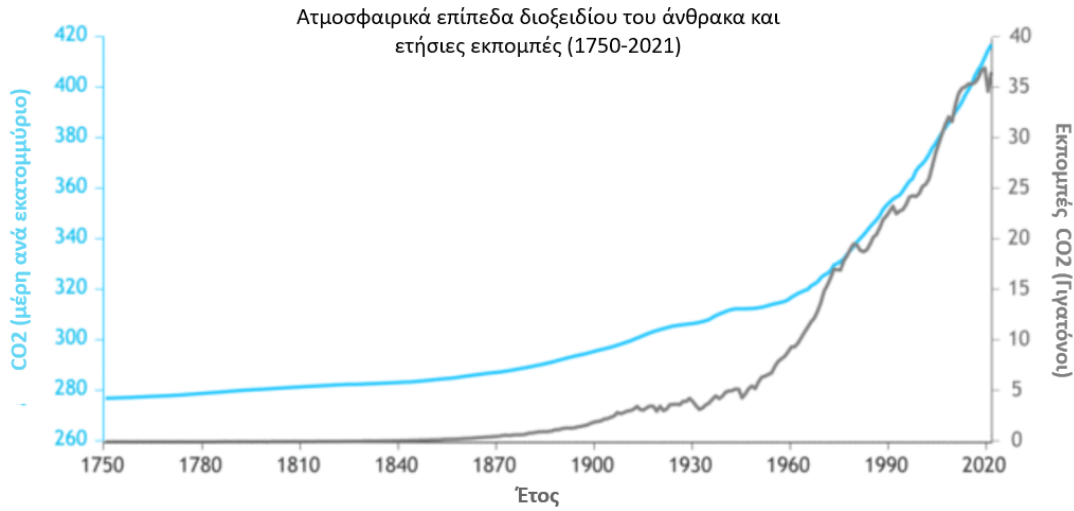
ΑΚΡΩΝΥΜΙΑ

| | |
|------------|---|
| AEM | Μεμβράνη Ανταλλαγής Ανιόντων |
| ASPEN | Προηγμένο Σύστημα Μηχανικής Διεργασιών |
| BOM | Κατάλογος Υλικών |
| CF | Συντελεστής Εκμετάλλευσης |
| CRI | Διεθνής Ανακύκλωση του Άνθρακα |
| DALY | Αναπροσαρμοσμένα Έτη Ζωής Λόγω Αναπηρίας |
| GHG | Εκπομπές Αερίων του Θερμοκηπίου |
| LCA | Ανάλυση Κύκλου Ζωής |
| LCI | Κατάλογος απογραφής Κύκλου Ζωής |
| LCIA | Ανάλυση Επιπτώσεων Κύκλου Ζωής |
| MEA | Μονοαιθανολαμίνη |
| MeOH | Μεθανόλη |
| MI | Ινσιτιούτο Μεθανόλης |
| PCCEL | Κεραμική Ηλεκτρόλυση με Αγωγή Πρωτονίων |
| PEM | Μεμβράνη Ανταλλαγής Πρωτονίων |
| ppb | Μέρη ανά Εκατομμύριο |
| ppm | Μέρη ανά Δισεκατομμύριο |
| PSA | Προσρόφηση με Εναλλαγή Πίεσης |
| SMR | Αναμόρφωση Μεθανίου |
| species.yr | Απώλεια Ειδών του Οικοσυστήματος ανά Έτος |
| SOEC | Ηλεκτρολύτες Στερεού Οξειδίου |
| WGSR | Αντίδραση Μετατροπής Υδαταερίου |
| A/Γ | Ανεμογεννήτριες |
| AKZ | Ανάλυση Κύκλου Ζωής |
| ΑΠΕ | Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας |
| ΕΕ | Ευρωπαϊκή Ένωση |
| Φ/Β | Φωτοβολταϊκά |

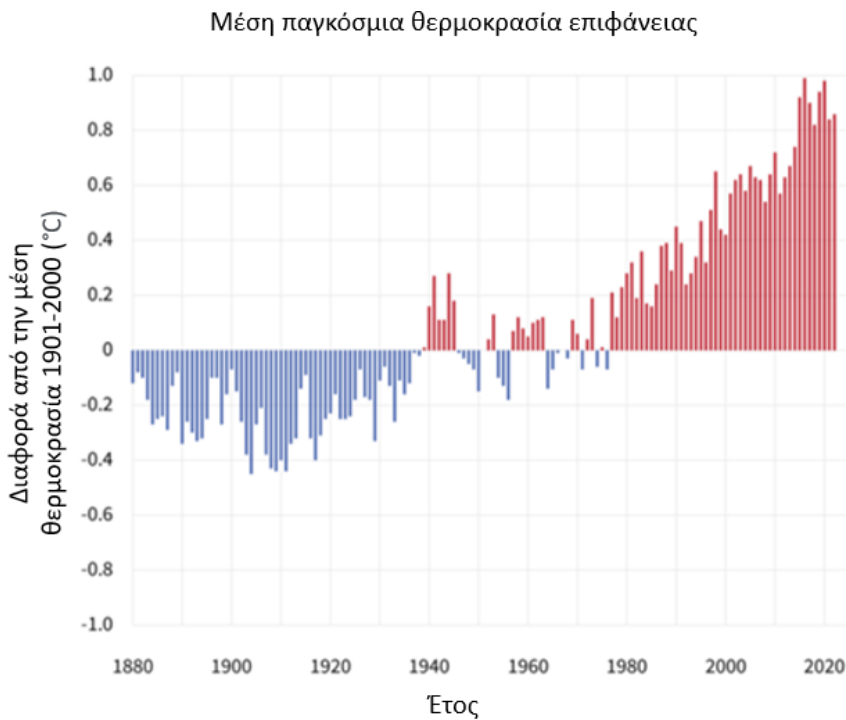
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Κλιματική Αλλαγή

Η κλιματική αλλαγή αποτελεί πλέον μία από τις πιο σοβαρές προκλήσεις της ανθρωπότητας. Οι επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής αρχίζουν ήδη να γίνονται αισθητές και ο αντίκτυπος κατά πάσα πιθανότητα θα είναι τεράστιος παγκοσμίως [1]. Αρχικά κλίμα είναι η στατιστική περιγραφή σε όρους μέσης τιμής και μεταβλητότητας σχετικών μεγεθών, όπως η βροχόπτωση, η θερμοκρασία και ο άνεμος, τα οποία εξετάζονται σε ένα χρονικό διάστημα που κυμαίνεται από μήνες έως και εκατομμύρια χρόνια, ενώ σύμφωνα με τον Παγκόσμιο Μετεωρολογικό Οργανισμό η πιο κλασική περίοδος υπολογισμού είναι τα 30 έτη [2]. Οι αλλαγές στο κλίμα δύναται να προέλθουν τόσο από φυσικές πηγές όπως ηφαιστειακές εκρήξεις, όσο και από ανθρωπογενείς πηγές, όπως οι εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου από την καύση ορυκτών καυσίμων, από τις βιομηχανίες και η αποψίλωση των δασών. Μια πλήρης ανάλυση των τριών κύριων αερίων του θερμοκηπίου δείχνει ότι οι παγκόσμιες μέσες ατμοσφαιρικές συγκεντρώσεις CO₂ είναι 413.2 ± 0.2 μέρη ανά εκατομμύριο (ppm), CH₄ είναι 1889 ± 2 μέρη ανά δισεκατομμύριο (ppb) και N₂O είναι 333.2 ± 0.1 ppb για το 2020 (αντίστοιχα 149 %, 262 % και 123 % των προβιομηχανικών επιπέδων το 1750) [3]. Η ποσότητα του διοξειδίου του άνθρακα στην ατμόσφαιρα έχει αυξηθεί παράλληλα με τις ανθρώπινες εκπομπές από την έναρξη της βιομηχανικής επανάστασης το 1750. Οι εκπομπές αυξήθηκαν αργά σε περίπου 5 δισεκατομμύρια τόνους ανά έτος στα μέσα του 20^{ου} αιώνα πριν αυξηθούν δραματικά σε περισσότερους από 35 δισεκατομμύρια τόνους ανά έτος μέχρι το τέλος του αιώνα (Εικόνα 1-1). Οι μελέτες ανέφεραν ότι η υπερθέρμανση του πλανήτη έχει φτάσει τον 1°C σε σχέση με τα τέλη του 1800 (Εικόνα 1-2) [4]. Το εκτιμώμενο εύρος αύξησης της θερμοκρασίας υπολογίζεται 1.5-5.8 °C μέχρι το τέλος του 21^{ου} αιώνα [5]. Οι αυξήσεις στις παγκόσμιες θερμοκρασίες μπορεί να έχουν ποικίλες επιπτώσεις, όπως για παράδειγμα η αύξηση των καταιγίδων, των πλημμυρών, της ξηρασίας και της στάθμης της θάλασσας, και η μείωση των στρωμάτων πάγου [6]. Αυτές οι αλλαγές μπορούν να βλάψουν άμεσα τα ζώα, να καταστρέψουν τα οικοσυστήματά τους και να προκαλέσουν καταστροφές στις κοινότητες των ανθρώπων, προκαλώντας αναγκαστικές μετακινήσεις πληθυσμών, ασθένειες και θανάτους. Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα της κλιματικής αλλαγής είναι ο πάγος στην Αρκτική, ο οποίος έχει μειωθεί δραματικά από τα τέλη της δεκαετίας του 1970, ιδιαίτερα το καλοκαίρι και το φθινόπωρο. Από τότε που ξεκίνησε το δορυφορικό αρχείο το 1978, η ετήσια ελάχιστη έκταση του θαλάσσιου πάγου της Αρκτικής (η οποία εμφανίζεται τον Σεπτέμβριο) έχει μειωθεί κατά περίπου 40 % [7]. Αυτό με τη σειρά του επιταχύνει τη θέρμανση του πλανήτη, καθώς μειώνεται η ποσότητα του ηλιακού φωτός που αντανακλάται μακριά από αυτόν.



Εικόνα 1-1 Ατμοσφαιρικά επίπεδα διοξειδίου του άνθρακα (μπλε γραμμή) και ετήσιες εκπομπές (γκρι γραμμή) [8].



Εικόνα 1-2 Ετήσια θερμοκρασία επιφάνειας συγκρινόμενη με το μέσο όρο του 20ού αιώνα από το 1880 έως το 2022 [9].

1.2 Ανασκόπηση Διεθνούς Νομοθετικού και Κανονιστικού Πλαισίου Σχετικά με την Παραγωγή Ενέργειας από ΑΠΕ

Στις αρχές της δεκαετίας του 1960, τα αποτελέσματα από μαθηματικά/φυσικά μοντέλα του κλιματικού συστήματος έδειξαν για πρώτη φορά ότι οι ανθρωπογενείς εκπομπές του CO₂ θα αναμενόταν να οδηγήσουν σε σταδιακή θέρμανση της κατώτερης ατμόσφαιρας (τροπόσφαιρα) και ψύξη των ανώτερων επιπέδων της ατμόσφαιρας (στρατόσφαιρας) [7]. Στις αρχές της δεκαετίας του 1970, επικράτησε μια διαφορετική ανησυχία για το κλίμα, η παγκόσμια ψύξη. Καθώς όλο και περισσότεροι άνθρωποι ανησυχούσαν για τους ρύπους που εκπέμπονταν στην ατμόσφαιρα, ορισμένοι επιστήμονες θεωρούσαν ότι οι ρύποι αυτοί θα μπορούσαν να αποκλείσουν το ηλιακό φως και να προκαλέσουν ψύξη της Γης. Στην πραγματικότητα, το βόρειο ημισφαίριο της Γης ψύχθηκε σε ένα βαθμό μεταξύ του 1940 και του 1970 ενώ στο νότιο ημισφαίριο παρατηρήθηκε αύξηση της θερμοκρασίας [10]. Αυτό ερμηνεύθηκε από πολλά επιστημονικά περιοδικά με την αύξηση των ρύπων αεροζόλ και κυρίως βιομηχανικών ρύπων όπως το διοξείδιο του θείου, τα οποία δεν επέτρεπαν την είσοδο της ηλιακής ακτινοβολίας στην ατμόσφαιρα [11]. Ωστόσο με την αύξηση της θερμοκρασίας και των επιπέδων του διοξειδίου του άνθρακα στην ατμόσφαιρα οι κλιματολόγοι πρώτα και η επιστημονική κοινότητα ύστερα πίεσε για δράση.

Το 1997 η συνθήκη του Κιότο έθεσε σε λειτουργία τη Σύμβαση-Πλαίσιο των Ηνωμένων Εθνών για την Κλιματική Αλλαγή υποχρεώνοντας τις βιομηχανικές χώρες και τις αναπτυσσόμενες οικονομίες να περιορίσουν τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου (GHG) με βάση συμφωνημένους επιμέρους στόχους. Συγκεκριμένα, βάσει του Πρωτοκόλλου και κατά την πρώτη περίοδο δέσμευσης, οι βιομηχανικές χώρες είχαν δεσμευτεί να μειώσουν, κατά την περίοδο 2008–2012, τις εκπομπές έξι αερίων που ευθύνονται για την υπερθέρμανση του πλανήτη, δηλαδή το διοξείδιο του άνθρακα, το μεθάνιο, το υποξείδιο του αζώτου, οι υδροφθοράνθρακες, οι υπερφθοράνθρακες, και το εξαφθοριούχο θείο, τουλάχιστον κατά 5 % σε σύγκριση με τα επίπεδα του 1990. Στο πλαίσιο αυτό, τα κράτη μέλη της ΕΕ δεσμεύτηκαν να μειώσουν τις εκπομπές τους κατά 8 % κατά τη διάρκεια αυτής της περιόδου [12].

Στην συνέχεια το 2009 ακολούθησε η συνθήκη της Κοπεγχάγης, η οποία έθεσε ανάλογους στόχους για το 2020 [13]. Όσον αφορά τις χώρες της Ε.Ε οι στόχοι ήταν οι εξής:

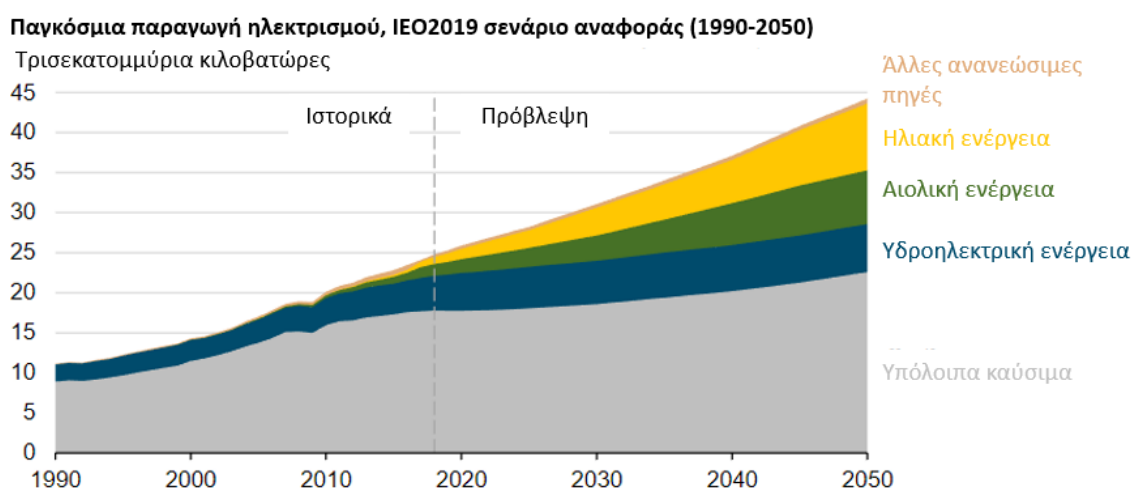
- Μείωση των αερίων του θερμοκηπίου κατά 20 % σε σύγκριση με το 1990
- Παραγωγή του 20 % της ηλεκτρικής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές
- Αύξηση κατά 20 % στην ενεργειακή απόδοση σε σχέση με το 1990.

Ύστερα ακολούθησε η συμφωνία του Παρισίου το 2015. Αυτή θέτει έναν μακροπρόθεσμο στόχο θερμοκρασίας, να διατηρηθεί η παγκόσμια μέση αύξηση της θερμοκρασίας κάτω από τους 2 °C και να συνεχιστεί η προσπάθεια να περιοριστεί σε 1.5 °C πάνω από το προβιομηχανικό επίπεδο (για το 2050) [1]. Κάποιοι θεωρούν πως μη αναστρέψιμες μεταβολές πρόκειται να προκληθούν στα συστήματα του πλανήτη όταν η αύξηση πλησιάσει τους 1.5 °C [14]. Κάποιοι επιμέρους στόχοι που τέθηκαν σε αυτή τη συνθήκη ήταν οι εξής:

- 40 % μείωση στα παραγόμενα αέρια του θερμοκηπίου μέχρι το 2030 σε σύγκριση με το 1990
- 32 % συνεισφορά ΑΠΕ στο ενεργειακό μείγμα της Ε.Ε.
- 32.5 % αύξηση στην ενεργειακή απόδοση [15].

Τέλος το 2020 πραγματοποιήθηκε το European Green Deal με στόχο την μετάβαση σε ένα βιώσιμο μοντέλο οικονομίας. Ο βασικοί στόχοι που τέθηκαν είναι οι εξής [16]:

- Κλιματική ουδετερότητα έως το 2050
- 55 % μείωση στα παραγόμενα αέρια του θερμοκηπίου μέχρι το 2030 σε σύγκριση με το 1990



Εικόνα 1-3 Παγκόσμια παραγωγή ηλεκτρισμού (1990-2050) [17]

1.3 Αποθήκευση Ενέργειας

Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, λαμβάνουν ολοένα και μεγαλύτερο μερίδιο στην παγκόσμια παραγωγή ενέργειας, με αποτέλεσμα η ανάγκη για την ύπαρξη μονάδων αποθήκευσης της περίσσειας ηλεκτρικής ενέργειας να είναι πιο επιτακτική από ποτέ. Αυτό συμβαίνει, επειδή η παραγωγή ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές είναι ευμετάβλητη και διακοπτόμενη λόγω των συνεχών αλλαγών του καιρού. Η ανάπτυξη των συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας ξεκίνησε τον 19^ο αιώνα. Η ενέργεια μπορεί να αποθηκευτεί σε μορφή μηχανική, ηλεκτροχημική, χημική, θερμική ενέργεια, καθώς και στη μορφή ηλεκτρικών ή μαγνητικών πεδίων [18]. Οι μπαταρίες είναι ο πρώτος τρόπος αποθήκευσης ενέργειας που χρησιμοποιήθηκε συνειδητά από τους ανθρώπους (από αρχαίους χρόνους υπήρχε αποθήκευση βιομάζας όπως ξύλα). Οι κύριοι τρόποι αποθήκευσης είναι η αντλησιοταμίευση, οι μπαταρίες, οι σφόνδυλοι, τα συστήματα αποθήκευσης θερμικής ενέργειας, είτε με αισθητή θερμότητα, είτε με λανθάνουσα (υλικά αλλαγής φάσης) και οι κυψέλες καυσίμου. Σε παγκόσμιο επίπεδο, η αντλησιοταμίευση παρέχει 160 GW από τα

περίπου 167 GW αποθήκευσης ενέργειας σε λειτουργία παγκοσμίως. Καθιστά μια δοκιμασμένη, αξιόπιστη τεχνολογία που αυτή τη στιγμή αντιπροσωπεύει περισσότερο από το 95 % του συνόλου της αποθήκευσης ενέργειας [19]. Η απόδοση της μεθόδου της αντλησιοταμίευσης είναι 70-80 % [20]. Το πρόβλημα της μεθόδου αυτής είναι ότι απαιτεί συγκεκριμένα γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά για τους δύο ταμειυτήρες τα οποία δεν συναντώνται παντού. Οι μπαταρίες οι οποίες είναι κυρίως τύπου λιθίου, είναι σχετικά ασύμφωρες οικονομικά σε μεγάλη κλίμακα ενώ τα αποθέματα λιθίου δεν είναι αρκετά για την κάλυψη μεγάλου μέρους των αναγκών. Μια ανερχόμενη μέθοδος είναι αυτή της μετατροπής ηλεκτρικής ενέργειας σε καύσιμα (όπως το υδρογόνο).

Τα οφέλη αποθήκευσης ενέργειας μπορούν να ομαδοποιηθούν σε εξής κατηγορίες εφαρμογών/χρήσης [21]:

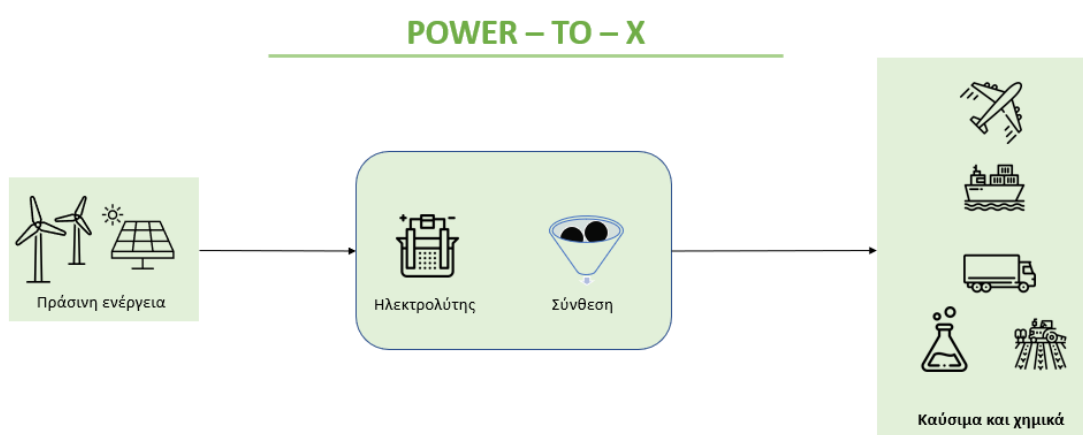
- Ενσωμάτωση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στο δίκτυο, οι οποίες έχουν μεταβλητή παραγωγή όπως ηλιακά και αιολικά πάρκα.
- Βελτίωση της αποδοτικότητας του δικτύου, καθώς αυξάνεται ο συντελεστής αξιοποίησης των υφιστάμενων μονάδων και αντισταθμίζεται η ανάγκη εξάρτησης από σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής αιχμής που εκπέμπουν ρύπους.
- Προσφορά πιο αξιόπιστης παροχής ηλεκτρικής ενέργειας, ενώ η αποθήκευση μπορεί επίσης να υποστηρίξει την αποτελεσματική παροχή ηλεκτρικής ενέργειας για εγκαταστάσεις βασικού φορτίου, οι οποίες έχουν αργούς χρόνους αύξησης της παραγόμενης ισχύος όταν ανταποκρίνονται στο δίκτυο.
- Βελτίωση της υποδομής του ηλεκτρικού δικτύου καθώς μειώνεται σημαντικά το λειτουργικό κόστος ολόκληρης της υποδομής του δικτύου.
- Συνολική ενσωμάτωση συστημάτων αποθήκευσης είναι επωφελής για όλους τους τελικούς χρήστες, καθώς εξοικονομεί κόστος για την κοινωνία, επιτρέποντας την αποθήκευση ενέργειας χαμηλού κόστους και την ανάκτησή της αργότερα, όταν οι τιμές ηλεκτρικής ενέργειας είναι υψηλές.

1.4 Ανάγκη για Εναλλακτικά Καύσιμα

Επί του παρόντος, τα ορυκτά καύσιμα είναι οι κύριες πηγές ενέργειας και φορείς ενέργειας στον κόσμο. Ωστόσο, τα ορυκτά καύσιμα δεν είναι ανεξάντλητα και η χρήση τους προκαλεί σοβαρές περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Καθώς οι προμήθειες αρχίζουν τελικά να εξαντλούνται και οι περιβαλλοντικές ανησυχίες αυξάνονται, ο κόσμος θα στρέφεται όλο και περισσότερο σε εναλλακτικές πηγές ενέργειας. Ωστόσο, πηγές ενέργειας όπως η ηλιακή ακτινοβολία, ο άνεμος, τα κύματα κ.λπ. μπορούν να συνεισφέρουν στην παραγωγή αλλά όχι στην μεταφορά ενέργειας. Ο τρόπος μεταφοράς ενέργειας ως τώρα είναι η ηλεκτρική ενέργεια, όμως ώστε να είναι αποτελεσματικό το σύστημα ενέργειας υπάρχει ανάγκη για χημικά καύσιμα. Επομένως αυξάνεται η ανάγκη για δημιουργία εναλλακτικών καυσίμων όπως το υδρογόνο και η μεθανόλη, ώστε να μειωθεί η χρήση ορυκτών καυσίμων.

1.5 Power-to-Fuel

Η τεχνολογία Power-to-Fuel (PtF,P2F) αποτελεί έναν τρόπο αποθήκευσης πλεονάσματος ηλεκτρικής ενέργειας, με τη μορφή χημικής ενέργειας αερίων και υγρών ουσιών όπως το υδρογόνο (H_2), το μεθάνιο (CH_4) και η μεθανόλη (CH_3OH). Επομένως πρωταρχικός ρόλος της τεχνολογίας Power-to-Fuel είναι η εκμετάλλευση της περίσσειας ισχύος αλλά και η ωφέλιμη χρησιμοποίηση βιομηχανικών ρύπων όπως το διοξείδιο του άνθρακα. Με αυτόν τον τρόπο το δίκτυο καθίσταται πιο αποδοτικό, ευέλικτο και βιώσιμο. Η τεχνολογία Power-to-Fuel είναι αναπτυσσόμενη στο πεδίο των ΑΠΕ και της βιώσιμης διαχείρισης ενέργειας [22]. Η τεχνολογία διαχωρίζεται σε Power to Gas (PtG) και Power to Liquid (PtL). Τα κύρια μειονεκτήματα του Power-to-F είναι η σχετικά χαμηλή απόδοση και το υψηλό κόστος [23].



Εικόνα 1-4 Μεμονωμένα μέρη της τεχνολογίας Power-to-X [24]

1.6 Υδρογόνο

1.6.1 Γενικά

Το υδρογόνο (H_2) είναι το πιο ελαφρύ και απλό στοιχείο και αποτελείται από ένα ηλεκτρόνιο και ένα πρωτόνιο [25]. Το H_2 είναι το πιο άφθονο στοιχείο στο σύμπαν και βρίσκεται κυρίως στο νερό και σε οργανικές ενώσεις [26]. Επίσης δεν συναντάται ποτέ μόνο του στην φύση, ωστόσο μπορεί να παραχθεί με διάφορες τεχνολογίες [27]. Υπάρχει συμφωνία μεταξύ πολλών ερευνητών ότι το υδρογόνο είναι η πιο λογική επιλογή ως χημικό καύσιμο στις μελλοντικές κοινωνίες του κόσμου. Μια ενδεχόμενη «οικονομία υδρογόνου», όπου το υδρογόνο και η ηλεκτρική ενέργεια λειτουργούν ως συμπληρωματικοί δευτερεύοντες φορείς ενέργειας, έχει οραματιστεί εδώ και πολλές δεκαετίες [28]. Το υδρογόνο θεωρείται ότι πρόκειται να λάβει σημαντική θέση στα παγκόσμια ενεργειακά συστήματα και να δώσει λύση στις ανησυχίες για την κλιματική αλλαγή, καθώς παράγει μηδενικά απόβλητα και είναι κατάλληλο για παραγωγή και μεταφορά ενέργειας [29].

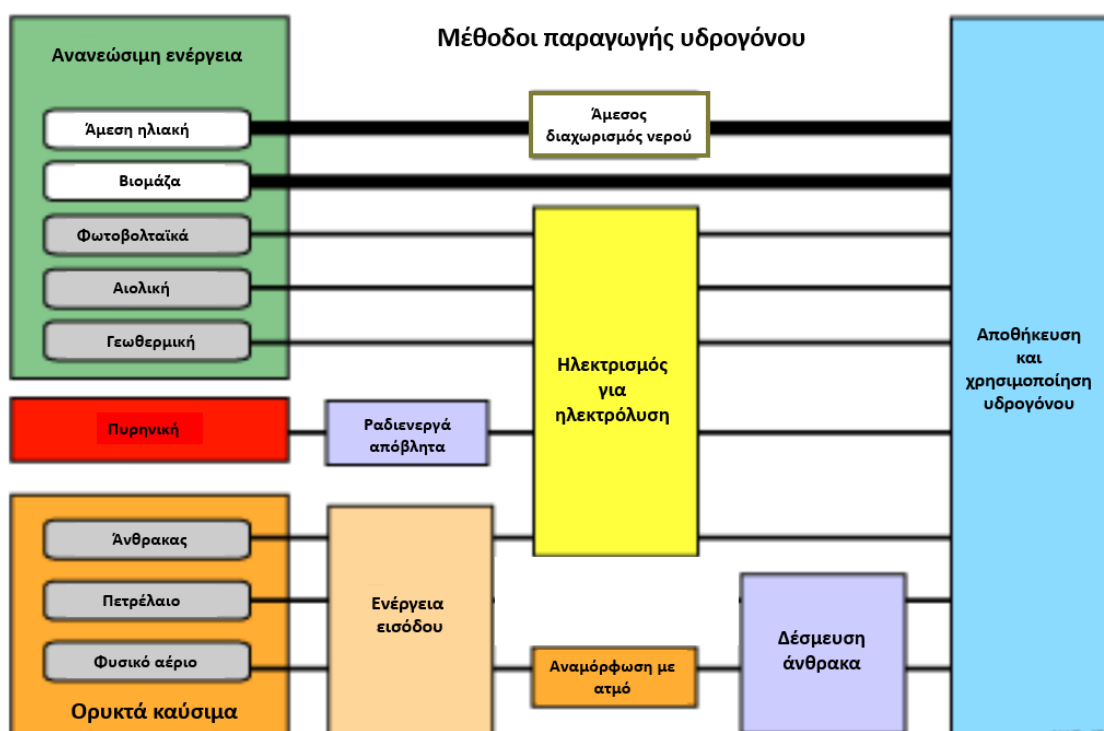
Η παγκόσμια ζήτηση υδρογόνου έφτασε τους 94 εκατομμύρια τόνους (Mt) το 2021 [30]. Η ζήτηση για υδρογόνο αναμένεται να αυξηθεί κατά περίπου 8 φορές το 2050 σε σχέση με το 2020, υπάρχουν αρκετές προκλήσεις για την αποτελεσματική ανάπτυξη εφαρμογών υδρογόνου στον τομέα της ενέργειας. Το υδρογόνο έχει τη δεύτερη υψηλότερη θερμογόνο

δύναμη, 120-142 MJ/kg, που είναι η καλύτερη αναλογία ενέργειας-βάρους μεταξύ όλων των συμβατικών καυσίμων. Ωστόσο η κατ' όγκο θερμογόνος ικανότητα του σε αέρια κατάσταση είναι χαμηλή (8.4-10.4 MJ/L, με την υψηλότερη τιμή να αναφέρεται στο σημείο τριπλής ισορροπίας) [31]. Όσον αφορά την αποθήκευση του υδρογόνου, το σύστημα αποθήκευσης υδριδίου μετάλλου έχει το μικρότερο κόστος, περίπου 125 USD/m³. Είναι επιτακτική η ανάγκη ανάπτυξης υποδομών για αποτελεσματική διαχείριση της αποθήκευσης και μεταφοράς του υδρογόνου [32]. Επαναχρησιμοποίηση αγωγών φυσικού αερίου για τη μεταφορά υδρογόνου μπορεί να μειώσει το επενδυτικό κόστος 50-80 %, σε σχέση με την ανάπτυξη νέων αγωγών [30].

Το υδρογόνο είναι μη τοξικό και πολύ ελαφρύτερο από τον αέρα και διαχέεται γρήγορα όταν απελευθερώνεται. Είναι η ουσία με τη μεγαλύτερη ταχύτητα διάχυσης στον αέρα, ~20 m/s σε θερμοκρασία δωματίου. Επομένως, το υδρογόνο θα διασπαρεί γρήγορα ομοιόμορφα από μια διαρροή, γεγονός που συμβάλλει στην ασφάλεια, αν και το εύρος έκρηξης στον αέρα είναι μεγάλο, 4–75 vol % [33]. Η κύρια ανησυχία για την ασφάλεια είναι ότι εάν μια διαρροή παραμείνει απαρατήρητη και το αέριο συγκεντρωθεί σε περιορισμένο χώρο, μπορεί τελικά να αναφλεγεί και να προκαλέσει έκρηξη [34].

1.6.2 Παραγωγή Υδρογόνου

Προς το παρόν, το υδρογόνο μπορεί να παραχθεί από διάφορους πόρους όπως το φυσικό αέριο, ο άνθρακας, η βιομάζα, το νερό και τα υδρίδια μετάλλων. Ακόμα και αν γίνεται πρόοδος στην παραγωγή υδρογόνου, προς το παρόν το μεγαλύτερο μέρος της γίνεται από ορυκτούς πόρους, το οποίο έχει αρνητικό αντίκτυπο στο περιβάλλον. Για αυτό το λόγο η παραγωγή του από καθαρές πηγές ενέργειας πρέπει να αυξηθεί. Η παραγωγή πράσινου υδρογόνου προς το παρόν είναι πιο ακριβή σε σχέση με αυτήν που προέρχεται από ορυκτά καύσιμα, ωστόσο προβλέπεται ότι μέχρι το 2050 η παραγωγή πράσινου υδρογόνου θα είναι πιο συμφέρουσα οικονομικά λύση [35].



Εικόνα 1-5 Μέθοδοι παραγωγής υδρογόνου [36]

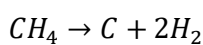
1.6.2.1 Παραγωγή Υδρογόνου από Ορυκτά Καύσιμα

Το υδρογόνο αντιπροσωπεύει επί του παρόντος περίπου το 1 % της κατανάλωσης ενέργειας στην Ευρώπη, το 96 % του οποίου παράγεται από φυσικό αέριο, εκπέμποντας σημαντικές ποσότητες CO₂ κατά την διαδικασία αυτή [37]. Η συμβατική μέθοδος παραγωγής υδρογόνου είναι αυτή που παράγεται από φυσικό αέριο μέσω αναμόρφωσης του μεθανίου (Steam Methane Reforming - SMR) και είναι η πιο οικονομική μέθοδος ως τώρα. Σε αυτή τη μέθοδο το φυσικό αέριο αναμιγνύεται με ατμό υψηλής θερμοκρασίας, πάνω σε καταλυτική επιφάνεια και παράγεται ένα μίγμα υδρογόνου και μονοξειδίου του άνθρακα. Ύστερα το μίγμα, υφίσταται μια αντίδραση μετατροπής υδαταερίου (water-gas shift reaction - WGS), ώστε να δεσμευθεί το υδρογόνο και το διοξείδιο του άνθρακα, όπου το υδρογόνο καθαρίζεται από το διοξείδιο του άνθρακα. Ο βαθμός απόδοσης αυτής της διαδικασίας είναι 65-75 %, αλλά για μεγάλες μονάδες, δύναται να φθάσει το 80 % [38]. Πριν την διαδικασία αναμόρφωσης, το μεθάνιο περνά από διαδικασία αποθείωσης, ώστε να μην καταστραφεί (δηλητηριαστεί) ο καταλύτης. Η διαδικασία αναμόρφωσης πραγματοποιείται υπό υψηλές θερμοκρασίες, ώστε να δεσμευτεί το συνθετικό αέριο (syngas). Από το ρεύμα μονοξειδίου του άνθρακα, απάγεται επιπλέον υδρογόνο. Τέλος για να παραχθεί καθαρό υδρογόνο το διοξείδιο του άνθρακα απάγεται με την διαδικασία προσρόφησης με εναλλαγή πίεσης (Pressure Swing Adsorption - PSA) [39].

Μια άλλη μέθοδος παραγωγής υδρογόνου είναι αυτή της αεριοποίησης ανθρακικών ενώσεων, όπου ενώσεις που περιέχουν άνθρακα, μετατρέπονται σε αέρια καύσιμα ή πρώτη ύλη. Η μέθοδος της αεριοποίησης είναι από τις πιο αποτελεσματικές, αποδοτικές τεχνικές για την παραγωγή υδρογόνου από βιομάζα. Έχει την καλύτερη στοιχειομετρική απόδοση υδρογόνου από όλες τις θερμοχημικές μεθόδους [27]. Για την πραγματοποίηση της χημικής

αντίδρασης της αεριοποίησης απαιτείται ένα μέσο αντίδρασης, όπως το οξυγόνο, ο υποκρίσιμος ατμός ή κάποιο μίγμα των παραπάνω, καθώς και υψηλή θερμοκρασία σε συνδυασμό με έλλειψη οξυγόνου στο περιβάλλον. Ο πιο σημαντικός παράγοντας είναι αυτός της θερμοκρασίας. Μέσω της αεριοποίησης επιτυγχάνεται αύξηση της θερμογόνου ικανότητας του καυσίμου, μέσω της αφαίρεσης μη εύφλεκτων συστατικών όπως είναι το νερό και το άζωτο. Έπειτα μειώνεται η αναλογία άνθρακα υδρογόνου στο μίγμα και αφαιρούνται το άζωτο και το θείο, ώστε να μην απελευθερωθούν στην ατμόσφαιρα με την καύση. Υπάρχει η αεριοποίηση άνθρακα και βιομάζας, με την πρώτη να είναι πιο αποδοτική και οικονομική.

Η πυρόλυση του μεθανίου είναι μια τεχνολογικά απλούστερη, ενός σταδίου διεργασία σε σύγκριση με την αναμόρφωση με ατμό και δεν παράγει οξείδια του άνθρακα και πραγματοποιείται σύμφωνα με την χημική Εξίσωση 1-1.



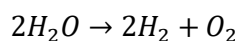
Εξίσωση 1-1

Ανά μολ μεθανίου παράγεται μόνο το μισό υδρογόνο σε σύγκριση με SMR και WGSR, αλλά απαιτείται λιγότερη ενέργεια και επιπλέον παράγεται στερεός άνθρακας [40]. Βασικοί παράγοντες που επηρεάζουν την ταχύτητα της πυρόλυσης είναι η θερμοκρασία και η παρουσία καταλυτών. Σε αντίθεση με την καύση, η πυρόλυση πραγματοποιείται με πλήρη απουσία οξυγόνου, με εξαίρεση φορές όπου μερική καύση επιτρέπεται ώστε να προσφερθεί η απαραίτητη θερμική ενέργεια για την διαδικασία [27].

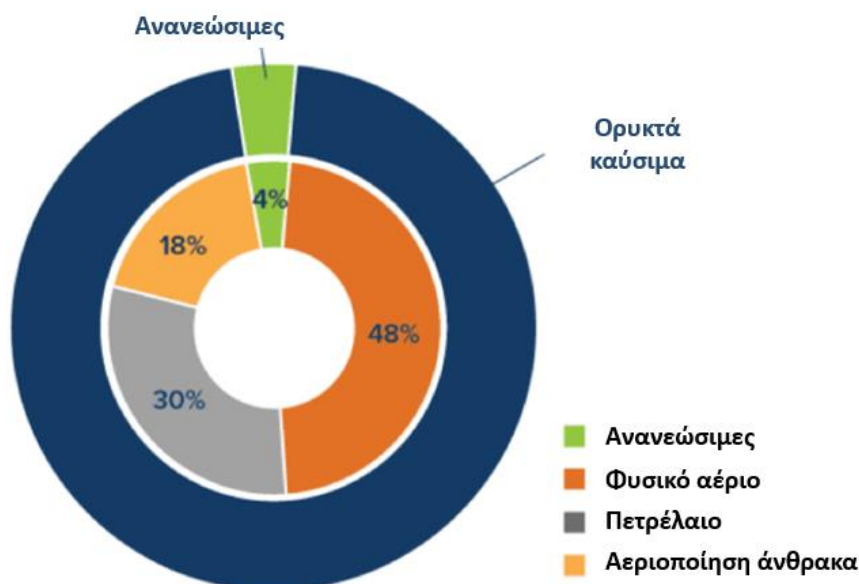
1.6.2.2 Πράσινο Υδρογόνο

Πρέπει να σημειωθεί ότι σήμερα οι πράσινες τεχνολογίες υδρογόνου (συστήματα P2G, κυψέλες καυσίμου) δεν είναι οικονομικά βιώσιμες. Ο λόγος είναι η τρέχουσα τιμή του τεχνολογικού εξοπλισμού για την παραγωγή, αποθήκευση και διανομή πράσινου υδρογόνου, ο οποίος δεν αποτελεί ακόμη αντικείμενο μαζικής παραγωγής και επομένως εξακολουθεί να είναι σε υψηλές τιμές [41]. Το κόστος για τις συσκευές ηλεκτρόλυσης μπορεί να μειωθεί περίπου 70 % έως το 2030 σε σύγκριση με σήμερα. Σε συνδυασμό με την αναμενόμενη πτώση στο κόστος των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, αυτό μπορεί να μειώσει το κόστος του υδρογόνου με βάση τις ανανεώσιμες πηγές σε ένα εύρος για 1.3-4.5 USD/kg H₂ (ισοδύναμο με 39-135 USD/MWh) [30].

Το πράσινο υδρογόνο, παράγεται από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, μέσω της διαδικασίας της ηλεκτρόλυσης. Η ηλεκτρόλυση είναι μια διαδικασία που διασπά το νερό, σχηματίζοντας υδρογόνο και οξυγόνο. Υπάρχουν διάφοροι τρόποι λήψης υδρογόνου μέσω ηλεκτρόλυσης όπως ηλεκτρικά, θερμοχημικά, φωτοχημικά, φωτοηλεκτροχημικά, ή βιοχημικά. Όσον αφορά την πιο κοινή μέθοδο, αυτή που χρησιμοποιεί ηλεκτρισμό, ώστε να διασπαστεί το νερό σε υδρογόνο και οξυγόνο. Μια τυπική μονάδα ηλεκτρόλυσης, αποτελείται από μια κάθοδο και μια άνοδο οι οποίες είναι βυθισμένες σε έναν ηλεκτρολύτη και γενικά όταν εφαρμόζεται ηλεκτρικό ρεύμα, το νερό διασπάται και το υδρογόνο παράγεται στην κάθοδο ενώ το οξυγόνο εκλύεται στην πλευρά της ανόδου, σύμφωνα με την [42]. Προς το παρόν το μειονέκτημα της μεθόδου είναι το κόστος της, ωστόσο έχει μηδενική επιτόπου εκπομπή ρύπων, είναι απλή σαν διαδικασία, έχει εύκολη κλιμάκωση και τέλος υπάρχει διαθεσιμότητα των απαραίτητων πρώτων υλών.



Εξίσωση 1-2



Εικόνα 1-6 Ποσοστά συνεισφοράς στην παραγωγή υδρογόνου [43]

1.6.2.3 Ηλεκτρολύτες

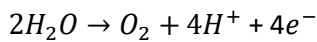
- Αλκαλικοί Ηλεκτρολύτες

Σε αυτόν τον τύπο, ιόντα υδροξειδίου (OH⁻) μεταφέρονται από την κάθοδο στην άνοδο, ενώ το υδρογόνο παράγεται στην πλευρά της καθόδου σύμφωνα με τις παρακάτω χημικές εξισώσεις (Εξίσωση 1-3, Εξίσωση 1-4, Εξίσωση 1-5). Οι ηλεκτρολύτες ευρείας χρήσης, οι οποίοι είναι εμπορικά διαθέσιμοι εδώ και χρόνια, χρησιμοποιούν υγρό αλκαλικό διάλυμα υδροξειδίου του νατρίου, ή του καλίου ως ηλεκτρολύτη. Ωστόσο σε πιο πειραματικό στάδιο οι στερεές μεμβράνες αλκαλικής ανταλλαγής (ΑΕΜ) δείχνουν αρκετά υποσχόμενες.

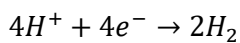


- Ηλεκτρολύτες με Πολυμερικές Μεμβράνες

Σε αυτόν τον τύπο, ο ηλεκτρολύτης είναι ένα συμπαγές ειδικό πλαστικό υλικό [44]. Η κυψέλη τροφοδοτείται με απιονισμένο νερό ενώ δεν χρειάζεται κάποιος επιπλέον ηλεκτρολύτης, καθώς η πολυμερική μεμβράνη λαμβάνει αυτόν τον ρόλο, καθώς και τον ρόλο διαχωρισμού των παραγόμενων αερίων. Το νερό αντιδρά στην άνοδο για να σχηματίσει οξυγόνο και θετικά φορτισμένα ιόντα υδρογόνου. Τα ηλεκτρόνια ρέουν μέσω ενός εξωτερικού κυκλώματος και τα ιόντα υδρογόνου κινούνται επιλεκτικά κατά μήκος του PEM προς την κάθοδο, σύμφωνα με την χημική Εξίσωση 1-6. Στην κάθοδο, τα ιόντα υδρογόνου ενώνονται με τα ηλεκτρόνια από το εξωτερικό κύκλωμα για να σχηματίσουν αέριο υδρογόνο, σύμφωνα με την χημική Εξίσωση 1-7 [44].

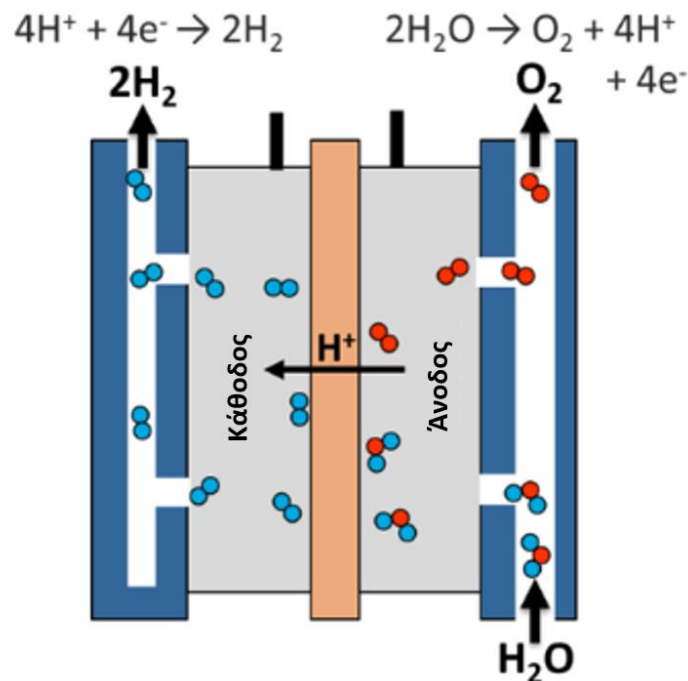


Εξίσωση 1-6



Εξίσωση 1-7

Σε μία τυπική διάταξη PEM ηλεκτρόλυσης, η μεμβράνη διαχωρίζει την κυψέλη σε δύο τμήματα. Λόγω της χαμηλής διασταύρωσης παραγόμενων αερίων, παράγεται υψηλής καθαρότητας υδρογόνο, ενώ οι PEM ηλεκτρολύτες μπορούν να λειτουργούν σε ένα μεγάλο εύρος ισχύος εισόδου, στο οποίο είναι αποδοτικοί. Το πλεονέκτημα τους σε σχέση με τους αλκαλικούς είναι ότι έχουν την δυνατότητα να λειτουργήσουν σε υψηλότερες πυκνότητες ρεύματος με πιο συμπαγή σχεδιασμό. Ωστόσο προς το παρόν το αρχικό κόστος είναι μεγαλύτερο από ότι στους αλκαλικούς [45]. Έπειτα λειτουργούν σε υψηλές πιέσεις, το οποίο είναι χρήσιμο, λόγω της ανάγκης αποθήκευσης του υδρογόνου σε υψηλές πιέσεις.



Εικόνα 1-7 Σχηματική αναπαράσταση ηλεκτρολύτη με πολυμερικές μεμβράνες [44]

- Ηλεκτρολύτες με Μεμβράνες Ανταλλαγής Ιόντων

Ένα από τα μεγάλα πλεονεκτήματα της ηλεκτρόλυσης με AEM είναι η αντικατάσταση των συμβατικών ηλεκτροκαταλυτών πολύτιμων μετάλλων με καταλύτες μεταβατικών μετάλλων χαμηλού κόστους [46]. Η ηλεκτρόλυση με AEM είναι ακόμα μια αναπτυσσόμενη τεχνολογία. Η συνολική αντίδραση αποτελείται από δύο αντιδράσεις: την αντίδραση δημιουργίας υδρογόνου και την αντίδραση δημιουργίας οξυγόνου. Το νερό κυκλοφορεί μέσω της πλευράς ανόδου, όπου με την προσθήκη δύο ηλεκτρονίων το αναγωγικό περιβάλλον μετατρέπει το νερό σε υδρογόνο και ιόντα υδροξυλίου. Τα ιόντα υδροξυλίου, διαχέονται μέσω της AEM στο τμήμα του ανόδου, λόγω της θετικής έλξης του ανόδου, ενώ τα ηλεκτρόνια μεταφέρονται προς την άνοδο μέσω του εξωτερικού κυκλώματος. Στον θάλαμο της ανόδου, τα ιόντα υδροξυλίου μετατρέπονται σε νερό και οξυγόνο αποβάλλοντας ηλεκτρόνια. Το οξυγόνο δημιουργείται σε μορφή φυσαλίδων και απελευθερώνεται από την επιφάνεια της ανόδου. Και οι δύο αντιδράσεις απαιτούν καταλυτική δραστηριότητα για τη δημιουργία και απελευθέρωση των αντίστοιχων αερίων από τις επιφάνειες των ηλεκτροδίων [47]. Ισχύουν και πάλι οι εξισώσεις των AWE (Εξίσωση 1-3, Εξίσωση 1-4, Εξίσωση 1-5).

- Ηλεκτρολύτες Στερεού Οξειδίου

Τα συστήματα στερεού οξειδίου (SOEC) λειτουργούν σε υψηλές θερμοκρασίες 600-1000 °C. Το σύστημα SOEC απαιτεί πολλά στοιχεία ώστε να διατηρεί την θερμοκρασία και πίεση λειτουργίας. Τα στοιχεία του συστήματος μπορούν να κατηγοριοποιηθούν στις παρακάτω ομάδες: καμινάδες SOEC, θερμαντικά στοιχεία, στοιχεία ελέγχου υγρών και στοιχεία για την μετά-επεξεργασία [48]. Η βασική ιδέα της θερμικής ολοκλήρωσης του συστήματος SOEC είναι ο συνδυασμός τριών θερμικών ζωνών:

- i. Ζώνη λήψης θερμικής ενέργειας
- ii. Θερμική ζώνη παροχής ενέργειας
- iii. Εξωτερική πηγή θερμότητας

Η πρώτη ζώνη, περιλαμβάνει κρύα ρεύματα και αναφέρεται σε όλα τα ρεύματα πριν εισέλθουν στην SOEC καμινάδα. Η δεύτερη ζώνη αναφέρεται στα θερμά ρεύματα αέρα τα οποία εξέρχονται από την καμινάδα. Μέσω εναλλακτών θερμότητας τα θερμά ρεύματα της δεύτερης ζώνης, θερμαίνουν τα κρύα ρεύματα της πρώτης. Ωστόσο η ηλεκτρόλυση όντας ενδόθερμη αντίδραση, πιθανά χρειάζεται και εξωτερικά θερμικά φορτία από θερμά ρευστά ή ηλεκτρικές θερμάστρες [48].

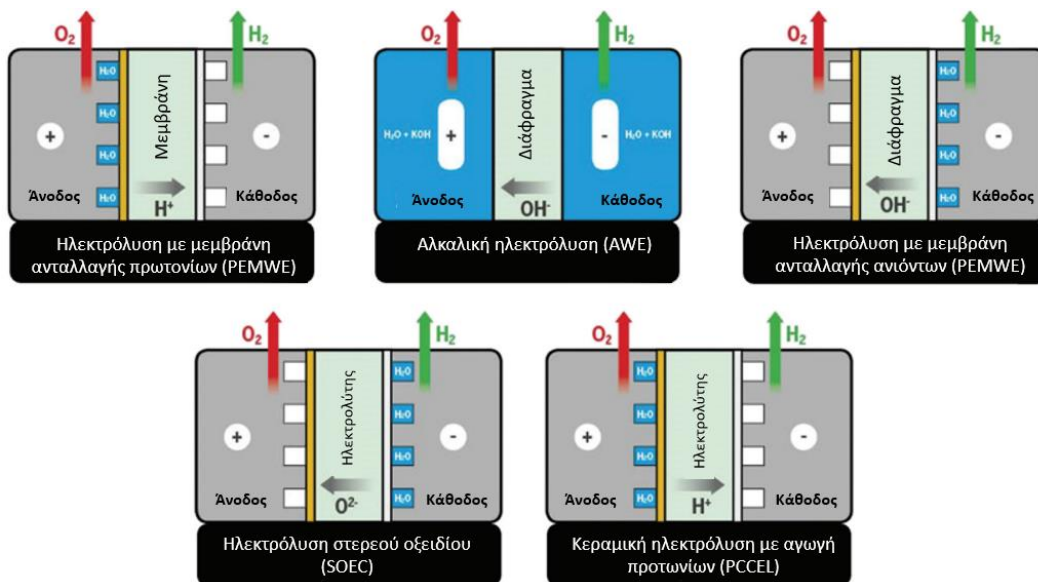
- Κεραμική Ηλεκτρόλυση με Αγωγή Πρωτονίων

Σε αυτήν την περίπτωση υδρατμός τροφοδοτείται στην πλευρά του ηλεκτροδίου οξυγόνου (άνοδος) και το καθαρό H₂ είναι που παράγεται στην κάθοδο (χωρίς αραίωση με υδρατμούς). Η κάθοδος τόσο σε ένα SOEC όσο και σε ένα PCCEL τυπικά αποτελείται από νικέλιο (Ni)-σε-οξείδιο (κεραμικό). Εφόσον οι υδρατμοί τροφοδοτούνται στην άνοδο, αναμένεται να αποφευχθεί η οξείδωση του νικελίου (Ni) και η μη αναστρέψιμη

συσσωμάτωση στην κάθοδο. Επιπλέον, οι ενδιάμεσες θερμοκρασίες λειτουργίας ενός PCCEL (περίπου 500 °C) προσφέρουν οικονομικά πλεονεκτήματα:

- i. Η ενέργεια για την ηλεκτρόλυση του νερού μειώνεται όσο αυξάνεται η θερμοκρασία λειτουργίας, καθώς ένα σημαντικό μέρος της ενέργειας που παρέχεται είναι με τη μορφή θερμικής ενέργειας.
- ii. Τα ζητήματα αργής κινητικής σε χαμηλές θερμοκρασίες αντισταθμίζονται από την ανυψωμένη θερμοκρασία λειτουργίας.

Επομένως, τα PCCEL επιτρέπουν την ηλεκτρόλυση νερού με υψηλότερη απόδοση από την ηλεκτρόλυση χαμηλής θερμοκρασίας. Παρόλο που η πρώτη επίδειξη της τεχνολογίας PCCEL αναφέρθηκε το 1981, η ανάπτυξή της έχει επιβραδυνθεί λόγω της τεχνικής δυσκολίας που σχετίζεται με την κατασκευή της διπλής στρώσης στη διάταξη του λεπτού και πυκνού ηλεκτρολύτη/πυρήνα ηλεκτροδίου με πόρους. Επίσης, υποφέρουν από τις ίδιες κακές θερμομηχανικές ιδιότητες με το SOEC [49].



Εικόνα 1-8 Σχηματική αναπαράσταση των πέντε βασικών τύπων ηλεκτρόλυσης [48].

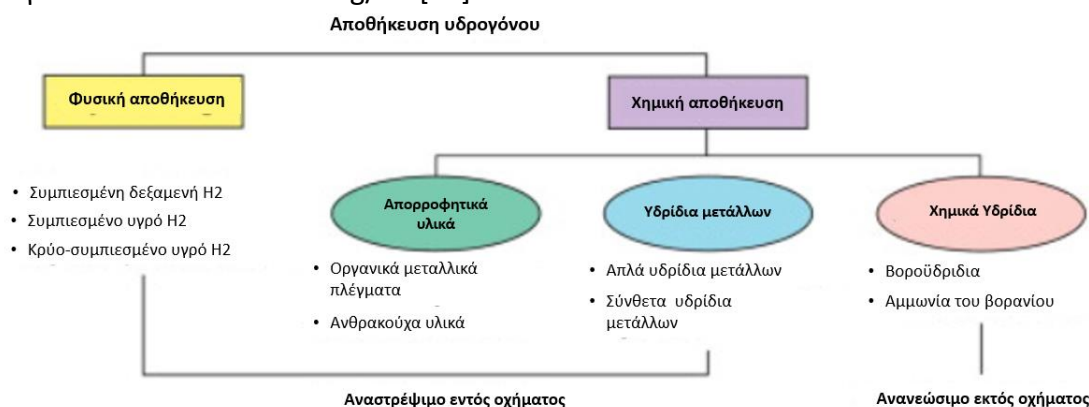
1.6.3 Αποθήκευση Υδρογόνου

Η αποθήκευση υδρογόνου αποτελεί σημαντική πρόκληση. Όντας το ελαφρύτερο μόριο, το αέριο υδρογόνο έχει πολύ χαμηλή πυκνότητα, 1 kg αερίου υδρογόνου καταλαμβάνει πάνω από 11 m³ σε θερμοκρασία δωματίου και ατμοσφαιρική πίεση. Όστε να είναι οικονομικά βιώσιμη η αποθήκευση του πρέπει να αυξηθεί η πυκνότητά του. Αποθηκεύεται είτε σε αέρια είτε σε υγρή φάση.

Ένα σύστημα αποθήκευσης συμπιεσμένου αερίου υδρογόνου έχει δύο κύρια στοιχεία: το μέρος της αποθήκευσης και τους συμπιεστές που απαιτούνται για την επίτευξη της πίεσης αποθήκευσης. Λόγω φυσικών ιδιοτήτων του υδρογόνου αλλά και για οικονομικούς λόγους οι πιέσεις αποθήκευσης συνήθως δεν υπερβαίνουν τα 100 bar υπέργεια και τα 200 bar σε

υπόγειες μονάδες αποθήκευσης. Σε πίεση 100 bar και θερμοκρασία 20° C η πυκνότητα του υδρογόνου είναι περίπου 7.8 kg/m³. Στα αυτοκίνητα το υδρογόνο αποθηκεύεται σε πιέσεις 350-700 bar [50].

Ο πιο συνηθισμένος τρόπος αποθήκευσης υδρογόνου σε υγρή μορφή, είναι η ψύξη του σε κρυογονικές θερμοκρασίες (-253 °C). Άλλες επιλογές περιλαμβάνουν την αποθήκευση υδρογόνου ως συστατικού σε άλλα υγρά, όπως σε διαλύματα NaBH₄, επαναφορτιζόμενα οργανικά υγρά ή άνυδρη αμμωνία NH₃ (Εικόνα 1-9). Η πυκνότητα του κορεσμένου υγρού υδρογόνου σε 1 bar είναι 70 kg/m³ [30].



Εικόνα 1-9 Μέθοδοι αποθήκευσης υδρογόνου [51].

1.7 Διοξείδιο του Άνθρακα

Το CO₂ είναι ένα από τα κύρια αέρια του θερμοκηπίου που προκαλεί την υπερθέρμανση του πλανήτη, οδηγώντας σε παγκόσμιες επιζήμιες επιπτώσεις στο περιβάλλον, την οικονομία και την κοινωνία στο σύνολό της. Επίσης το διοξείδιο του άνθρακα που βρίσκεται στην ατμόσφαιρα διαλύεται στις θάλασσες αντιδρώντας με τα μόρια του νερού, παράγοντας ανθρακικό οξύ και μειώνοντας το pH του ωκεανού (αυξάνοντας την οξύτητά του). Η δέσμευση άνθρακα θεωρείται σημαντική και αποτελεσματική προσέγγιση για τη μείωση των εκπομπών CO₂ [2]. Το 2019, περίπου το 34 % (20 Gt CO₂-eq) των συνολικών καθαρών ανθρωπογενών εκπομπών GHG προήλθε από τον τομέα της παραγωγής ενέργειας, το 24 % (14 Gt CO₂-eq) από τη βιομηχανία, το 22 % (13 Gt CO₂-eq) από τη γεωργία, τη δασοκομία και άλλες χρήσεις γης, το 15 % (8.7 Gt CO₂-eq) από τις μεταφορές και το 6 % (3.3 Gt CO₂-eq) από τα κτίρια. Εάν οι εκπομπές από την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και θερμότητας αποδίδονταν στους τομείς που χρησιμοποιούν την τελική ενέργεια, το 90 % αυτών των έμμεσων εκπομπών κατανέμεται στους τομείς της βιομηχανίας και των κτιρίων, αυξάνοντας τα σχετικά μερίδια εκπομπών GHG τους από 24 % σε 34 % και από 6 % σε 16 %, αντίστοιχα [52].

1.7.1 Δέσμευση Διοξειδίου του Άνθρακα

Η δέσμευση του CO₂ μπορεί να εφαρμοστεί πολύ αποτελεσματικά σε διεργασίες που εκπέμπουν μεγάλες ποσότητες CO₂, όπως σε μονάδες παραγωγής ενέργειας, αλλά και σε εργοστάσια παραγωγής χάλυβα, τσιμέντου, χαρτιού. Ωστόσο υπάρχει και η μέθοδος

αφαίρεσης CO₂, απευθείας από την ατμόσφαιρα και μόνιμης αποθήκευσης του με σκοπό την μείωση του φαινομένου υπερθέρμανσης του πλανήτη. Υπάρχουν τρεις βασικοί τύποι δέσμευσης CO₂ (Εικόνα 1-10):

- Δέσμευση πριν από την καύση: για δέσμευση CO₂ σε αέριο σύνθεσης μετά τη μετατροπή του CO σε CO₂.
- Δέσμευση μετά την καύση: για τη δέσμευση CO₂ στα καυσαέρια όταν το καύσιμο έχει καεί πλήρως με αέρα.
- Δέσμευση σε καύση με οξυγόνο: συνίσταται σε καύση με οξυγόνο με ανακύκλωση καυσαερίων (επομένως, που αποτελείται κυρίως από CO₂ και νερό) και καθαρισμό της ροής CO₂, για την εξάλειψη των μη συμπτυκνώσιμων αερίων [53].

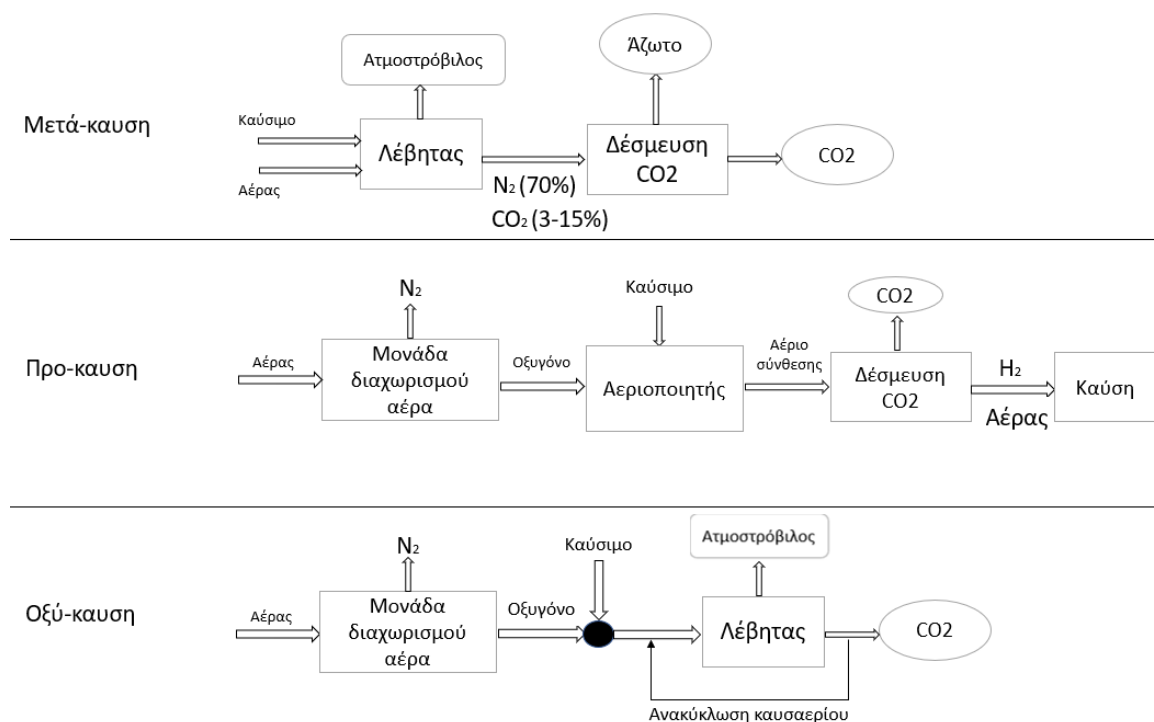
Οι τεχνολογίες δέσμευσης του CO₂ πριν από την καύση, μετατρέπουν το καύσιμο σε αέριο μίγμα υδρογόνου και CO₂. Το υδρογόνο διαχωρίζεται και μπορεί να καεί χωρίς να παράγει CO₂. Το CO₂ μπορεί στη συνέχεια να συμπιεστεί για μεταφορά και αποθήκευση. Η διαδικασία μετατροπής του καυσίμου που απαιτείται για την δέσμευση του CO₂ πριν από την καύση είναι περιπλοκότερη από τη διαδικασία δέσμευσης του CO₂ μετά από την καύση, καθιστώντας την τεχνολογία πιο δύσκολη στην εφαρμογή [54].

Η δέσμευση CO₂ από καυσαέρια που παράγονται από την καύση ορυκτών καυσίμων και βιομάζας στον αέρα αναφέρεται ως δέσμευση μετά-καύσης. Αντί να απορρίπτονται απευθείας στην ατμόσφαιρα, τα καυσαέρια διέρχονται μέσω συσκευής που χωρίζει το μεγαλύτερο μέρος CO₂. Το CO₂ τροφοδοτείται σε μια δεξαμενή αποθήκευσης και τα υπόλοιπα καυσαέρια απορρίπτονται στην ατμόσφαιρα. Για την δέσμευση χρησιμοποιείται διαδικασία χημικής απορρόφησης [55].

Η δέσμευση του CO₂ σε καύση με οξυγόνο αποτελείται γενικά από τις ακόλουθες κύριες μονάδες:

- Μονάδα Διαχωρισμού Αέρα (ΜΔΑ, Air Separation Unit – ASU) – παραγωγή οξυγόνου
- Λέβητας ή ατμοστρόβιλος – καύση καυσίμου & παραγωγή θερμότητας.
- Μονάδα Επεξεργασίας Καυσαερίων – Σύστημα καθαρισμού καυσαερίων ή ποιοτικού ελέγχου αερίων
- Μονάδα Επεξεργασίας CO₂ (CPU) – τελικός καθαρισμός του CO₂ για μεταφορά και αποθήκευση.

Οι διαδικασίες καύσης με οξυγόνο, χρησιμοποιούν οξυγόνο αντί αέρα για την καύση καυσίμου. Με αυτόν το τρόπο παράγονται καυσαέρια που είναι κυρίως υδρατμοί και CO₂ που μπορούν εύκολα να διαχωριστούν για να παράξουν ρεύμα CO₂ υψηλής καθαρότητας [54].

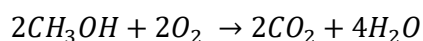


Εικόνα 1-10 Σχηματική αναπαράσταση των μεθόδων δέσμευσης CO₂ [56].

1.8 Μεθανόλη

1.8.1 Γενικά

Η μεθανόλη ή μεθυλική αλκοόλη είναι μια οργανική χημική ουσία και η απλούστερη αλειφατική αλκοόλη, με τύπο CH₃OH. Σε κανονικές συνθήκες περιβάλλοντος είναι ένα ελαφρύ, πτητικό, άχρωμο, εύφλεκτο υγρό με χαρακτηριστική αλκοολική οσμή παρόμοια με αυτή της αιθανόλης. Σήμερα, η μεθανόλη παράγεται κυρίως βιομηχανικά με υδρογόνωση του μονοξειδίου του άνθρακα. Η ανώτατη θερμογόνος ικανότητα της μεθανόλης είναι τα 22.9 MJ/kg και η κατώτατη τα 20.1 MJ/kg. Έχει πυκνότητα 0.794 g/cm³ και σημείο βρασμού τους 65 °C. Η μεθανόλη καίγεται παρουσία αέρα σχηματίζοντας διοξείδιο του άνθρακα και νερό σύμφωνα με την χημική Εξίσωση 1-8 [57].



Εξίσωση 1-8

Πλεονεκτήματα μεθανόλης ως καυσίμου [58]:

- Υψηλή αντοχή σε κρουστική καύση (υψηλός αριθμός οκτανίων), υψηλότεροι λόγοι συμπίεσης μπορούν να εφαρμοστούν, με αποτέλεσμα πολύ υψηλή απόδοση του κινητήρα
- Καθαρότερη (χωρίς αιθάλη) καύση
- Χαμηλότερο όριο αναφλεξιμότητας και κατά συνέπεια καλύτερη οικονομία και χαμηλότερες εκπομπές NO_x, υδρογονανθράκων (HC) και μονοξειδίου του άνθρακα (CO)

- Υψηλότερη θερμότητα εξάτμισης, με αποτέλεσμα υψηλότερη πτώση της θερμοκρασίας το ακροφύσιο Venturi του καρμπυρατέρ και άρα υψηλότερη ογκομετρική απόδοση
- Χαμηλότερη θερμοκρασία καύσης, με αποτέλεσμα χαμηλότερες εκπομπές NOx
- Υψηλότερη πτητικότητα, με αποτέλεσμα καλύτερη κατανομή του αέρα-καυσίμου μεταξύ των κυλίνδρων

Μειονεκτήματα μεθανόλης ως καυσίμου [58]:

- Κακές ιδιότητες αυτανάφλεξης (μεγάλη καθυστέρηση ανάφλεξης)
- Κακή αναμειξιμότητα με ορυκτά καύσιμα (ειδικά με πετρέλαιο ντίζελ), παρουσία νερού
- Δυσκολία στην εκκίνηση κρύου κινητήρα
- Διάβρωση και χημική αποδόμηση υλικών
- Κακές ιδιότητες λίπανσης που οφείλονται στο χαμηλό ιξώδες
- Υποβάθμιση των λιπαντικών ιδιοτήτων λαδιού

1.8.2 Αγορά

Το 2022, η παραγωγή μεθανόλης εκτιμάται ότι θα φτάσει τους 111 εκατομμύρια μετρικούς τόνους, αύξηση σχεδόν 4 % σε σύγκριση με το προηγούμενο έτος. Η παραγωγή μεθανόλης έχει σχεδόν διπλασιαστεί την τελευταία δεκαετία, με μεγάλο μερίδιο αυτής της ανάπτυξης να βρίσκεται στην Κίνα. Σύμφωνα με τις τρέχουσες τάσεις, η παραγωγή μπορεί να αυξηθεί σε 500 Mt ετησίως έως το 2050, απελευθερώνοντας 1.5 Gt CO₂ ετησίως εάν προέρχονται αποκλειστικά από ορυκτά καύσιμα. Περίπου το ένα τρίτο της παγκόσμιας ζήτησης μεθανόλης (συμπεριλαμβανομένων των παραγώγων της) είναι για εφαρμογές καυσίμων [59].

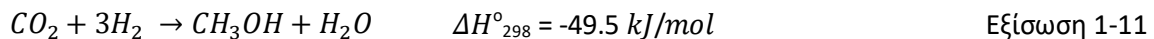
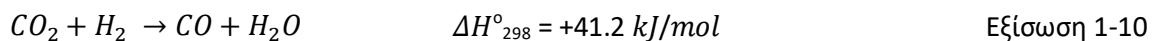
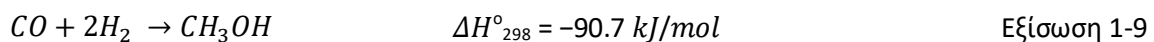
1.8.3 Παραγωγή Μεθανόλης

Ανάλογα με την πρώτη ύλη και τις σχετικές εκπομπές, η μεθανόλη μπορεί να κατηγοριοποιηθεί ως υψηλής ή χαμηλής έντασης άνθρακα. Μεθανόλη που παράγεται από άνθρακα και φυσικό αέριο χωρίς δέσμευση άνθρακα ή χρησιμοποίηση ενέργειας που προέρχεται από ανανεώσιμες πηγές, θεωρείται γενικά υψηλής έντασης άνθρακα (καφέ και γκρι μεθανόλη). Μεθανόλη η οποία παράγεται είτε με τη χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας σε διάφορες μορφές, είτε από ορυκτά καύσιμα με δέσμευση άνθρακα ή από συνδυασμό αυτών θεωρείται ότι έχει χαμηλότερη ένταση άνθρακα (χαμηλού άνθρακα μεθανόλη, μπλε και πράσινη μεθανόλη. Η μεθανόλη μπορεί επίσης να ταξινομηθεί ως ανανεώσιμη και μη ανανεώσιμη. Για να χαρακτηριστεί ως ανανεώσιμη, όλες οι πρώτες ύλες για την παραγωγή της μεθανόλης πρέπει να είναι ανανεώσιμης πηγής (βιομάζα, ηλιακή, αιολική, υδροηλεκτρική, γεωθερμία κ.λπ.) [59].

Η πράσινη μεθανόλη χωρίζεται σε δύο κατηγορίες, την συνθετική μεθανόλη (eMethanol) και την βιομεθανόλη. Η συνθετική μεθανόλη, παράγεται χρησιμοποιώντας CO₂ το οποίο έχει δεσμευτεί από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και πράσινο υδρογόνο. Από την άλλη, η

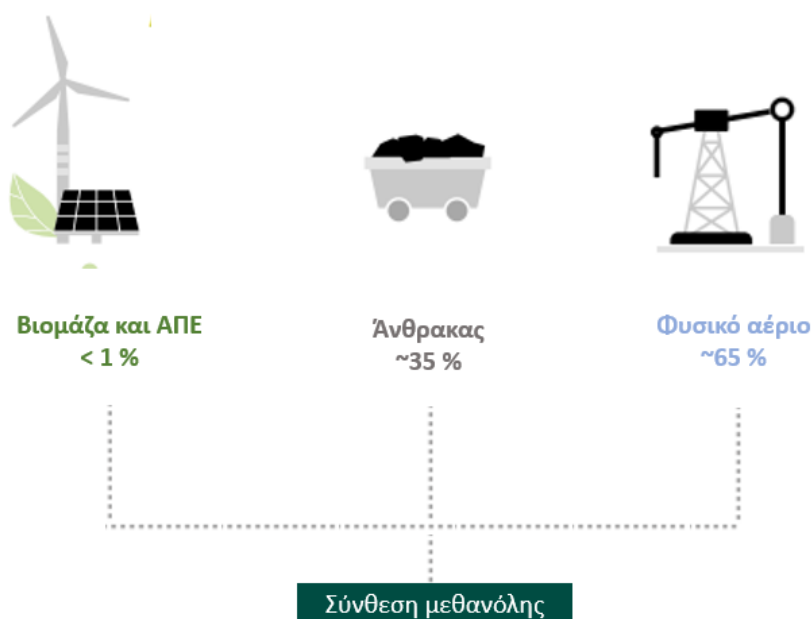
βιομεθανόλη παράγεται από βιομάζα όπως ξύλο, γεωργικά απόβλητα ή οικιακά απορρίμματα. Η διαδικασία παραγωγής της βιομεθανόλης περιλαμβάνει την αερίωση ή τη ζύμωση της βιομάζας για την παραγωγή ενός αέριου το οποίο αποτελείται κυρίως από μεθάνιο και διοξείδιο του άνθρακα. Το αέριο αυτό στη συνέχεια διαχωρίζεται και καθαρίζεται για να παραχθεί βιομεθανόλη. Τόσο η συνθετική μεθανόλη όσο και η βιομεθανόλη εξετάζονται ως εναλλακτικές πηγές καυσίμων που μπορούν να μειώσουν την εξάρτηση από τα συμβατικά καύσιμα και να συμβάλουν στην προστασία του περιβάλλοντος. Αυτή τη στιγμή μόνο το 0.2 % της παραγόμενης μεθανόλης είναι πράσινη. Ενώ το 65 % βασίζεται στην αναμόρφωση μεθανίου, όντας γκρι και το υπόλοιπο 35 % περίπου, παράγεται με την αεριοποίηση άνθρακα, όντας καφέ (Εικόνα 1-11) [59].

Το πλεονέκτημα της παραγωγής μεθανόλης από CO₂ και H₂ (Εξίσωση 1-9, Εξίσωση 1-10, Εξίσωση 1-11), είναι ότι το προϊόν το οποίο προκύπτει είναι υγρό και μπορεί με ευκολία να μεταφερθεί και να αποθηκευτεί. Επίσης μπορεί να αναμιχθεί με βενζίνη, χάρη στον υψηλό αριθμό οκτανίων της. Η υγρή μεθανόλη είναι πιο ασφαλής στην μεταφορά σε σχέση με το αέριο υδρογόνο και το υπάρχον δίκτυο έχει τη δυνατότητα να καλύψει την μεταφορά της. Επίσης έχει μεγαλύτερη ενεργειακή πυκνότητα, το οποίο είναι σημαντικό και για την αποθήκευσή της.



Η διαδικασία μετατροπής του διοξειδίου του άνθρακα σε μεθανόλη είναι μικρό μέρος της παγκόσμιας παραγωγής μεθανόλης. Επί του παρόντος, το μεγαλύτερο μέρος της μεθανόλης στον κόσμο παράγεται από φυσικό αέριο μέσω καταλυτικής σύνθεσης. Η παραγωγή μεθανόλης με βάση το αέριο σύνθεσης δημιουργεί αναπόφευκτα μεγάλες ποσότητες διοξειδίου του άνθρακα [3]. Ωστόσο, το τελευταίο διάστημα, πολλές μελέτες εστιάζουν στην περαιτέρω ανάπτυξη της διαδικασίας παραγωγής μεθανόλης από διοξείδιο του άνθρακα [4].

Το 2011 η Διεθνής Ανακύκλωση του Άνθρακα (Carbon Recycling International - CRI), ξεκίνησε την παραγωγή πράσινης μεθανόλης, συνδυάζοντας τεχνολογίες δέσμευσης CO₂ (σε γεωθερμικό σταθμό) σε μεγάλη κλίμακα για πρώτη φορά, ξεκινώντας με παραγωγή 1300 Mt MeOH /έτος και φτάνοντας ύστερα από 4 χρόνια τους 4 Mt MeOH /έτος. Με την παραγωγή αυτή αποφεύγονται 5.5 MtCO₂ /έτος. Ανεξάρτητη ελεγκτική αρχή πιστοποίησε πως η μονάδα δύναται να μειώσει τις εκπομπές CO₂ κατά 90 % σε σχέση με την παραγωγή ίδιας ποσότητας ορυκτών καυσίμων [60].



Εικόνα 1-11 Παραγωγή μεθανόλης [59].

Υπάρχουν θερμοδυναμικοί περιορισμοί στην αντίδραση παραγωγής μεθανόλης από διοξείδιο του άνθρακα και υδρογόνο μετά τους 200 °C, για αυτό το λόγο γίνονται έρευνες ώστε να βρεθεί καταλύτης ο οποίος είναι ενεργός σε χαμηλές θερμοκρασίες. Έχουν προταθεί καταλύτες όπως Pd/Ir₂O₃, Pd/ZnO/Al₂O₃. Η παραγωγή μεθανόλης ανά πέρασμα παρουσιάζει μέγιστο στο 20 %. Με κατάλληλο σχεδιασμό αντιδραστήρα είναι δυνατό η διαδικασία να επιτύχει υψηλά ποσοστά μετατροπής σε μεθανόλη, αυτό γίνεται με ενδιάμεση συμπύκνωση και με πολλαπλές βαθμίδες αντιδραστήρα.

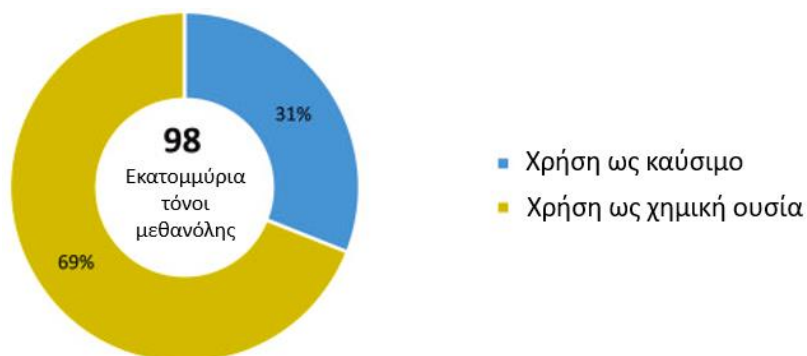
Το Ινστιτούτο Μεθανόλης (MI) παρακολουθεί περισσότερα από 80 έργα ανανεώσιμης μεθανόλης σε όλο τον κόσμο που εκτιμάται ότι θα παράγουν περισσότερους από οκτώ εκατομμύρια μετρικούς τόνους ανά έτος, βιομεθανόλης και e-μεθανόλης έως το 2027 [61]. Πέρα από τον αυξανόμενο αριθμό των έργων ανανεώσιμης μεθανόλης, υπάρχουν σαφείς ενδείξεις ότι οι πωλήσεις παραγωγής για εργοστάσια βιομεθανόλης και e-μεθανόλης αυξάνονται. Με τις συνεχείς εξελίξεις στην τεχνολογία και την αυξημένη κυβερνητική υποστήριξη, αναμένεται ότι η χωρητικότητα των ατομικών ανανεώσιμων εργοστασίων θα αυξηθεί από 5.000-10.000 μετρικούς τόνους μεθανόλης ανά έτος σε 50.000-250.000 μετρικούς τόνους ανά έτος ή και περισσότερο μέσα στα επόμενα πέντε χρόνια δηλαδή έως το 2027 [61].

Το εργοστάσιο με την υψηλότερη παραγωγή πράσινης μεθανόλης μέχρι το 2023 ανήκει στην Διεθνής Ανακύκλωση του Άνθρακα (CRI) και βρίσκεται στην Anyang στην Κίνα. Η ετήσια παραγωγή μεθανόλης ανέρχεται στους 110.000 tones. Η μάζα της μονάδας ανέρχεται στους 84 τόνους, ενώ η στήλη απόσταξης έχει 70 μέτρα ύψος [62].

1.8.4 Χρήσεις Μεθανόλης

Η μεθανόλη χρησιμοποιείται ως εναλλακτικό καύσιμο σε μηχανές εσωτερικής καύσης μηχανές και κυψελίδες καυσίμου. Υπάρχει η δυνατότητα ανάμιξης με βενζίνη αλλά και η χρήση της ως αυτόνομο καύσιμο. Χρησιμοποιείται επίσης ως καύσιμο σε βιομηχανικούς λέβητες, θερμαντικά συστήματα και κουζίνες. Οι βασικές εφαρμογές είναι οι εξής (Εικόνα 1-12):

- Χημική Βιομηχανία: Η μεθανόλη χρησιμοποιείται ως βασικό στοιχείο για την παραγωγή διάφορων χημικών και ενδιάμεσων χημικών προϊόντων. Για παράδειγμα για την παραγωγή φορμαλδεΐδης, οξικού οξέος, διμεθυλαιθέρα (DME) και διάφορων διαλυτών.
- Παραγωγή Φορμαλδεΐδης: Μία από τις βασικότερες χρήσεις της μεθανόλης είναι η παραγωγή φορμαλδεΐδης, η οποία χρησιμοποιείται στην παραγωγή ρητινών, πλαστικών, υφασμάτων και επικαλύψεων.
- Ολεφίνες και Παράγωγα: Η μεθανόλη μπορεί να μετατραπεί σε ολεφίνες (αιθυλένιο και προπυλένιο) μέσω μιας διαδικασίας που ονομάζεται "μεθανόλη προς ολεφίνες" (Methanol to Olefins - MTO). Αυτές οι ολεφίνες χρησιμοποιούνται ως πρώτη ύλη για την παραγωγή πολυμερών, πλαστικών και άλλων χημικών προϊόντων.
- Παραγωγή Βιοντίζελ: Η μεθανόλη χρησιμοποιείται στη διαδικασία μετεστεροποίησης, για την παραγωγή βιοντίζελ από φυτικά έλαια ή ζωικά λίπη.
- Φαρμακευτικά προϊόντα: Η μεθανόλη χρησιμοποιείται ως διαλύτης στη φαρμακοβιομηχανία, για την εξαγωγή και τον καθαρισμό ενεργών φαρμακευτικών συστατικών.



Εικόνα 1-12 Ποσοστά χρήσης της μεθανόλης ως καυσίμου και ως χημικής ουσίας [63].

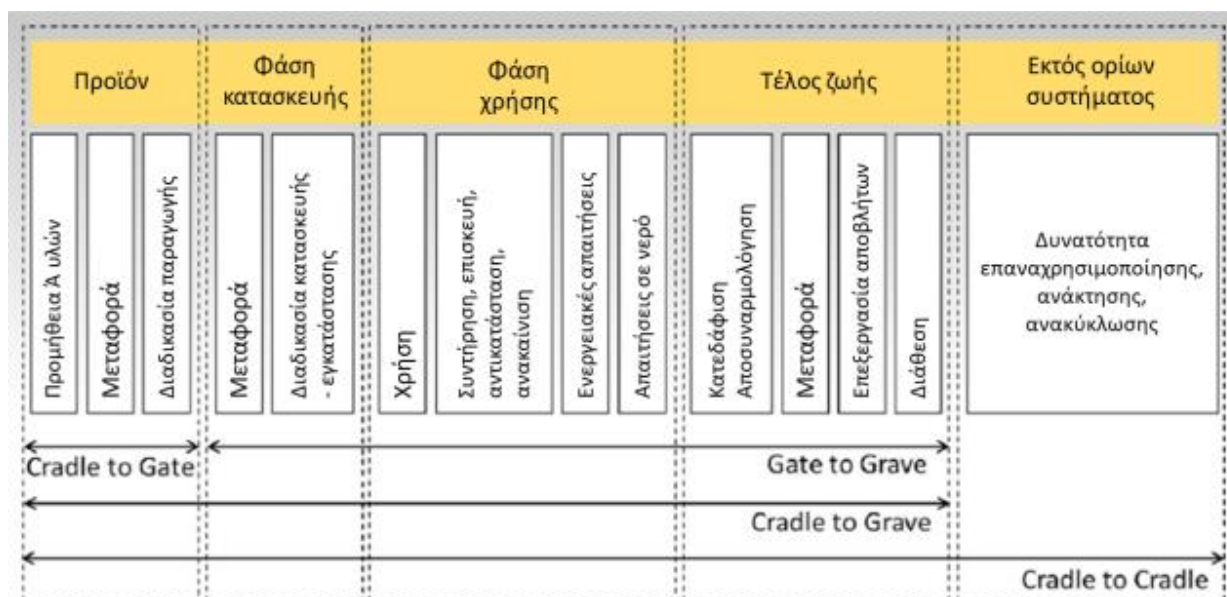
2. Ανάλυση Κύκλου Ζωής

2.1 Γενικά

Ο στόχος για μείωση των εκπεμπόμενων ρύπων, δημιούργησε την ανάγκη δημιουργίας εργαλείων τα οποία θα υπολόγιζαν τον αντίκτυπο των διάφορων διεργασιών στο περιβάλλον. Η ανάλυση κύκλου ζωής (AKZ, LCA) είναι μια μέθοδος ποσοτικοποίησης των περιβαλλοντικών επιπτώσεων που σχετίζονται με ένα δεδομένο προϊόν. Στην AKZ, οι ερευνητές δημιουργούν έναν κατάλογο των πόρων που χρησιμοποιούνται και των ρύπων που παράγονται στην παραγωγή, χρήση και εναπόθεση των προϊόντων. Έπειτα μια εκτίμηση επιπτώσεων υπολογίζει τις τελικές επιπτώσεις του προϊόντος στην ανθρώπινη υγεία, τη λειτουργία του οικοσυστήματος και την εξάντληση των φυσικών πόρων.

Θεωρητικά η AKZ εμπεριέχει όλες τις εισροές και εκροές του συστήματος και περιλαμβάνει κάθε λεπτομέρεια των διεργασιών, ωστόσο η ενδελέχεια με την οποία θα γίνει η μελέτη καθορίζεται από την επιθυμητή ακρίβεια των αποτελεσμάτων. Έπειτα το σύστημα δύναται να οριοθετηθεί με 4 διαφορετικούς τρόπους (Εικόνα 2-1). Η επιλογή των ορίων εξαρτάται από το επιθυμητό αποτέλεσμα και το πεδίο εφαρμογής της μελέτης.

- Cradle to Gate: Συμπεριλαμβάνει όλες τις διεργασίες από την απόκτηση των πρώτων υλών έως την φάση παραγωγής του προϊόντος.
- Gate to Gate: Συμπεριλαμβάνει όλες τις διαδικασίες από την μεταφορά έως την τελική χρήση του προϊόντος.
- Gate to Grave: Συμπεριλαμβάνει όλα τα στάδια ύστερα από την παραγωγή του προϊόντος μέχρι και τις φάσεις τέλους ζωής του.
- Cradle to Grave: Συμπεριλαμβάνει όλες τις διαδικασίες από την εξαγωγή των πρώτων υλών μέχρι και την τελική μέθοδο διάθεση του προϊόντος, με όλα τα ενδιάμεσα στάδια. Προφανώς είναι η πιο ολοκληρωμένη μελέτη που μπορεί να διεξαχθεί.



Εικόνα 2-1 Συμπεριλαμβανόμενα τμήματα ανάλογα του εύρους της ΑΚΖ [64].

Υπάρχουν τέσσερις φάσεις σε μια ΑΚΖ (Εικόνα 2-2).

1. Ο ορισμός του στόχου και του εύρους μελέτης

Ο ορισμός του στόχου απαντά στα εξής ερωτήματα : Γιατί πρόκειται να εκτελεσθεί η μελέτη ΑΚΖ, ποιο είναι το κοινό που θα την διαβάσει και ποιο είναι το προϊόν της μελέτης. Ο ορισμός του εύρους μελέτης είναι πολύ πιο περίπλοκος και περιλαμβάνει τον καθορισμό των ορίων του συστήματος, την λειτουργική μονάδα, τις παραμέτρους των δεδομένων, τον στόχο για την ποιότητα των δεδομένων και τις μεθόδους εκτίμησης επιπτώσεων, μεταξύ άλλων.

2. Η απογραφή κύκλου ζωής (LCI)

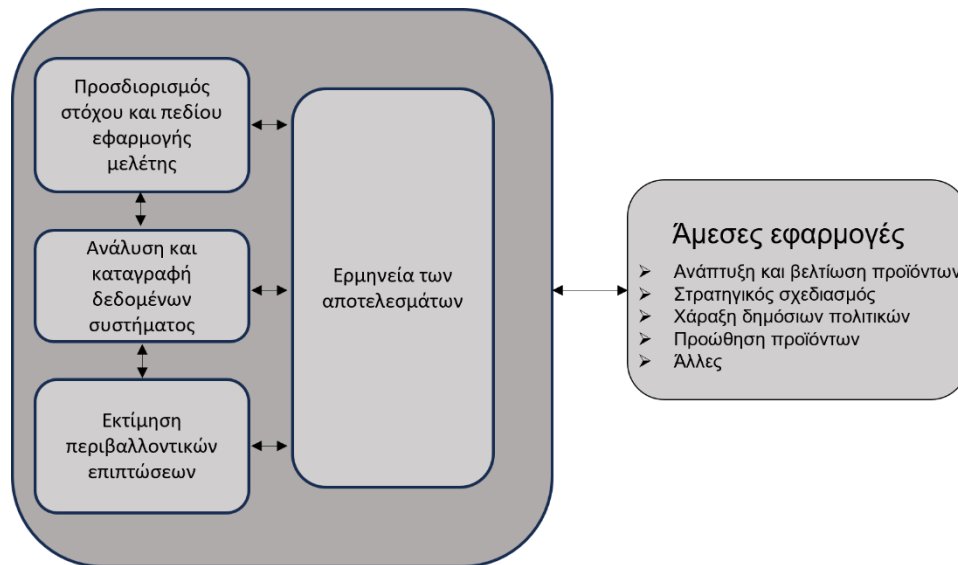
Μόλις καθοριστεί το όριο του συστήματος προϊόντων, γίνεται η εισαγωγή των υλικών και των απαιτούμενων ποσών ενέργειας σε κάθε διεργασία (όπως προϊόντα, παραπροϊόντα και εκπομπές) και τα αποτελέσματα από κάθε διεργασία συλλέγονται και στη συνέχεια κανονικοποιούνται σε μονάδα μάζας ή ενέργειας. Τελικά το αποτέλεσμα του κύκλου ζωής υπολογίζεται αθροίζοντας όλες τις συνεισφορές εισροών και εκροών όλων των διεργασιών. Έτσι το LCI εκτιμά το ποσοτικό περιβαλλοντικό φορτίο ενός προϊόντος σε ολόκληρο τον κύκλο ζωής του.

3. Η εκτίμηση επιπτώσεων στον κύκλο ζωής (LCIA)

Σε αυτό το στάδιο οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις που προκύπτουν από τα περιβαλλοντικά φορτία ενός προϊόντος αξιολογούνται. Για να ποσοτικοποιηθεί ο αντίκτυπος, επιλέγονται οι κατηγορίες επιπτώσεων και υπολογίζεται ο περιβαλλοντικός αντίκτυπος σε κάθε κατηγορία.

4. Η ερμηνεία των αποτελεσμάτων

Αποτελεί την τελευταία φάση σε μια μελέτη ΑΚΖ, είναι η ερμηνεία των αποτελεσμάτων του κύκλου ζωής, όπου εντοπίζονται περιβαλλοντικά σημαντικά ζητήματα και τα αποτελέσματα της ΑΚΖ αξιολογούνται σε σχέση με την πληρότητα, την ευαισθησία και τη συνέπεια. Επιπλέον επεξεργασία των επιπτώσεων μπορεί να γίνει με κανονικοποίηση και στάθμιση. Τέλος, τα συμπεράσματα, οι συστάσεις και η υποβολή εκθέσεων αποτελούν επίσης μέρος αυτής της φάσης [65].



Εικόνα 2-2 Σχηματική αναπαράσταση των φάσεων της ΑΚΖ

2.2 Προσδιορισμός Στόχου και Εύρους

Όπως αναφέρθηκε, το πρώτο στάδιο σε κάθε μελέτη ΑΚΖ είναι ο καθορισμός του στόχου και του πεδίου εφαρμογής της μελέτης. Αρχικά αναλύεται η προοριζόμενη εφαρμογή των αποτελεσμάτων, η αιτία πραγματοποίησης της μελέτης και το κοινό στο οποίο απευθύνεται, καθώς και αν θα υπάρξει σύγκριση μεταξύ προϊόντων ή διαδικασιών και αν τα αποτελέσματα θα δημοσιευθούν. Όσον αφορά το πεδίο εφαρμογής της μελέτης, γίνεται μία περιγραφή των περιεχομένων της μελέτης, επεξήγηση του πως θα πραγματοποιηθούν οι φάσεις της και ο τρόπος που θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα.

Σε αυτό το στάδιο ορίζονται μερικές από τις πιο σημαντικές παραμέτρους για την διεξαγωγή της μελέτης. Μερικές από αυτές είναι οι εξής:

- Το υπό εξέταση σύστημα προϊόντων (product system) και η λειτουργική μονάδα (functional unit).

Σύστημα προϊόντων: περιγραφή των προϊόντων καθώς και όλες οι διαδικασίες. Αυτό περιλαμβάνει την κατασκευή εξαρτημάτων και υλικών, τη διανομή, χρήση και απόρριψη του προϊόντος. Επιπλέον, όλες οι μεταφορές και η ενέργεια που χρησιμοποιείται, όχι μόνο για τα προϊόντα αλλά και για όλα τα στοιχεία του συστήματος προϊόντων, θα πρέπει να

συμπεριληφθούν. Ύστερα ορίζεται η προβλεπόμενη χρήση και λειτουργία που θα παρέχει το προϊόν. Ύστερα μπορεί να οριστεί η λειτουργική μονάδα η οποία ποσοτικοποιεί την λειτουργία που ορίστηκε προηγουμένως.

- Τα όρια του συστήματος (system boundaries)

Σε αυτό το σημείο ορίζεται το ποιες διεργασίες θα συμπεριληφθούν στο σύστημα προϊόντων. Ιδανικά θα πρέπει να συμπεριληφθούν όλες οι διεργασίες, ωστόσο αυτό δεν είναι εφικτό, ούτε πρακτικό λόγω έλλειψης δεδομένων, υψηλού κόστους και απαιτούμενου χρόνου. Επομένως δεν συμπεριλαμβάνονται διεργασίες οι οποίες έχουν μικρό αντίκτυπο στο τελικό αποτέλεσμα. Ωστόσο αυτό δεν είναι πάντα εύκολο να εκτιμηθεί από πριν και σε αυτό το σημείο υπεισέρχεται η κρίση του ερευνητή. Μία μέθοδος είναι εάν η μάζα ή η ενέργεια που απαιτεί μια διεργασία είναι μικρότερη από ένα ποσοστό τότε αποκόπτεται, εκτός αν έχει υψηλό περιβαλλοντικό αντίκτυπο (τοξικές χημικές ουσίες). Οι πληροφορίες για το προϊόν σχετικά με τα συστατικά του μέρη και τα υλικά των εξαρτημάτων μπορεί να βρεθεί από τον κατάλογο των υλικών (BOM), είτε αποσυναρμολογώντας το προϊόν. Έπειτα σχεδιάζεται ένα δέντρο διαδικασιών του συστήματος προϊόντων, το οποίο αποτελεί την συλλογή των διαδικασιών σε ένα σύστημα προϊόντων, δείχνοντας και την μεταξύ τους σχέση. Κάθε διαδικασία απεικονίζεται με ένα κουτί και η συσχέτιση φαίνεται με βέλη.

- Διαδικασία κατανομής (allocation)

Όταν τα προϊόντα και παραπροϊόντα είναι πολλά, γίνεται κατάλληλος καταμερισμός του αντικτύπου των εισροών και των εκροών των διεργασιών. Η κάθε διεργασία απαιτεί συγκεκριμένους πόρους και ενέργεια, ωστόσο δεν είναι σαφές πάντοτε το σε ποια διεργασία χρησιμοποιήθηκε το καθετί. Για να αντιμετωπιστεί αυτό το πρόβλημα χρησιμοποιούνται οι παρακάτω τεχνικές:

- i. Υποδιαίρεση των διεργασιών σε υποδιεργασίες και επέκταση των ορίων του συστήματος, έτσι ώστε να συμπεριληφθούν όλες οι διεργασίες οι οποίες συνδέονται με τα παραπροϊόντα του συστήματος.
- ii. Κατανομή με κριτήριο τις φυσικές σχέσεις μεταξύ εισόδων και εξόδων.
- iii. Κατανομή με κριτήριο οικονομικές αξίες μεταξύ προϊόντος και/ή παραπροϊόντων, και φυσικές ποσότητες όπως μάζα, όγκος και ενέργεια προϊόντων και/ή υποπροϊόντων.

- Ποιότητα δεδομένων

Σε μια μελέτη AKZ πρέπει να καταβάλλεται η μέγιστη προσπάθεια τα δεδομένα να είναι ακριβή, με μικρά περιθώρια λάθους, ώστε τα συμπεράσματα της μελέτης να είναι έγκυρα και να μπορεί να βασιστεί κάποιος σε αυτά. Κατά τη συλλογή δεδομένων πρέπει να ελέγχεται η ποιότητα αυτών και εάν δεν πληρούνται οι απαιτήσεις ποιότητας, τα δεδομένα θα πρέπει να συλλέγονται ξανά ή οι απαιτήσεις θα πρέπει να τροποποιηθούν [65].

2.3 Κατάλογος Απογραφής Κύκλου Ζωής (LCI)

Κατά τη φάση της απογραφής του κύκλου ζωής, διεξάγεται η πραγματική συλλογή δεδομένων και η μοντελοποίηση του συστήματος (π.χ. προϊόν). Αυτό πρέπει να γίνει σύμφωνα με τον ορισμό του στόχου και τηρούνται οι απαιτήσεις που προκύπτουν από το

εύρος πεδίου εφαρμογής της μελέτης. Τα αποτελέσματα του LCI είναι η είσοδος για την επακόλουθη φάση LCIA. Τα αποτελέσματα της εργασίας LCI, δύναται να αναδιαμορφώσουν τον στόχο και το εύρος πεδίου εφαρμογής.

Συνήθως, η φάση LCI απαιτεί τις υψηλότερες προσπάθειες και πόρους μιας ΑΚΖ: για συλλογή και μοντελοποίηση δεδομένων. Η φάση της απογραφής περιλαμβάνει τη συλλογή των απαιτούμενων δεδομένων για:

- Ροές προς και από διεργασίες:
 - i. Στοιχειώδεις ροές (όπως πόροι και εκπομπές αλλά και άλλες παρεμβάσεις με την οικόσφαιρα, όπως η χρήση γης)
 - ii. Ροές προϊόντων (δηλαδή αγαθά τόσο ως «προϊόντα» μιας διαδικασίας αλλά και ως εισροές/αναλώσιμα) που συνδέουν την αναλυόμενη διαδικασία με άλλες διαδικασίες, και ροές αποβλήτων (τόσο λύματα όσο και στερεά/υγρά απόβλητα) που πρέπει να συνδεθούν με διαδικασίες διαχείρισης αποβλήτων.
 - iii. Άλλες πληροφορίες που προσδιορίζονται στον ορισμό του πεδίου εφαρμογής ως σχετικές για το αναλυόμενο σύστημα. Αυτό περιλαμβάνει στατιστικά δεδομένα (π.χ. δεδομένα μείγματος αγοράς), χαρακτηριστικά διαδικασίας και προϊόντος (π.χ. λειτουργίες και λειτουργικές μονάδες) και όλα τα άλλα δεδομένα και πληροφορίες, εκτός από αυτά που σχετίζονται άμεσα με την εκτίμηση επιπτώσεων.

Να σημειωθεί ο περιορισμός του πεδίου εφαρμογής της προσέγγισης ΑΚΖ σχετίζεται αποκλειστικά τις επιπτώσεις που προκαλούνται από παρεμβάσεις μεταξύ του αναλυόμενου συστήματος και της περιβάλλοντος, και προκαλούνται κατά τη διάρκεια κανονικών αλλά και μη φυσιολογικών συνθηκών λειτουργίας των περιλαμβανόμενων διεργασιών, αλλά εξαιρουμένων των ατυχημάτων, των διαρροών και των συναφών [66].

2.4 Εκτίμηση Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων (LCIA)

Εφόσον έχει υπολογιστεί ο τελικός κατάλογος απογραφής ο οποίος περιέχει πληροφορίες για την χρήση πόρων αλλά όχι για τον αντίκτυπο που αυτοί έχουν στο περιβάλλον, μέσω κάποιων κατηγοριών υπολογίζονται οι επιπτώσεις στο περιβάλλον. Η μεθοδολογία που ακολουθείται είναι η εξής :

- **Επιλογή κατηγοριών επιπτώσεων, δεικτών και μοντέλων χαρακτηρισμού**

Αρχικά γίνεται επιλογή μίας μεθόδου εκτίμησης περιβαλλοντικών επιπτώσεων (π.χ. ReCiPe 2016). Η επιλογή πραγματοποιείται λαμβάνοντας υπόψιν τον σκοπό της μελέτης.

- **Ταξινόμηση**

Η ταξινόμηση απαιτεί την αντιστοίχιση των εισροών και εκροών υλικών/ενέργειας που έχουν απογραφεί στη σχετική κατηγορία επιπτώσεων. Οι κύριες κατηγορίες είναι η κλιματική αλλαγή, η ανθρώπινη υγεία και η εξάντληση φυσικών πόρων [67].

- **Χαρακτηρισμός**

Ο χαρακτηρισμός αναφέρεται στον υπολογισμό του μεγέθους της συνεισφοράς κάθε ταξινομημένης εισροής και εκροής στις αντίστοιχες κατηγορίες επιπτώσεων τους και στη συγκέντρωση των συνεισφορών σε κάθε κατηγορία (Πίνακας 2-1). Αυτό πραγματοποιείται πολλαπλασιάζοντας τις απογραφόμενες τιμές με τον σχετικό συντελεστή χαρακτηρισμού για κάθε κατηγορία επιπτώσεων που εξετάζεται. Οι συντελεστές χαρακτηρισμού είναι συγκεκριμένοι για την κάθε ουσία και πόρο. Αντιπροσωπεύουν το μέγεθος του αντίκτυπου μιας ουσίας σε σχέση με μια κοινή ουσία αναφοράς για μια κατηγορία επιπτώσεων και χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό των δεικτών κατηγορίας σχετικής επίπτωσης [67].

- **Κανονικοποίηση**

Η κανονικοποίηση είναι το βήμα κατά το οποίο τα αποτελέσματα της εκτίμησης επιπτώσεων του κύκλου ζωής πολλαπλασιάζονται με συντελεστές κανονικοποίησης για να υπολογιστεί και να συγκριθεί το μέγεθος της συμβολής τους στις κατηγορίες επιπτώσεων, σε σχέση με μια μονάδα αναφοράς. Ως αποτέλεσμα, λαμβάνονται αδιάστατα, κανονικοποιημένα αποτελέσματα. Αυτά αντικατοπτρίζουν τις επιβαρύνσεις που αποδίδονται σε ένα προϊόν σε σχέση με τη μονάδα αναφοράς. Σύμφωνα με το πρότυπο ISO 14040, η κανονικοποίηση είναι μια προαιρετική φάση. Στο πλαίσιο των μεθόδων PEF / OEF, η φάση κανονικοποίησης είναι υποχρεωτική [67].

- **Ομαδοποίηση (προαιρετική)**

Τα αποτελέσματα τα οποία έχουν προκύψει από την κανονικοποίηση, μπορούν να ενταχθούν σε ομάδες. Η ομαδοποίηση πραγματοποιείται με σκοπό την ευκολότερη ανάγνωση των αποτελεσμάτων και καλύτερη παρουσίαση τους και μπορεί να γίνει με κριτήριο μία ιεραρχία (π.χ. επιπτώσεις χαμηλής, μεσαίας και υψηλής προτεραιότητας), ή εξετάζοντας την επίδραση σε τοπική ή παγκόσμια κλίμακα.

- **Στάθμιση**

Η στάθμιση σκοπεύει την ερμηνεία και την επικοινωνία των αποτελεσμάτων της ανάλυσης. Σε αυτό το βήμα, τα κανονικοποιημένα αποτελέσματα πολλαπλασιάζονται με ένα σύνολο παραγόντων στάθμισης (σε %) που αντικατοπτρίζουν την αντιληπτή σχετική σημασία των εξεταζόμενων κατηγοριών επιπτώσεων στον κύκλο ζωής. Τα σταθμισμένα αποτελέσματα διαφορετικών κατηγοριών επιπτώσεων μπορούν στη συνέχεια να συγκριθούν για να εκτιμηθεί η σχετική σημασία τους. Μπορούν επίσης να συγκεντρωθούν σε κατηγορίες επιπτώσεων του κύκλου ζωής για να ληφθεί μια ενιαία συνολική βαθμολογία. Σύμφωνα με το πρότυπο ISO 14040, η στάθμιση είναι επίσης μια προαιρετική φάση. Στο πλαίσιο των μεθόδων PEF / OEF, η φάση στάθμισης είναι υποχρεωτική [67].

Πίνακας 2-1 Κατηγορίες επιπτώσεων επιπέδου “midpoint” [68]

| Κατηγορία επιπτώσεων | Αγγλική ορολογία | Ισοδύναμη μονάδα |
|--|---|-------------------------------------|
| Δυναμικό θέρμανσης του πλανήτη | Global warming | yr/kg CO ₂ |
| Εξάντληση όζοντος | Stratospheric ozone depletion | yr/kg CFC-11 |
| Ιονίζουσα ακτινοβολία | Ionizing radiation | yr/kBq Cobalt-60 |
| Σχηματισμός όζοντος, ανθρώπινη υγεία | Ozone formation, Human health | yr/kg NO _x |
| Σχηματισμός σωματιδίων | Fine particulate matter formation | yr/kg PM2.5 |
| Σχηματισμός όζοντος, χερσαία οικοσυστήματα | Ozone formation, Terrestrial ecosystems | yr/kg NO _x |
| Οξίνιση χερσαίων οικοσυστημάτων | Terrestrial acidification | yr/kg SO _x |
| Ευτροφισμός οικοσυστημάτων γλυκού νερού | Freshwater eutrophication | yr/kg P |
| Ευτροφισμός θαλάσσιων οικοσυστημάτων | Marine eutrophication | yr/kg N |
| Χερσαία οικοτοξικότητα | Terrestrial ecotoxicity | yr/kg 1.4-dichlorobenzene (1.4-DCB) |
| Οικοτοξικότητα γλυκού νερού | Freshwater ecotoxicity | yr/kg 1.4-dichlorobenzene (1.4-DCB) |
| Θαλάσσια οικοτοξικότητα | Marine ecotoxicity | yr/kg 1.4-dichlorobenzene (1.4-DCB) |
| Ανθρώπινη καρκινογενής οικοτοξικότητα | Human carcinogenic toxicity | yr/kg 1.4-dichlorobenzene (1.4-DCB) |
| Ανθρώπινη μη-καρκινογενής οικοτοξικότητα | Human non-carcinogenic toxicity | yr/kg 1.4-dichlorobenzene (1.4-DCB) |
| Χρήση γης | Land use | m ² *yr |
| Εξάντληση πόρων μεταλλευμάτων | Mineral resource scarcity | kg Copper |
| Εξάντληση ορυκτών πόρων | Fossil resource scarcity | kg oil |
| Χρήση νερού | Water consumption | m ³ |

2.5 Ερμηνεία αποτελεσμάτων

Η ερμηνεία των αποτελεσμάτων μιας μελέτης αξιολόγησης του κύκλου ζωής (LCA) είναι μια υποχρεωτική φάση της ΑΚΖ και αποτελεί βασική πτυχή για την εξαγωγή αξιόπιστων συμπερασμάτων και συστάσεων. Ένας από τους βασικούς στόχους της ΑΚΖ είναι να παρέχει στους υπεύθυνους λήψης αποφάσεων ολοκληρωμένες και κατανοητές πληροφορίες: αυτό επιτυγχάνεται με μια σωστή ερμηνεία του αποτελέσματα μελέτης LCA [69].

Σύμφωνα με τους Laurent et al. [70] τα πέντε βήματα ερμηνείας που ορίζονται στο ISO 14040-44 προτείνεται να αναδιοργανωθούν γύρω από ένα πλαίσιο που προσφέρει μια πιο ρεαλιστική προσέγγιση στην ερμηνεία. Διατάσσει τα βήματα ως εξής:

- Έλεγχος πληρότητας
- Έλεγχος συνέπειας
- Έλεγχος ευαισθησίας
- Εντοπισμός σημαντικών ζητημάτων
- Συμπεράσματα, περιορισμοί και συστάσεις

Έλεγχος πληρότητας

Οι έλεγχοι πληρότητας μπορούν να πραγματοποιηθούν εφαρμόζοντας τόσο ποσοτικές όσο και ποιοτικές προσεγγίσεις και μπορούν να ποσοτικοποιηθούν ως ποσοστό της ροής που μετράται ή εκτιμάται (ISO 14044; ISO, 2006b). Η εκτέλεση ενός ελέγχου πληρότητας είναι εγγενώς παράδοξη, καθώς απαιτεί τη μέτρηση του βαθμού πληρότητας, ενώ η απόλυτη τιμή 100 % δεν μπορεί να γίνει γνωστή. Επομένως, υπάρχει ανάγκη να προσεγγιστεί η 100 % πραγματική τιμή και να καθοριστεί ποιος βαθμός πληρότητας είναι επαρκής για το πλαίσιο μιας μελέτης. Εάν λείπει ή είναι ελλιπής οποιαδήποτε σχετική πληροφορία, θα εξετάζεται, θα καταγράφεται και θα αιτιολογείται η αναγκαιότητα αυτών των πληροφοριών για την ικανοποίηση του στόχου και του πεδίου εφαρμογής της ΑΚΖ. Σε περιπτώσεις όπου οι πληροφορίες που λείπουν θεωρούνται περιττές, ο λόγος για αυτό θα πρέπει να αιτιολογείται και να αναφέρεται με διαφάνεια. Ένας έλεγχος πληρότητας αποτελείται από τις ακόλουθες πτυχές:

- Έλεγχος πληρότητας του καταλόγου απογραφής
- Πληρότητα της εκτίμησης επιπτώσεων, συμπεριλαμβανομένων των δεικτών επιπτώσεων και των παραγόντων χαρακτηρισμού. Επιπλέον, θα πρέπει να ελεγχθεί η πληρότητα των διεργασιών.

Έλεγχος συνέπειας

Η συνέπεια μπορεί να θεωρηθεί ως βασική απαίτηση για όλες τις διαδικασίες μιας ΑΚΖ. Η συνέπεια μπορεί να οριστεί ως απουσία λογικών αντιφάσεων. Ουσιαστικά συνέπεια είναι η μη αντίφαση. Αυτό δεν σημαίνει ότι οι ίδιες διαδικασίες πρέπει απαραίτητα να εφαρμόζονται σε όλη τη μελέτη, δεδομένου ότι διαφορετικές συνθήκες μπορεί να δικαιολογούν την εφαρμογή διαφορετικών διαδικασιών. Αυτό που είναι σημαντικό είναι ότι όταν επιλέγονται διαφορετικές διαδικασίες να γίνεται με συνεπή εφαρμογή των ίδιων κριτηρίων επιλογής [71].

Έλεγχος ευαισθησίας

Ο προσδιορισμός του τρόπου με τον οποίο τα συμπεράσματα της μελέτης μπορεί να επηρεαστούν από αβεβαιότητες, όπως αυτές που σχετίζονται με τα δεδομένα του LCI, τη μοντελοποίηση LCI, τις μεθόδους LCIA. Καταστάσεις, όπου μια ανάλυση ευαισθησίας αποτυγχάνει να δείξει σημαντικές διαφορές μεταξύ των εναλλακτικών που μελετήθηκαν, δεν οδηγούν στο συμπέρασμα ότι δεν υπάρχουν διαφορές, απλώς ότι αυτές δεν είναι σημαντικές [71].

Εντοπισμός σημαντικών ζητημάτων

Οι μέθοδοι για τον εντοπισμό σημαντικών ζητημάτων αντιμετωπίζουν δύο διαφορετικές ομάδες θεμάτων: ζητήματα που σχετίζονται με τη διεξαγωγή της μελέτης που ενδέχεται να αλλάξουν την εγκυρότητα ή την αξιοπιστία της και ζητήματα που σχετίζονται με τα αποτελέσματα της μελέτης και τον τρόπο με τον οποίο απαντούν στον στόχο της μελέτης [71].

Συμπεράσματα, περιορισμοί και συστάσεις

Είναι ένα σημαντικό βήμα, στο οποίο με βάση τον στόχο της μελέτης, γίνεται προσπάθεια να δοθούν απαντήσεις στα αρχικά ερευνητικά ερωτήματα που θα πρέπει να υποστηρίξουν τις αποφάσεις που πρέπει να ληφθούν, «κλείνοντας τον βρόχο» της μελέτης LCA [71].

2.6 Βάσεις Δεδομένων και Λογισμικά

Το πιο χρονοβόρο κομμάτι μιας μελέτης LCA είναι αυτό της συλλογής των δεδομένων, λόγω της πολυπλοκότητας των διαδικασιών και του αριθμού αυτών. Έχοντας ως στόχο την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων και εφόσον η συλλογή δεδομένων για τα υλικά, τις μεταφορές και τις ενεργειακές καταναλώσεις πολλές φορές είναι ανέφικτη, είτε πολύ χρονοβόρα, γίνονται κάποιες παραδοχές. Η AKZ δεν θα μπορούσε να γίνει για σύνθετες διαδικασίες χωρίς βάσεις δεδομένων. Αυτές εμπεριέχονται σε λογισμικά τα οποία κάνουν την μελέτη πιο αξιόπιστη και γρήγορη. Επίσης στα λογισμικά αυτά υπάρχει και η δυνατότητα εκτίμησης των περιβαλλοντικών επιπτώσεων, η οποία γίνεται με επιλογή από τον χρήστη μίας από τις διάφορες μεθόδους εκτίμησης. Στην παρούσα διπλωματική εργασία έγινε χρήση του λογισμικού SimaPro (προϊόν της εταιρείας Pre Sustainability BV) και της βάσης δεδομένων Ecoinvent. Με αυτό το λογισμικό διεκπεραιώνεται η μελέτη από το στάδιο του στόχου έως και την εκτίμηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων. Στο SimaPro εμπεριέχονται αρκετές βάσεις δεδομένων οι οποίες ανανεώνονται διαρκώς, ωστόσο υπάρχει και η δυνατότητα δημιουργίας βάσεων δεδομένων από τον χρήστη, από τα δεδομένα που έχει συλλέξει.

Η βάση δεδομένων Ecoinvent LCI δημοσιεύθηκε για πρώτη φορά το 2003, αντιπροσώπευε τα αποτελέσματα πολλών χρόνων εργασίας και χτίστηκε πάνω στις προσπάθειες συλλογής δεδομένων LCI στην Ελβετία της δεκαετίας του 1990 [72].

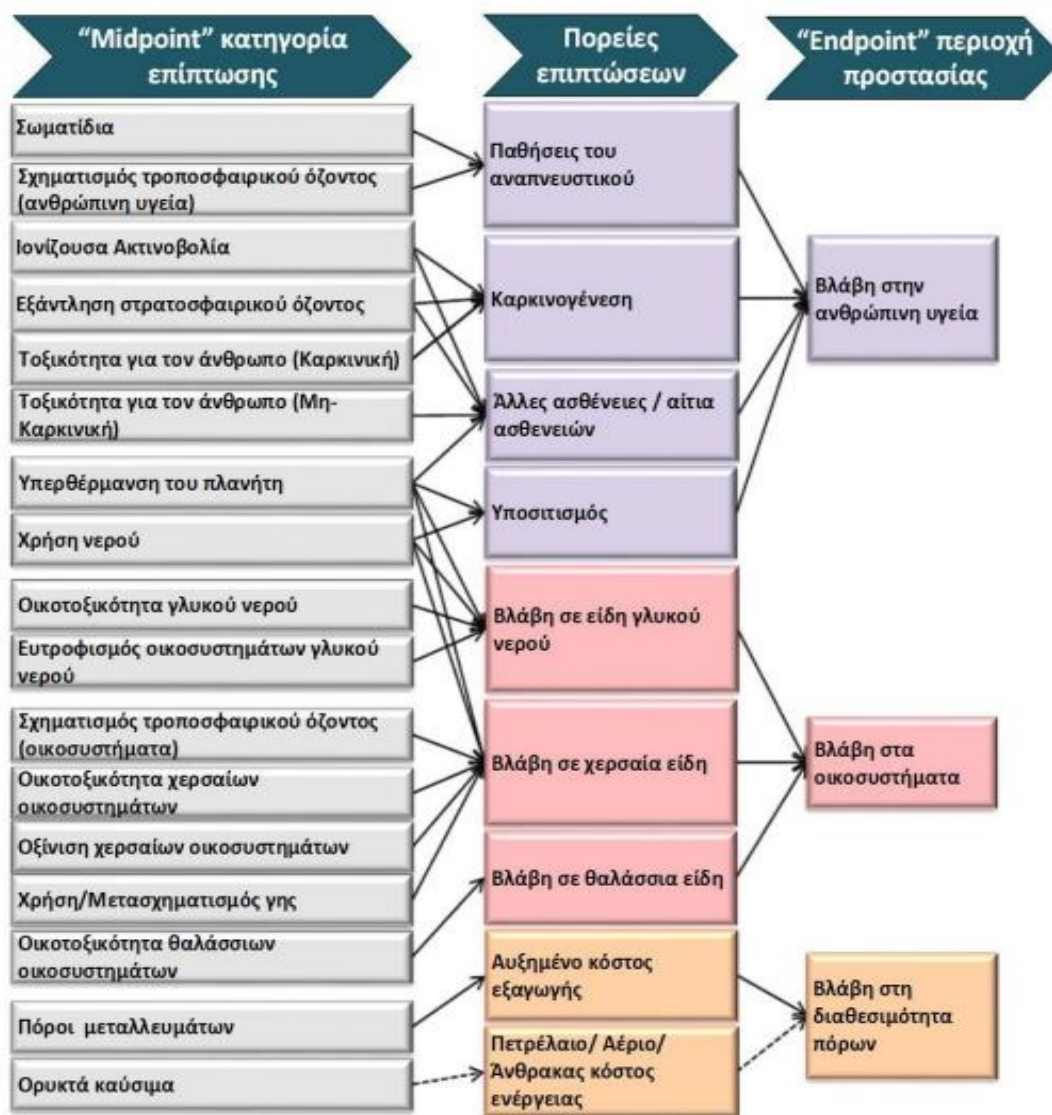
Η βάση δεδομένων της Ecoinvent επιτρέπει στους χρήστες να αποκτήσουν μια βαθύτερη κατανόηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων των προϊόντων και των υπηρεσιών τους. Καλύπτει ένα ευρύ φάσμα τομέων σε παγκόσμιο και περιφερειακό επίπεδο. Αυτή τη στιγμή περιέχει περισσότερες από 18.000 δραστηριότητες, που αλλιώς αναφέρονται ως «σύνολα δεδομένων», μοντελοποιώντας ανθρώπινες δραστηριότητες ή διαδικασίες. Τα σύνολα

δεδομένων της Ecoinvent περιέχουν πληροφορίες για την διαδικασία που μοντελοποιούν, μετρώντας τους φυσικούς πόρους που λαμβάνονται από το περιβάλλον, τις εκπομπές που απελευθερώνονται στο νερό, το έδαφος και τον αέρα, τα προϊόντα που απαιτούνται από άλλες διαδικασίες (ηλεκτρισμός) και φυσικά τα προϊόντα, παραγόμενα παραπροϊόντα και απόβλητα.

2.7 Μέθοδοι Εκτίμησης Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων

Οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις εκτιμώνται μέσω του SimaPro με την βοήθεια των μεθόδων εκτίμησης που προσφέρει. Μερικές από αυτές είναι οι (IMPACT 2002+, TRACI 2.1, ReCiPe 2016 και άλλες).

Η ReCiPe 2016 χρησιμοποιείται στην παρούσα διπλωματική εργασία και είναι μια ενημερωμένη και διευρυμένη έκδοση της ReCiPe 2008. Όπως και η προκάτοχός της, η ReCiPe 2016 περιλαμβάνει αντίκτυπο τόσο στο «midpoint» επίπεδο (προσανατολισμένο στο πρόβλημα) όσο και στο «endpoint» επίπεδο (προσανατολισμένο στις επιπτώσεις), ενώ διαθέτει τρεις διαφορετικές προοπτικές (ατομικιστική, ιεραρχική και εξισωτική). Οι παράγοντες χαρακτηρισμού είναι αντιπροσωπευτικοί για την παγκόσμια κλίμακα, αντί για την ευρωπαϊκή κλίμακα όπως έγινε στο ReCiPe 2008. Εξαιτίας αυτού η μέθοδος μετακινήθηκε από την Ευρωπαϊκή κατηγορία σε Παγκόσμια. Η ReCiPe 2016 περιλαμβάνει δύο τύπους κατηγοριών επιπτώσεων με συσχετισμένα σύνολα παραγόντων χαρακτηρισμού. Στο «midpoint» επίπεδο, εξετάζονται 18 κατηγορίες επιπτώσεων. Στο «endpoint» επίπεδο, οι περισσότερες από αυτές τις κατηγορίες επιπτώσεων στο «midpoint» επίπεδο πολλαπλασιάζονται με παράγοντες επιπτώσεων και συγκεντρώνονται σε τρεις τελικές κατηγορίες. Η Εικόνα 2-3 απεικονίζει τις σχέσεις μεταξύ των 18 κατηγοριών επιπτώσεων στο «midpoint» επίπεδο και των τριών κατηγοριών στο «endpoint» επίπεδο [68].



Εικόνα 2-3 Επισκόπηση κατηγοριών επιπτώσεων που καλύπτονται στη μεθοδολογία ReCiPe2016 και της σχέσης τους με τις περιοχές προστασίας [68].

Οι endpoint κατηγορίες επιπτώσεων είναι οι εξής:

- **Βλάβη στην ανθρώπινη υγεία (damage to human health).**

Εκφράζεται ως ο αριθμός των χαμένων ετών ζωής και ο αριθμός των χρόνων αναπηρίας. Αυτά συνδυάζονται ως Έτη Ζωής Προσαρμοσμένης Αναπηρίας (DALY), ένας δείκτης που χρησιμοποιείται επίσης από την Παγκόσμια Τράπεζα και τον ΠΟΥ.

- **Βλάβη στην ποιότητα των οικοσυστημάτων (damage to ecosystem diversity).**

Εκφράζεται ως απώλεια ειδών σε μια συγκεκριμένη περιοχή, κατά τη διάρκεια ορισμένου χρόνου.

- **Βλάβη στην διαθεσιμότητα των πόρων (damage to resource availability).**

Εκφράζεται ως το πλεόνασμα ενέργειας που απαιτείται για μελλοντικές εξορύξεις ορυκτών και ορυκτών καυσίμων [68].

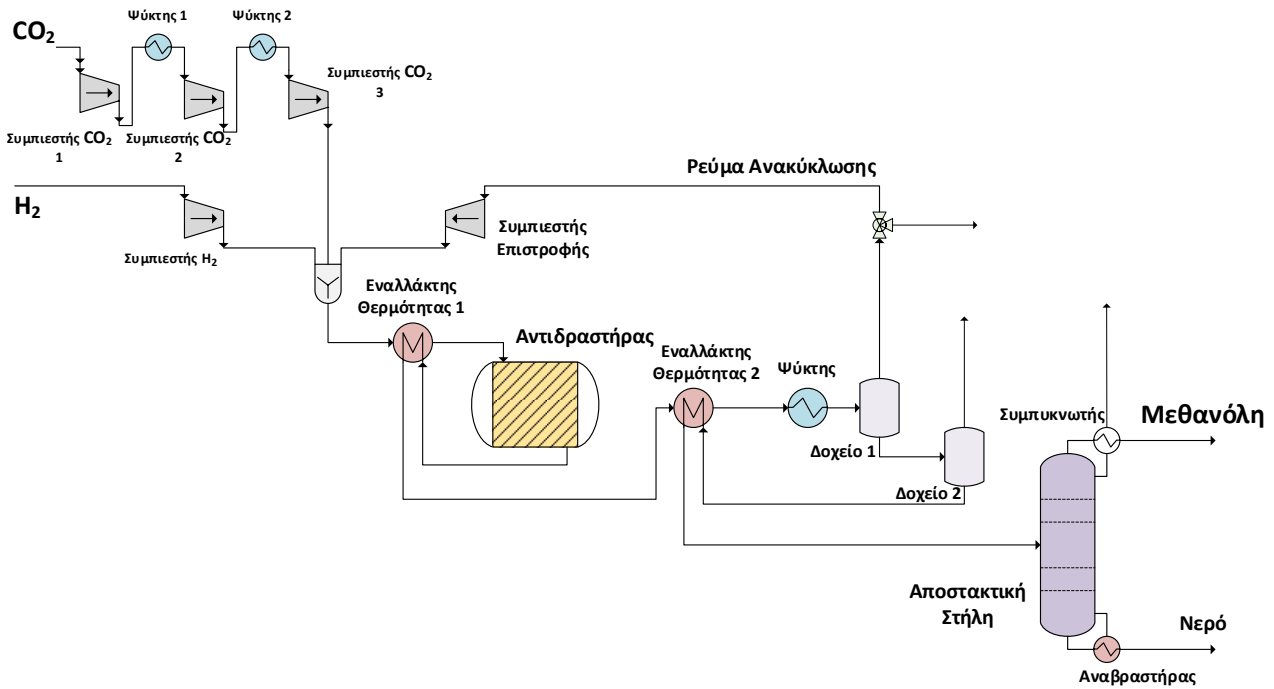
3. Σύστημα

3.1 Εισαγωγή

Η εγκατάσταση αποτελεί ένα σύστημα Power to X το οποίο δύναται να κατασκευαστεί στην Ελλάδα και έχει ως βασικό προϊόν την μεθανόλη. Στο πλαίσιο της απολιγνιτοποίησης, στο σενάριο βάσης λιγνιτικός σταθμός μετατρέπεται σε σταθμό βιομάζας ισχύος 375 MW, ο οποίος λειτουργεί ως ηλεκτροπαραγωγός. Η παραγωγή της μεθανόλης πραγματοποιείται με αντίδραση CO₂ και H₂, σε ειδικό αντιδραστήρα. Ο αντιδραστήρας έχει ως καταλύτες: οξείδιο του χαλκού (60 wt %), οξείδιο του ψευδαργύρου (30 wt %) και οξείδιο του αργιλίου (10 wt %). Το CO₂ δεσμεύεται από τα καυσαέρια του εργοστασίου βιομάζας, ενώ το H₂ παράγεται μέσω PEM ηλεκτρολύτη. Πριν την είσοδο στον αντιδραστήρα υπάρχει το στάδιο της συμπίεσης, το οποίο συγκροτείται από τρεις συμπιεστές και δύο ψύκτες, μέσω των οποίων επιτυγχάνεται κατάλληλη πίεση του CO₂. Ύστερα τα ρεύματα CO₂ και H₂ αναμιγνύονται με αναλογία 1:3 (molCO₂/molH₂) και αναμιγνύονται περαιτέρω με το ρεύμα ανακύκλωσης. Στον αντιδραστήρα, το CO₂ αντιδρά με το H₂ για να παραχθεί μεθανόλη. Το ρεύμα εξόδου επειδή δεν περιέχει καθαρή μεθανόλη, χωρίζεται σε ρεύμα ανακύκλωσης και μεθανόλης-νερού, το πρώτο ψύχεται, συμπιέζεται και επιστρέφει για να περάσει ξανά από τον αντιδραστήρα ενώ το δεύτερο ρεύμα οδηγείται στην μονάδα διαχωρισμού/διύλισης. Η μονάδα καθαρισμού αποτελείται από μία αποστακτική στήλη, έναν συμπυκνωτή, δύο δοχεία διαχωρισμού και έναν ψύκτη. Η καθαρότητα της παραγόμενης μεθανόλης είναι υψηλότερη από 99.85 %.

Εξετάζονται τρία βασικά σενάρια ανάλογα με την δυναμικότητα της παραγωγής καθώς και μερικά υποσενάρια ανάλογα με την πηγή ενέργειας που χρησιμοποιείται για την λειτουργία του συστήματος (Πίνακας 3-2). Το σενάριο βάσης αφορά μονάδα η οποία παράγει 206.5 t/h μεθανόλης, ποσότητα η οποία προκύπτει, όταν δεσμεύεται όλο το CO₂ που εκπέμπει ο ηλεκτροπαραγωγός σταθμός βιομάζας όσο λειτουργεί η μονάδα μεθανόλης και λόγω της υπέρογκης παραγωγής θεωρείται ότι θα λειτουργήσει το 2050. Η δεύτερη μονάδα έχει παραγωγή 48 t/h μεθανόλης και προβλέπεται να είναι δυνατή η λειτουργία της το έτος 2030. Τέλος εξετάζεται μια μικρότερη παραγωγή της τάξης των 1.8 t/h μεθανόλης για το έτος 2023. Οι μονάδες θεωρείται ότι λειτουργούν το 70 % του χρόνου. Ο Πίνακας 3-1 περιλαμβάνει τα χαρακτηριστικά της παραγωγής μεθανόλης για τα τρία σενάρια. Το σχέδιο της μονάδας του έτους 2023 παρουσιάζεται στην Εικόνα 3-1. Να σημειωθεί πως το σχέδιο της μονάδας για τα σενάρια των ετών 2030, 2050 είναι ίδιο, με την μοναδική διαφορά ότι απουσιάζει ο συμπιεστής υδρογόνου, καθώς οι μελλοντικοί ηλεκτρολύτες θεωρείται ότι παράγουν το υδρογόνο στην απαιτούμενη πίεση [73]. Επειδή εκτός της παραγωγής μεθανόλης, στόχος είναι η μείωση των εκπομπών CO₂ του ηλεκτροπαραγωγού σταθμού βιομάζας, εξετάζεται ως σενάριο βάσης αυτό του έτους 2050, στο οποίο δεσμεύεται το περισσότερο CO₂ και για τον λόγο αυτό η σειρά με την οποία εξετάζονται τα σενάρια είναι αντίστροφη από το έτος κατασκευής των μονάδων. Εξετάζεται πέρα από το σενάριο βάσης, η κάλυψη των αναγκών από διάφορες πηγές ενέργειας. Σε κάθε περίπτωση το CO₂ δεσμεύεται από ηλεκτροπαραγωγό σταθμό ισχύος 375 MW (βιομάζας, λιγνίτη ή φυσικού αερίου). Όταν χρησιμοποιείται ως πηγή ενέργειας το δίκτυο ή οι ΑΠΕ, το CO₂ θεωρείται ότι δεσμεύεται από ηλεκτροπαραγωγό σταθμό βιομάζας. Όποτε χρησιμοποιούνται δύο πηγές ενέργειας πάντα ο ηλεκτροπαραγωγός σταθμός 375 MW προσφέρει όλη του την ενέργεια στην μερική

κάλυψη των αναγκών της ηλεκτρόλυσης και οι υπόλοιπες ανάγκες καλύπτονται από την δεύτερη πηγή ενέργειας. Σε σενάρια όπου γίνεται κάλυψη των αναγκών από ηλεκτροπαραγωγούς σταθμούς αποκλειστικά, θεωρείται πως οι σταθμοί δεν έχουν ισχύ 375 MW αλλά όση απαιτείται κάθε φορά για την κάλυψη των αναγκών της μονάδας παραγωγής μεθανόλης.



Εικόνα 3-1 Διάταξη της μονάδας του έτους 2023

Πίνακας 3-1 Βασικά χαρακτηριστικά των μονάδων των ετών 2023, 2030 και 2050.

| | Σενάριο 2023 | Σενάριο 2030 | Σενάριο 2050 |
|--------------------------------|--------------|--------------|--------------|
| Παραγωγή μεθανόλης (t/h) | 1.8 | 48 | 206.5 |
| Απαιτήσεις υδρογόνου (t/h) | 0.375 | 10 | 43 |
| Απαιτήσεις δέσμευσης CO2 (t/h) | 2.7 | 72.8 | 313 |
| Ισχύς ηλεκτρόλυσης (MW) | 20 | 500 | 2000 |

3.2 Λειτουργία

3.2.1 Σενάριο 2050

Το σύνολο του CO₂ που δεσμεύεται (313 τόνοι/ώρα), χρησιμοποιείται για την παραγωγή μεθανόλης (206.5 τόνοι/ώρα). Με βάση αυτήν την ποσότητα CO₂, οι απαιτήσεις για υδρογόνο είναι 43 τόνοι/ώρα, και η κάλυψη αυτών των αναγκών πραγματοποιείται με δύο PEM ηλεκτρολύτες ισχύος 1000 MW ο καθένας. Να σημειωθεί πως οι θερμικές ανάγκες

καλύπτονται σε μεγάλο βαθμό από το σύστημα και δεν λαμβάνονται υπόψη. Για το σενάριο βάσης (σταθμός βιομάζας 375 MW και ΑΠΕ), ο σταθμός βιομάζας προσφέρει όλη την παραγόμενη ηλεκτρική του ενέργεια για την λειτουργία της ηλεκτρόλυσης. Οι ΑΠΕ (50 % αιολική ενέργεια, 25 % ηλιακή, 25 % υδροηλεκτρική) καλύπτουν τις υπόλοιπες ηλεκτρικές ανάγκες του συστήματος.

Στο σενάριο 100 % ΑΠΕ θεωρείται ότι η ενέργεια είναι διαθέσιμη όποτε υπάρχει ανάγκη. Αυτό πραγματοποιείται με χρήση ενέργειας από το δίκτυο η οποία πιστοποιείται ως πράσινη, μέσω διμερών συμβάσεων αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας (Power Purchase Agreement - PPAs). Αυτές είναι συμβάσεις, μεταξύ ενός παραγωγού ηλεκτρικής ενέργειας και ενός αγοραστή, κατά τις οποίες ο αγοραστής συμφωνεί να αγοράσει μια καθορισμένη ποσότητα ηλεκτρικής ενέργειας από τον παραγωγό από μια συγκεκριμένη πηγή [74]. Για τα σενάρια Βιομάζα 100 % και Φυσικό αέριο 100 % όλες οι ανάγκες του συστήματος καλύπτονται από τον εκάστοτε σταθμό.

3.2.2 Σενάριο 2030

Σε αυτό το σενάριο εξετάζεται το ίδιο σύστημα σε μικρότερη κλίμακα, με πιθανή εφαρμογή το 2030. Αξιοποιείται και πάλι ο ίδιος σταθμός βιομάζας 375 MW για την δέσμευση του CO₂ ενώ η παραγωγή μεθανόλης μειώνεται στους 48 τόνους/ώρα. Ο ηλεκτρολύτης έχει ισχύ 500MW ώστε να καλύψει τις ανάγκες παραγωγής υδρογόνου. Επίσης το μέγεθος των υπόλοιπων μερών της εγκατάστασης μειώνεται. Να σημειωθεί πως σε όλα τα σενάρια όπου χρησιμοποιείται ηλεκτροπαραγωγός σταθμός αυτός έχει ισχύ 375 MW και καλύπτει τις ανάγκες CO₂, ενώ

Και πάλι εξετάζεται το σενάριο σταθμού βιομάζας ισχύος 375 MW με συμπληρωματική κάλυψη αναγκών από ΑΠΕ, καθώς και το σενάριο 100 % ΑΠΕ, με ίδια λειτουργία του συστήματος αλλά λαμβάνοντας υπόψη το διαφορετικό μέγεθος της μονάδας. Εξετάζεται επίσης η περίπτωση κάλυψης μέρους των ηλεκτρικών αναγκών από λιγνιτικό σταθμό, με δέσμευση του CO₂ από αυτόν και συμπληρωματική λήψη ηλεκτρισμού από σταθμό φυσικού αερίου για την κάλυψη των υπόλοιπων αναγκών του συστήματος. Τέλος εξετάζεται το σενάριο κάλυψης μέρους των ηλεκτρικών αναγκών και αναγκών CO₂ από σταθμό φυσικού αερίου ισχύος 375 MW και συμπληρωματική λήψη ηλεκτρισμού από λιγνιτικό σταθμό για την κάλυψη των υπόλοιπων ηλεκτρικών αναγκών του συστήματος.

3.2.3 Σενάριο 2023

Σε αυτό το σενάριο εξετάζεται το ίδιο σύστημα σε ακόμα μικρότερη κλίμακα, το οποίο μπορεί να πραγματοποιηθεί το 2023. Από τον σταθμό βιομάζας 375 MW γίνεται η δέσμευση του CO₂ ενώ η παραγωγή μεθανόλης μειώνεται στους 1.8 τόνους/ώρα. Ο ηλεκτρολύτης έχει ισχύ 20MW ώστε να καλύψει τις ανάγκες παραγωγής υδρογόνου. Προστίθεται ένας επιπλέον συμπίεστης για την αύξηση της πίεσης του υδρογόνου πριν την αντίδραση, ο οποίος δεν χρειάζεται στα προηγούμενα σενάρια καθώς το υδρογόνο έχει κατάλληλη πίεση μετά την ηλεκτρόλυση σε αυτά τα σενάρια λόγω διαφορετικής μελλοντικής λειτουργίας του ηλεκτρολύτη. Επίσης το μέγεθος των υπόλοιπων μερών της εγκατάστασης μειώνεται.

Εξετάζεται αρχικά το σενάριο στο οποίο οι ανάγκες καλύπτονται αποκλειστικά από τον σταθμό βιομάζας, ο οποίος δύναται να τις υπερκαλύψει. Ύστερα εξετάζεται σενάριο στο

οποίο όλες οι ανάγκες καλύπτονται από σταθμό φυσικού αερίου. Τέλος εξετάζονται δύο σενάρια ακόμα, πρώτα με κάλυψη των ηλεκτρικών αναγκών με 100 % ΑΠΕ και ύστερα με 100 % ενέργεια από το δίκτυο και στα δύο σενάρια το CO₂ δεσμεύεται από σταθμό βιομάζας.

Πίνακας 3-2 Σενάρια ανάλογα με την πηγή ενέργειας

| Πηγές ενέργειας | Σενάρια 2023 | Σενάρια 2030 | Σενάρια 2050 |
|---|---------------------|---------------------|---------------------|
| ΑΠΕ 100 % | ✓ | ✓ | ✓ |
| Βιομάζα 375 MW, ΑΠΕ υπόλοιπα | | ✓ | ✓ |
| Βιομάζα 100 % | ✓ | | ✓ |
| Λιγνίτης 375 MW φυσικό αέριο υπόλοιπα | | ✓ | |
| Φυσικό αέριο 100 % | | | ✓ |
| Φυσικό αέριο 375 MW, ΑΠΕ υπόλοιπα | | ✓ | |
| Λιγνίτης 100 % | ✓ | | |
| Δίκτυο 100 % | ✓ | | |

4. Ανάλυση Κύκλου Ζωής για το Εξεταζόμενο Σύστημα

Ο στόχος της παρούσας μελέτης είναι να αναλυθούν και να εκτιμηθούν ποσοτικά οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις του συστήματος παραγωγής μεθανόλης όπως περιγράφεται στο προηγούμενο κεφάλαιο, και να εξεταστεί η περιβαλλοντική βιωσιμότητα του καθώς και να εντοπιστούν τα σημεία της διαδικασίας στα οποία μπορεί να γίνει πιο βιώσιμο.

4.1 Πεδίο Εφαρμογής της Μελέτης

Η βασική λειτουργία του συστήματος είναι η παραγωγή μεθανόλης. Η παρούσα μελέτη ανήκει στην κατηγορία *cradle to grave* καθώς περιέχει όλες τις διεργασίες από την εξόρυξη των πρώτων υλών μέχρι και την παραγωγή του προϊόντος. Ως χρονικά όρια του συστήματος επιλέχθηκε ο χρόνος ζωής της εγκατάστασης, τα 20 χρόνια. Τέλος θεωρήθηκε πως τα κύρια μέρη της εγκατάστασης όπως ο ηλεκτρολύτης κατασκευάζονται στην Ευρώπη ενώ σε διάφορες περιπτώσεις όπου υπήρχε δυνατότητα επιλέχθηκαν δεδομένα που αναφέρονταν στην Ελλάδα. Ως λειτουργική μονάδα του συστήματος ορίζεται ο ένας τόνος παραγόμενης μεθανόλης. Ο τρόπος διασύνδεσης των επιμέρους διεργασιών ώστε να μοντελοποιηθεί το σύστημα στην βάση δεδομένων Ecoinvent 3.8 είναι τρεις: «Cut off», «Allocation at the point of substitution – APOS» και το «Consequential». Από αυτά επιλέγεται το πρώτο, σύμφωνα με το οποίο ο περιβαλλοντικός αντίκτυπος της παραγωγής ενός υλικού αποδίδεται στον πρώτο χρήστη αυτού, ενώ σε περίπτωση ανακύκλωσης του υλικού ο χρήστης δεν επωφελείται, ωστόσο τα ανακυκλωμένα υλικά επιβαρύνουν μόνο με το περιβαλλοντικό κόστος της διαδικασίας της ανακύκλωσης. Για την εκτίμηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων, επιλέγεται η χρήση της μεθόδου ReCiPe 2016 Midpoint 1.04 και ReCiPe 2016 Endpoint 1.04, με ιεραρχική προοπτική. Όλα τα αποτελέσματα στο επίπεδο Midpoint πραγματοποιούνται με την μέθοδο του χαρακτηρισμού ενώ κανονικοποίηση γίνεται μόνο σε επίπεδο Endpoint, όπως αναφέρθηκε σύμφωνα με το ISO14040, υποχρεωτική είναι μόνο η μέθοδος του χαρακτηρισμού.

4.2 Ποιότητα Δεδομένων

Η εγκατάσταση δεν είναι υπαρκτή αλλά προσομοιώνεται με το πρόγραμμα ASPEN από την επιβλέπουσα Κα Κοντού, επομένως τα περισσότερα δεδομένα για την λειτουργία και κατασκευή της μονάδας λαμβάνονται από την προσομοίωση αυτή. Όπου υπάρχει έλλειψη δεδομένων, αυτά βρίσκονται από άλλες μελέτες και γίνονται οι κατάλληλες αναγωγές. Τα υλικά κατασκευής μοντελοποιούνται με τα έτοιμα σετ δεδομένων της Ecoinvent, με επιλογή της εγγύτερης τοποθεσίας κάθε φορά. Οι μεταφορές μοντελοποιούνται από τα αντίστοιχα σετ δεδομένων της Ecoinvent και γίνεται προσπάθεια για την εύρεση ακριβών δεδομένων για τις αποστάσεις μέσω Google Maps. Για την συντήρηση της εγκατάστασης γίνεται λήψη δεδομένων από βιβλιογραφικές πηγές, καθώς από το ASPEN δεν συλλέγονται αντίστοιχα δεδομένα. Επίσης επιλέγεται η εξέταση κάποιων σεναρίων στα οποία το παραγόμενο οξυγόνο από την ηλεκτρόλυση χρησιμοποιείται, ωστόσο δεν έχουν μοντελοποιηθεί η συμπίεση και η αποθήκευση του καθώς θεωρείται ότι έχουν αμελητέο αντίκτυπο.

Έχουν πραγματοποιηθεί αρκετές μελέτες που μελετούν συστήματα παραγωγής μεθανόλης. Από τις έρευνες που μελετήθηκαν το GWP κυμαίνεται από -1232 έως 17700 kg CO₂-eq/ton MeOH ανάλογα με τον τρόπο παραγωγής της μεθανόλης (Πίνακας 4-1). Εκτός

των ερευνών που μελετήθηκαν, από το Ινστιτούτο Μεθανόλης συγκεντρώνονται οι παρακάτω πληροφορίες σχετικά με το GWP της μεθανόλης. Η παραγωγή μεθανόλης από άνθρακα πραγματοποιείται μόνο στην Κίνα και έχει GWP 300 g CO₂ eq/ MJ η αλλιώς 6600 kg CO₂-eq/ton MeOH. Η παραγωγή πράσινης μεθανόλης έχει χαμηλό αντίκτυπο που κυμαίνεται ανάμεσα σε 10-40 gr CO₂-eq/MJ ή αλλιώς 220 και 880 kg CO₂-eq/ton MeOH. Ενώ αρνητικές τιμές είναι δυνατόν να επιτευχθούν αν υπάρχει και δέσμευση CO₂, τότε το GWP γίνεται -55 gr CO₂-eq/MJ ή αλλιώς -1210 kg CO₂-eq/ton MeOH [75].

Πίνακας 4-1 Σύγκριση αποτελεσμάτων άλλων μελετών σε συστήματα παραγωγής μεθανόλης.

| Πηγή δεδομένων | Χρονολογία | Λειτουργική μονάδα | Τύπος εγκατάστασης | GWP (kg CO ₂ -eq) | GWP (kg CO ₂ -eq/ton MeOH) |
|----------------|------------|--------------------|---|------------------------------|---------------------------------------|
| [76] | 2021 | 1 MJ | ΑΠΕ-MeOH με δέσμευση CO ₂ | -0.056 | -1232 |
| | | | Φυσικό αέριο-MeOH | 0.092 | 2024 |
| [77] | 2017 | 1kg MeOH | ΑΠΕ, δέσμευση CO ₂ από παραγωγή βιοαερίου – MeOH | -0.03 | -30 |
| [78] | 2018 | 1 kg MeOH | Άνθρακας-MeOH | 2.965 | 2965 |
| | | | Φυσικό αέριο-MeOH | 0.462 | 462 |
| | | | Βιομάζα ξύλου- MeOH | -0.914 | -914 |
| | | | ΑΠΕ, δέσμευση CO ₂ από λιγνιτικό σταθμό | -0.752 | -752 |
| [79] | 2018 | 1 ton MeOH | Άνθρακας-MeOH | 17700 | 17700 |
| [75] | 2022 | 1 MJ | Άνθρακας-MeOH | 300 | 6600 |
| | | | ΑΠΕ-MeOH | 10-40 | 220-880 |
| | | | ΑΠΕ-MeOH, με δέσμευση CO ₂ | -55 | -1210 |

4.3 Ανάλυση και Καταγραφή Δεδομένων

Η δημιουργία ενός ακριβούς καταλόγου απογραφής αποτελεί ζωτικής σημασίας στοιχείο μιας μελέτης ΑΚΖ, καθώς η ποιότητα των τελικών αποτελεσμάτων είναι άρρηκτα συνδεδεμένη με την ακρίβεια και την αντιπροσωπευτικότητα των δεδομένων που έχουν χρησιμοποιηθεί. Οι κατάλογοι αποτυπώνουν τις κύριες φάσεις της εγκατάστασης που μελετάται ενώ περιλαμβάνουν την κατασκευή της εγκατάστασης, τη λειτουργία της, τη διαχείριση των αποβλήτων καθώς και τις μεταφορές που είναι απαραίτητες στα παραπάνω στάδια. Η ακρίβεια και η εκτενής κάλυψη όλων των στοιχείων στον κατάλογο απογραφής αποτελούν βασική προϋπόθεση για την επίτευξη αξιόπιστων αποτελεσμάτων στη μελέτη ΑΚΖ.

4.3.1 Φάση Κατασκευής

Η μοντελοποίηση γίνεται ως εξής :

- Αρχικά οι ανοξείδωτοι χάλυβες οι οποίοι χρησιμοποιούνται σε πολλά μέρη της εγκατάστασης μοντελοποιούνται σύμφωνα με το σετ δεδομένων «Steel, chromium steel 18/8 [11] | market for».
- Σε διάφορες περιπτώσεις όπου για κάποιο μέταλλο δεν είναι γνωστά τα υλικά επεξεργασίας και οι ενεργειακές απαιτήσεις γίνεται χρήση του σετ δεδομένων «Energy and auxilliary inputs, metal working factory (RER) | market for energy and auxilliary inputs, metal working factory»
- Όσον αφορά τα ηλεκτρονικά μέρη του εξοπλισμού όταν αυτά δεν είναι γνωστά γίνεται χρήση του σετ «Electronic component, passive, unspecified (GLO) | market for».
- Τα πλαστικά μοντελοποιούνται με το σετ «Polyvinylchloride, suspension polymerised (GLO) | market for».
- Όταν δεν είναι γνωστές οι μέθοδοι κατεργασίας των διαφόρων μετάλλων γίνεται χρήση του σετ δεδομένων «Metal working, average for *όνομα μετάλλου* product manufacturing (GLO) | market for».
- Η κλιμάκωση του μεγέθους γίνεται με βάση τον κανόνα του συντελεστή των έξι δεκάτων. Όταν υπάρχουν διαθέσιμα δεδομένα για τμήμα εξοπλισμού Α δυναμικότητας Χ φορές μεγαλύτερης από αυτή όμοιου τμήματος εξοπλισμού Β, τότε ισχύει για τις μάζες των υλικών κατασκευής $M_A = M_B * X^{0.6}$. Η ίδια σχέση χρησιμοποιείται και για τις ενεργειακές ανάγκες κατά την φάση της κατασκευής του εξαρτήματος. Η σχέση αυτή χρησιμοποιείται στην διαστασιολόγηση σχετικά με την κατασκευή και την συντήρηση του ηλεκτρολύτη [80].

4.3.1.1 Ηλεκτροπαραγωγός Σταθμός Βιομάζας

Το μοναδικό σετ δεδομένων που βρέθηκε για παραγωγή ενέργειας από βιομάζα, αφορά σταθμό ο οποίος λειτουργεί με πελέτες ξύλου που προέρχονται από λεύκες. Η βιομάζα αεριοποιείται και ο παραγόμενος ατμός οδηγείται σε ατμοστρόβιλο, μέσω του οποίου παράγεται η ενέργεια. Η μετατροπή του λιγνιτικού σταθμού σε σταθμό βιομάζας απαιτεί τις παρακάτω μετατροπές :

- Αντικατάσταση 8 μυλών άνθρακα από 4 μύλους πελετών ξύλου.
- Δεξαμενή αποθήκευσης βιομάζας όγκου 12.000 m³
- Αντικατάσταση 16 καυστήρων άνθρακα από 24 καυστήρες βιομάζας
- Προσθήκη 2 κάδων υποδοχής όγκου 50 m³ έκαστος

Η μοντελοποίηση αυτών των μετατροπών στο Simarpro δεν πραγματοποιείται καθώς δεν υπάρχουν αντίστοιχα σετ δεδομένων και η άντληση δεδομένων για την κάθε μετατροπή ξεχωριστά είναι εξαιρετικά δύσκολη και χρονοβόρα και εκτός των ορίων της μελέτης. Ωστόσο η διαφορά στο τελικό περιβαλλοντικό αποτύπωμα της μονάδας είναι ελάχιστη καθώς το μεγαλύτερο φορτίο όπως υπολογίζεται στην συνέχεια το φέρει η λειτουργία και όχι η κατασκευή της μονάδας.

Επίσης για την μονάδα δέσμευσης του διοξειδίου του άνθρακα δεν μοντελοποιήθηκε η φάση της κατασκευής, αλλά μόνο της λειτουργίας καθώς θεωρήθηκε αμελητέος ο αντίκτυπος και μία τέτοια μοντελοποίηση θα ήταν εκτός των ορίων της μελέτης.

4.3.1.2 Ηλεκτρόλυση

Η απαιτούμενη ισχύς της ηλεκτρόλυσης εξαρτάται από την δυναμικότητα παραγωγής υδρογόνου. Για να προσδιοριστεί η απαιτούμενη ονομαστική ισχύς των ηλεκτρολυτών έγινε αναγωγή με βάση τα δεδομένα PEM ηλεκτρολύτη Silyzer 300 της εταιρίας SIEMENS, του έτους 2021, ονομαστικής ισχύος 17.5 MW, ο οποίος έχει δυνατότητα παραγωγής 335 kg/h και έχει απόδοση υψηλότερη του 75 %, ενώ χρησιμοποιεί 10 κιλά απιονισμένου νερού ανά κιλό παραγόμενου υδρογόνου [81]. Με αναγωγή προκύπτει ότι για την μονάδα του έτους 2023 η οποία έχει απαιτήσεις 375 kg/h, η ονομαστική ισχύς του ηλεκτρολύτη πρέπει να είναι 19.6 MW. Επομένως επιλέγεται PEM ηλεκτρολύτης ισχύος 20 MW. Όσον αφορά τις μονάδες των ετών 2030 και 2050 με αναγωγή προκύπτει απαιτούμενη ονομαστική ισχύς ηλεκτρόλυσης 522 και 2246 MW αντίστοιχα, ωστόσο λόγω βελτίωσης της απόδοσης της τεχνολογίας της ηλεκτρόλυσης θεωρείται απαιτούμενη ισχύς ηλεκτρόλυσης 500 και 2000 MW, αντίστοιχα. Για την μονάδα του έτους 2030 επιλέγεται η χρήση ενός μόνο ηλεκτρολύτη 500 MW, ενώ για αυτή του έτους 2050 δύο ηλεκτρολύτες ισχύος 1000 MW έκαστος.

Για να προσδιοριστούν τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν και να υπολογιστούν οι μάζες τους, δεδομένα χρησιμοποιήθηκαν από βιβλιογραφία. Η μοντελοποίηση του ηλεκτρολύτη για τα διάφορα σενάρια έγινε με αναγωγή με βάση την κατασκευή ενός ηλεκτρολύτη ισχύος 1 MW [82], καθώς δεν βρέθηκαν αντίστοιχα δεδομένα για τον Silyzer 300.

Όσον αφορά στην ποσότητα της απαιτούμενης ενέργειας για την κατασκευή, δεν υπήρχαν δεδομένα στην ανωτέρω μελέτη, γι' αυτό χρησιμοποιήθηκαν έτοιμα σετ δεδομένων από την Ecoinvent για την κατασκευή PEM ηλεκτρολυτών, από τα οποία προέκυψαν δεδομένα που

αφορούν μόνο τις ενεργειακές απαιτήσεις για την κατασκευή του ηλεκτρολύτη. Τα υλικά και οι απαιτήσεις ενέργειας για την κατασκευή των PEM ηλεκτρολυτών (1000, 500 και 20MW αντίστοιχα) παρουσιάζονται στους παρακάτω πίνακες. Η κλιμάκωση του μεγέθους γίνεται με βάση τον κανόνα του συντελεστή των έξι δεκάτων.

Πίνακας 4-2 Κατάλογος πρώτων υλών για ηλεκτρολύτη 1000MW.

| Παράμετρος | Τιμή | Μονάδα |
|---|------|----------------|
| Χάλυβας χαμηλής κραμάτωσης(Low-alloyed steel) | 331 | t |
| Ανοξείδωτο ατσάλι (Stainless steel) | 131 | t |
| Αλουμίνιο (Aluminium) | 1.9 | t |
| Χαλκός (Copper) | 0.3 | t |
| Πλαστικό PVC (Polyvinylchloride) | 20.7 | t |
| Ηλεκτρονικά εξαρτήματα (Electronic components) | 13.8 | t |
| Τσιμέντο (Concrete) | 161 | m ³ |
| Υλικά επεξεργασίας (Auxiliary inputs) | 13.8 | t |
| Ηλεκτρική ενέργεια (Electricity) | 112 | MWh |
| Θερμική ενέργεια (Heat) | 148 | GJ |
| Συνολική μάζα χωρίς το τσιμέντο (Total mass without concrete) | 513 | t |

Πίνακας 4-3 Κατάλογος πρώτων υλών για ηλεκτρολύτη 500MW

| Παράμετρος | Τιμή | Μονάδα |
|--|------|----------------|
| Χάλυβας χαμηλής κραμάτωσης (Low-alloyed steel) | 218 | t |
| Ανοξείδωτο ατσάλι (Stainless steel) | 86 | t |
| Αλουμίνιο (Aluminium) | 1.2 | t |
| Χαλκός (Copper) | 0.2 | t |
| Πλαστικό PVC (Polyvinylchloride) | 13.7 | t |
| Ηλεκτρονικά εξαρτήματα (Electronic components) | 9.1 | t |
| Τσιμέντο (Concrete) | 106 | m ³ |
| Υλικά επεξεργασίας (Auxiliary inputs) | 9.1 | t |

| | | |
|---|-----|-----|
| Ηλεκτρική ενέργεια (Electricity) | 74 | MWh |
| Θερμική ενέργεια (Heat) | 97 | GJ |
| Συνολική μάζα χωρίς το τσιμέντο (Total mass without concrete) | 338 | t |

Πίνακας 4-4 Κατάλογος πρώτων υλών για ηλεκτρολύτη 20MW

| Παράμετρος | Τιμή | Μονάδα |
|---|------|----------------|
| Χάλυβας χαμηλής κραμάτωσης (Low-alloyed steel) | 31.7 | t |
| Ανοξείδωτο ατσάλι (Stainless steel) | 12.5 | t |
| Αλουμίνιο (Aluminium) | 0.18 | t |
| Χαλκός (Copper) | 0.03 | t |
| Πλαστικό PVC (Polyvinylchloride) | 2.0 | t |
| Ηλεκτρονικά εξαρτήματα (Electronic components) | 1.3 | t |
| Τσιμέντο (Concrete) | 15 | m ³ |
| Υλικά επεξεργασίας (Auxiliary inputs) | 1.3 | t |
| Ηλεκτρική ενέργεια (Electricity) | 10.7 | MWh |
| Θερμική ενέργεια (Heat) | 14.1 | GJ |
| Συνολική μάζα χωρίς το τσιμέντο (Total mass without concrete) | 49 | t |

Ο χρόνος ζωής του ηλεκτρολύτη διαφέρει ανάλογα με το έτος κατασκευής του. Για το έτος 2020 οι ώρες λειτουργίας ενός ηλεκτρολύτη κυμαίνονταν από 50 έως 80 χιλιάδες ώρες. Ενώ για το έτος 2050 προβλέπεται ο χρόνος ζωής να ανέλθει στις 100 με 120 χιλιάδες ώρες (IRENA, 2020). Η μονάδα παραγωγής μεθανόλης όταν λειτουργεί το 70 % του χρόνου, στα 20 έτη θα έχει λειτουργήσει 123 χιλιάδες ώρες. Με τις κατάλληλες αναγωγές θεωρώντας γραμμική βελτίωση στα χρόνια ζωής του ηλεκτρολύτη προκύπτει ο μέσος χρόνος ζωής για το εκάστοτε έτος κατασκευής (Πίνακας 4-5).

Πίνακας 4-5 Χρόνος ζωής ηλεκτρολυτών ανά έτος παραγωγής.

| Έτος κατασκευής | 2023 | 2030 | 2050 |
|--|------|------|------|
| Χρόνος ζωής σε χιλιάδες ώρες λειτουργίας | 70 | 80 | 110 |
| Φορές αλλαγής ηλεκτρολύτη | 1 | 1 | 1 |
| Ποσοστό αξιοποίησης τελευταίου ηλεκτρολύτη (%) | 76 | 53 | 11 |

Διαιρώντας τις ώρες λειτουργίας της μονάδας (η οποία ταυτίζεται με τις ώρες λειτουργίας του ηλεκτρολύτη) με τον χρόνο ζωής του ηλεκτρολύτη και αφαιρώντας μια μονάδα προκύπτει ο αριθμός των φορών που θα χρειαστεί αλλαγή του. Σε περίπτωση που αυτό το νούμερο είναι μεγαλύτερο του μηδενός απαιτείται τουλάχιστον μία αλλαγή. Τα δεκαδικά νούμερα δηλώνουν πως ο τελευταίος ηλεκτρολύτης δεν αξιοποιεί ολόκληρο τον κύκλο ζωής του και επομένως δεν είναι σωστό και να του αποδοθεί όλο το περιβαλλοντικό φορτίο της κατασκευής του. Για παράδειγμα ο ηλεκτρολύτης της μονάδας του 2023 χρειάζεται να αλλαχθεί 1 φορά ενώ αφού αλλαχθεί ο ηλεκτρολύτης θα χρησιμοποιηθεί για το 76 % του χρόνου ζωής του. Για τον λόγο αυτό θεωρείται ότι οι ηλεκτρολύτες χρησιμοποιούνται σε άλλη μονάδα, υποθέτοντας ότι αυτή βρίσκεται σε απόσταση 200km από την εξεταζόμενη.

Από σελ το οποίο περιέχεται στην βάση δεδομένων της Ecoinvent, λαμβάνονται τα υλικά για την συντήρηση ηλεκτρολύτη ισχύος 2 kW, όπου προβλέπεται συντήρηση του ηλεκτρολύτη ανά 5300 ώρες λειτουργίας. Με κατάλληλη αναγωγή για ηλεκτρολύτη 1000MW, 500MW καθώς και 20MW προκύπτουν οι παρακάτω πίνακες. Οι φορές που θα χρειαστεί συντήρηση υπολογίζονται στις 22.

Πίνακας 4-6 Κατάλογος πρώτων υλών για συντήρηση ηλεκτρολύτη 1000MW ανά φορά συντήρησης.

| Παράμετρος | Τιμή | Μονάδα |
|---------------------------------------|------|--------|
| Ξυλάνθρακας (Charcoal) | 508 | Kg |
| Πλατίνα (Platinum) | 1.52 | Kg |
| Ανοξείδωτο ατσάλι (Stainless steel) | 4873 | Kg |
| Διοξείδιο τιτανίου (Titanium dioxide) | 142 | Kg |
| Συνολική μάζα | 5524 | Kg |

Πίνακας 4-7 Κατάλογος πρώτων υλών για συντήρηση ηλεκτρολύτη 500MW ανά φορά συντήρησης.

| Παράμετρος | Τιμή | Μονάδα |
|------------------------|------|--------|
| Ξυλάνθρακας (Charcoal) | 335 | Kg |
| Πλατίνα (Platinum) | 1.01 | Kg |

| | | |
|---------------------------------------|------|----|
| Ανοξείδωτο ατσάλι (Stainless steel) | 3215 | Kg |
| Διοξείδιο τιτανίου (Titanium dioxide) | 93.6 | Kg |
| Συνολική μάζα | 3645 | Kg |

Πίνακας 4-8 Κατάλογος πρώτων υλών για συντήρηση ηλεκτρολύτη 1000MW ανά φορά συντήρησης.

| Παράμετρος | Τιμή | Μονάδα |
|---------------------------------------|-------|--------|
| Ξυλάνθρακας (Charcoal) | 48.6 | Kg |
| Πλατίνα (Platinum) | 0.146 | Kg |
| Ανοξείδωτο ατσάλι (Stainless steel) | 466.1 | Kg |
| Διοξείδιο τιτανίου (Titanium dioxide) | 13.56 | Kg |
| Συνολική μάζα | 528 | Kg |

4.3.1.3 Συμπύεση, Αντίδραση, Καθαρισμός

Όλες οι συσκευές των σταδίων της συμπύεσης, της αντίδρασης και του καθαρισμού έχουν ως υλικό κατασκευής τον ανοξείδωτο χάλυβα και διαστασιολογούνται με βάση την παράλληλη μελέτη του ASPEN της υπεύθυνης επιβλέπουσας της διπλωματικής εργασίας Κα. Κοντού. Επιπλέον πληροφορίες χρειάστηκαν για τον καταλύτη του αντιδραστήρα. Ο Πίνακας 4-9 περιλαμβάνει τις συνιστώσες του κάθε σταδίου μαζί με τα υλικά κατασκευής και τις μάζες. Χρόνος ζωής των συσκευών θεωρήθηκαν τα 20 έτη.

Ο αντιδραστήρας αποτελείται από μεγάλο αριθμό σωλήνων ανοξείδωτου χάλυβα οι οποίοι έχουν ως στόχο της αύξηση της επιφάνειας επαφής μεταξύ του καταλύτη και των αντιδρώντων (CO_2 και H_2). Ο καταλύτης επιταχύνει την αντίδραση των αντιδρώντων και συνίσταται από : οξείδιο του χαλκού (60 wt.%), οξείδιο του ψευδαργύρου (30 wt.%) και οξείδιο του αργιλίου (10 wt.%) με χρόνο ζωής τα 4 χρόνια, ύστερα χρειάζεται αλλαγή του καταλύτη [84].

Παρακάτω εξηγείται ο τρόπος με τον οποίο υπολογίζονται οι μάζες των CuO , ZnO και Al_2O_3 του καταλύτη. Το διάκενο στον αντιδραστήρα, δηλαδή ο χώρος στον οποίο βρίσκεται ο καταλύτης αποτελεί το 40 % του συνολικού του όγκου του. Επομένως γνωρίζοντας τον όγκο του αντιδραστήρα προκύπτει ο συνολικός όγκος του καταλύτη. Υστερα είναι γνωστά τα ποσοστά της μάζας των τριών καταλυτών 60,30 και 10 wt.% αντίστοιχα. Επίσης η πυκνότητα του καταλύτη είναι 1300 kg/m^3 . Επομένως η συνολική μάζα του καταλύτη υπολογίζεται γνωρίζοντας την πυκνότητα και τον όγκο του καταλύτη. Έπειτα από τα ποσοστά μαζών υπολογίζεται η μάζα των CuO , ZnO και Al_2O_3 . Επίσης ο επειδή ο χρόνος ζωής του καταλύτη είναι 4 χρόνια, γίνεται 4 φορές αλλαγή στα 20 χρόνια που λειτουργεί η μονάδα. Επομένως η συνολική μάζα που υπολογίστηκε πολλαπλασιαζόμενη με το 5, είναι η συνολική μάζα καταλύτη που απαιτείται για τα 20 χρόνια λειτουργίας της εγκατάστασης. Ο Πίνακας 4-9 περιλαμβάνει τα υλικά και τις μάζες των επιμέρους υλικών του καταλύτη.

Πίνακας 4-9 Κατάλογος απογραφής υλικών εγκατάστασης.

| | Μέρος εγκατάστασης | Ποσότητα | Υλικά κατασκευής | Μάζα (t) 2023 | Μάζα (t) 2030 | Μάζα (t) 2050 |
|------------|----------------------------|----------|----------------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| Συμπίεση | Συμπιεστής CO2 | 3 | Ανοξείδωτος χάλυβας | 4.75 | 18.4 | 62.2 |
| | Ψύκτης | 2 | Ανοξείδωτος χάλυβας | 0.25 | 4.70 | 17.6 |
| | Συμπιεστής H2 | 1 | Ανοξείδωτος χάλυβας | 9.48 | - | - |
| Αντίδραση | Αντιδραστήρας | 1 | Ανοξείδωτος χάλυβας | 52.5 | 440.3 | 1750 |
| | | | Οξείδιο του χαλκού | 4.7 | 117.4 | 470 |
| | | | Οξείδιο του ψευδαργύρου | 2.33 | 58.7 | 234.9 |
| | | | Οξείδιο του αργιλίου | 0.78 | 19.6 | 78.3 |
| | Συμπιεστής επιστροφής | 1 | Ανοξείδωτος χάλυβας | 2.9 | 13.9 | 60.1 |
| | Εναλλάκτης θερμότητας 1 | 1 | Ανοξείδωτος χάλυβας | 3.18 | 61.7 | 232.4 |
| | Εναλλάκτης θερμότητας 2 | 1 | Ανοξείδωτος χάλυβας | 104.3 | 229.0 | 111.8 |
| | Ψύκτης | 1 | Ανοξείδωτος χάλυβας | 1.59 | 32.6 | 142.5 |
| Καθαρισμός | Δοχείο διαχωρισμού 1 | 1 | Ανοξείδωτος χάλυβας | 5.63 | 26.9 | 141.1 |
| | Δοχείο διαχωρισμού 2 | 1 | Ανοξείδωτος χάλυβας | 1.04 | 3.40 | 9.90 |
| | Αποστακτική στήλη | 1 | Ανοξείδωτος χάλυβας | 24.8 | 112.7 | 444.8 |
| | Αναβραστήρας | 1 | Ανοξείδωτος χάλυβας | 0.95 | 6.20 | 22.0 |

| | | | | | | |
|--------------------------------------|--------------------------------------|---|-----------------------------------|------|-------|-------|
| | Συμπυκνωτής | 1 | Ανοξειδωτος χάλυβας | 1.68 | 28.5 | 123.4 |
| Υπόλοιπα μέρη της εγκατάστασης | Καλώδια | | Καλώδια | 13.2 | 93.2 | 376.2 |
| | Σωλήνες | | Ανοξειδωτος χάλυβας | 33.0 | 233.1 | 941 |
| | Βοηθητικά και ηλεκτρονικά μέρη | | Υλικά ηλεκτρονικών συσκευών | 5.5 | 38.9 | 157 |
| | Τσιμέντο | | Τσιμέντο | 2.20 | 15.5 | 62.7 |

4.3.2 Μεταφορές

Όσον αφορά τις μεταφορές έγιναν κάποιες απαραίτητες παραδοχές καθώς δεν ήταν γνωστά τα ακριβή δεδομένα.

- Οι μεταφορές οι οποίες αφορούν μεγάλες αποστάσεις, δηλαδή μεγαλύτερες των 1000 km θεωρείται ότι πραγματοποιούνται με χρήση φορτηγού, ωφέλιμου φορτίου 16 - 32 τόνους η μεγαλύτερου των 32 τόνων αν αυτό είναι απαραίτητο.
- Τα κύρια μέρη της εγκατάστασης τα οποία απαιτούν τεχνογνωσία και αντίστοιχη βιομηχανία θεωρείται ότι κατασκευάζονται στην Γερμανία και η απόσταση μεταφοράς λαμβάνεται ίση με 2000 km (google maps)
- Πιο απλές κατασκευές όπως η βάση από τσιμέντο για τον ηλεκτρολύτη θεωρείται ότι λαμβάνουν χώρα στην Ελλάδα σε απόσταση 200 km από την μονάδα.
- Η συντήρηση του εξοπλισμού γίνεται με μεταφορά 200 km με μικρό φορτηγό ωφέλιμου φορτίου 3.5-7.5 τόνων.
- Ο ηλεκτρολύτης ο οποίος έχει εναπομείναντα χρόνο ζωής μεταφέρεται σε κοντινή μονάδα 200km για να λειτουργήσει και μετά το τέλος λειτουργίας της μονάδας παραγωγής μεθανόλης με χρήση φορτηγού, ωφέλιμου φορτίου μεγαλύτερου από 32 τόνους.
- Ο χώρος διαχείρισης των αποβλήτων, θεωρείται ότι απέχει 100 km από τον χώρο της εγκατάστασης, ενώ γίνεται χρήση απορριμματοφόρου μεγίστου φορτίου 21 τόνων για την μεταφορά.

4.3.3 Φάση Λειτουργίας

4.3.3.1 Εισαγωγή

Αρχικά η εγκατάσταση θεωρείται ότι λειτουργεί το 70 % του χρόνου, παράγοντας μεθανόλη. Ως χρόνος ζωής της μονάδας παραγωγής μεθανόλης θεωρούνται τα 20 έτη. Εξετάζονται τρία διαφορετικά μεγέθη παραγωγής 1.8, 48 και 206.5 τόνοι μεθανόλης ανά ώρα, στα οποία η ισχύς της ηλεκτροδότησης είναι 20, 500 και 2000 MW. Το μέγεθος της πρώτης μονάδας είναι

το μόνο ρεαλιστικό για το έτος 2023, ενώ τα επόμενα δύο θα είναι δυνατόν πιθανά να πραγματοποιηθούν τα έτη 2030 και 2050 αντίστοιχα. Το απαιτούμενο διοξείδιο του άνθρακα για την παραγωγή της μεθανόλης θεωρείται ότι δεσμεύεται από ηλεκτροπαραγωγό σταθμό βιομάζας, λιγνίτη ή φυσικού αερίου ισχύος 375MW. Οι ηλεκτρικές ανάγκες του συστήματος καλύπτονται από την εκάστοτε πηγή ενέργειας ανάλογα με το σενάριο. Θεωρείται πως οι σταθμοί παραγωγής ενέργειας, οι οποίοι παρέχουν ενέργεια στο σύστημα, ενώ λειτουργούν με CF μεγαλύτερο του 0.7, δίνουν ενέργεια στο σύστημα μόνο όσο αυτό λειτουργεί και τις υπόλοιπες ώρες την διανέμουν σε άλλον καταναλωτή. Οι θερμικές ανάγκες του συστήματος είναι σχετικά μικρές και θεωρείται ότι καλύπτονται εσωτερικά από το σύστημα, από την θερμική ενέργεια που πρέπει να απαχθεί από τον ηλεκτρολύτη, ο οποίος μετατρέπει μέρος της ηλεκτρικής ενέργειας εισόδου σε θερμική (περισσότερο από το 10 % της ενέργειας εισόδου [85]), καθώς και από τους ηλεκτροπαραγωγούς σταθμούς από τους οποίους δεσμεύεται το CO₂ και τέλος από την εξώθερμη αντίδραση της παραγωγής μεθανόλης.

4.3.3.2 Πηγές Ενέργειας

Οι ενεργειακές απαιτήσεις των διάφορων μερών της εγκατάστασης ανάγονται σε MWh ανά τόνο μεθανόλης. Οι πηγές ενέργειας που χρησιμοποιούνται και τα σετ δεδομένων για την μοντελοποίηση της παραγωγής ενέργειας από αυτές είναι τα εξής :

- Σταθμός Βιομάζας : Electricity, biomass at power plant/US.
- Λιγνιτικός σταθμός : Electricity, high voltage {GR}| electricity production, lignite | Cut-off, U
- Σταθμός Φυσικού αερίου : Electricity, high voltage {GR}| electricity production, natural gas, conventional power plant | Cut-off, U
- Δίκτυο : Electricity, medium voltage {GR}| market for | Cut-off, U
- Υδροηλεκτρικός σταθμός : Electricity, high voltage {GR}| electricity production, hydro, run-of-river | Cut-off, U
- Φωτοβολταϊκό πάρκο : Electricity, low voltage {IT}| electricity production, photovoltaic, 570 kWp open ground installation, multi-Si | Cut-off, U
- Αιολικό πάρκο : Electricity, high voltage {GR}| electricity production, wind, >3MW turbine, onshore | Cut-off, U
- Πράσινο ενεργειακό μείγμα: 50 % από αιολική ενέργεια, 25 % από ηλιακή ενέργεια και 25 % υδροηλεκτρική ενέργεια.

Κάθε φορά που κάποια συσκευή απαιτεί ενέργεια, αυτή προσφέρεται από το εκάστοτε σύστημα παραγωγής ενέργειας. Σε κάθε MWh που παράγεται ώστε να προσφερθεί στην υπό εξέταση μονάδα, εμπεριέχεται και ο αντίστοιχος περιβαλλοντικό αντίκτυπος της παραγωγής αυτής της MWh από την εκάστοτε πηγή ενέργειας. Για παράδειγμα Α/Γ η οποία έχει χρόνο ζωής τα 25 χρόνια και στο διάστημα αυτό παράγει 150000 MWh, σε κάθε MWh που προσφέρει στην παρούσα μονάδα, περιέχεται και το 1/150000 του αντίκτυπου του κύκλου ζωής της Α/Γ. Επομένως για κάθε 150000 MWh από Α/Γ που χρησιμοποιεί η υπό μελέτη μονάδα, επωμίζεται το περιβαλλοντικό αποτύπωμα μια τέτοιας Α/Γ.

Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας οι οποίες έχουν μεταβλητή παραγωγή ενέργειας, θεωρείται ότι είναι αφοσσιωμένες στην πρόσδοση ενέργειας στο σύστημα. Η παραγωγή ενέργειας από εργοστάσιο βιομάζας και από Φ/Β πάρκο μοντελοποιούνται με σετ δεδομένων που αφορούν άλλες χώρες (Η.Π.Α και Ιταλία αντίστοιχα), διότι δεν υπάρχει αντίστοιχο σετ για την Ελλάδα.

Η ολική ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει στην Ιταλία σε οριζόντιο επίπεδο είναι 1471 kWh/m² [86] ενώ στην Ελλάδα κυμαίνεται από 1400 έως 1800 kWh/m² [87]. Επομένως το σετ δεδομένων για την Ιταλία είναι αρκετά αντιπροσωπευτικό. Επίσης ο περιβαλλοντικός αντίκτυπος του εργοστασίου βιομάζας θεωρείται ότι δεν επηρεάζεται σημαντικά ανάλογα με την τοποθεσία.

Παρακάτω παρουσιάζεται ο τρόπος με τον οποίο το Simapro μοντελοποιεί τις εγκαταστάσεις που παράγουν ενέργεια.

- Λιγνιτικός σταθμός

Ο σταθμός μοντελοποιείται με βάση δεδομένα σταθμών 100 και 500 MW. Η ισχύς του προκύπτει 380 MW και ο χρόνος ζωής 40 έτη.

- Σταθμός φυσικού αερίου

Πρόκειται για σταθμό ισχύος 300 MW και χρόνου ζωής 40 ετών.

- Δίκτυο

Πρόκειται για το τρέχον ενεργειακό μίγμα της Ελλάδας.

- Υδροηλεκτρικός σταθμός

Παραγωγή ενέργειας από σταθμό ο οποίος παράγει 15484 GWh ετησίως και έχει χρόνο ζωής τα 80 έτη για τα κύρια κατασκευαστικά του μέρη και 40 χρόνια για τα υπόλοιπα.

- Φωτοβολταϊκό πάρκο

Πρόκειται για φωτοβολταϊκό πάρκο ισχύος 570 kWp και χρόνου ζωής 30 ετών.

- Αιολικό πάρκο

Μοντελοποιείται με Α/Γ ισχύος 4.5 MW και συνδέσεις με το δίκτυο για Α/Γ ισχύος 4.5 MW. Ο χρόνος ζωής των Α/Γ λαμβάνεται ίσος με 25 έτη, ενώ των συνδέσεων με το δίκτυο ίσος με 20 έτη.

4.3.3.3 Ηλεκτρολύτες

Οι PEM ηλεκτρολύτες λειτουργούν χρησιμοποιώντας ηλεκτρισμό και νερό και παράγοντας οξυγόνο και υδρογόνο. Ανάλογα με το σενάριο χρησιμοποιούν ηλεκτρισμό από διαφορετική πηγή ενέργειας κάθε φορά. Οι ηλεκτρικές ανάγκες των ηλεκτρολυτών ανά κιλό παραγόμενου υδρογόνου μεταβάλλονται σύμφωνα με τις προβλέψεις για την απόδοση των μελλοντικών ηλεκτρολυτών. Συγκεκριμένα από τις προβλέψεις προκύπτει ότι η ηλεκτρόλυση με PEM ηλεκτρολύτη απαιτεί 55 kWh/kg το 2020, 52 kWh/kg το 2024, 48 kWh/kg το 2030 [73] και 43.8 kWh/kg το 2050 [88]. Για το έτος 2023 η ηλεκτρική κατανάλωση λαμβάνεται ίση με 52.75 kWh/kg.

Με βάση αυτές τις προβλέψεις και τις απαιτήσεις για υδρογόνο προκύπτει η μοντελοποίηση των ηλεκτρικών αναγκών. Συγκεκριμένα ανά τόνο μεθανόλης απαιτούνται 0.21 τόνοι

υδρογόνο. Επίσης η ηλεκτρόλυση παράγει 1 μολ H₂ και 0.5 μολ O₂, χρησιμοποιώντας 1 μολ H₂O. Επομένως λαμβάνοντας υπόψη τις ατομικές μάζες του H₂ και του O₂ και την μοριακή μάζα του H₂O προκύπτει ότι ο ηλεκτρολύτης ανά τόνο μεθανόλης παράγει 0.21 τόνους υδρογόνου, 1.67 τόνους οξυγόνου και χρησιμοποιεί 1.88 τόνους απιονισμένου νερού. Ωστόσο σύμφωνα με την SIEMENS ο Silyzer 300 χρησιμοποιεί 10 kg νερού ανά κιλό παραγόμενου υδρογόνου, άρα ανά τόνο μεθανόλης χρησιμοποιούνται 2.08 τόνοι απιονισμένου νερού [81]. Τέλος ανά τόνο μεθανόλης προκύπτουν οι ανάγκες της ηλεκτρόλυσης είναι 10.97, 10 και 9.12 MWh.

- Οι ηλεκτρολύτες απαιτούν απιονισμένο νερό υψηλής καθαρότητας, για την διαφύλαξη της ασφαλούς λειτουργίας τους [89].
- Το υδρογόνο καθώς καταναλώνεται εσωτερικά στο σύστημα (στον αντιδραστήρα) δεν μοντελοποιείται ως προϊόν της ηλεκτρόλυσης.
- Η παραγωγή οξυγόνου μοντελοποιείται με δύο διαφορετικούς τρόπους, στα περισσότερα σενάρια γίνεται η παραδοχή ότι το οξυγόνο δεν χρησιμοποιείται και ελευθερώνεται στο περιβάλλον ενώ σε ένα σενάριο για το έτος 2030 εξετάζεται η περίπτωση αξιοποίησης του.
- Στο σενάριο αξιοποίησης του οξυγόνου θεωρείται ότι αποφεύγεται η παραγωγή του οξυγόνου με τον πιο κλασικό τρόπο, τον κρυογονικό διαχωρισμό αέρα. Για την υπόθεση αυτή, δεν έχει μοντελοποιηθεί λόγω έλλειψης δεδομένων το σύστημα συμπίεσης, ψύξης και αποθήκευσης του, ωστόσο οι ηλεκτρικές και θερμικές ανάγκες των συστημάτων με παράλληλη έρευνα στο ASPEN από την υπεύθυνη επιβλέπουσα Κα. Κοντού υπολογίστηκε ότι λαμβάνουν μικρό μέρος των συνολικών αναγκών.

4.3.3.4 Συμπιεστές

Οι συμπιεστές λειτουργούν χρησιμοποιώντας ηλεκτρισμό ο οποίος προέρχεται από την εκάστοτε πηγή ενέργειας ανάλογα με το σενάριο. Ο Πίνακας 4-10 περιλαμβάνει τις ηλεκτρικές ισχύς των συμπιεστών. Οι ηλεκτρικές ανάγκες ανά τόνο μεθανόλης υπολογίζονται διαιρώντας την ισχύ τους με τον αριθμό των τόνων παραγόμενης μεθανόλης για το κάθε σενάριο.

Πίνακας 4-10 Κατάλογος ηλεκτρικών καταναλώσεων συμπιεστών.

| | Μέρος εγκατάστασης | Ποσότητα | Ηλεκτρική ισχύς (MW) 2023 | Ηλεκτρική ισχύς (MW) 2030 | Ηλεκτρική ισχύς (MW) 2050 |
|----------|----------------------------|----------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
| Συμπίεση | Συμπιεστής CO ₂ | 3 | 0.083 | 2.2 | 9.4 |
| | Συμπιεστής H ₂ | 1 | 0.164 | - | - |
| | Συμπιεστής επιστροφής | 1 | 0.013 | 0.5 | 2.2 |

Όσον αφορά την χρήση λιπαντικού για τον κάθε συμπιεστή, αυτή υπολογίζεται με αναγωγή με βάση συμπιεστή ισχύος 1000 hp, ο οποίος καταναλώνει 2000 γαλόνια ετησίως. Η κατανάλωση προκύπτει 7.6 τόνοι ετησίως ανά MW συμπιεστή [90].

4.3.3.5 Υπόλοιπα Μέρη της Εγκατάστασης, Υποπροϊόντα και Εκπομπές

Όσον αφορά τον αντιδραστήρα το διοξείδιο του άνθρακα που χρησιμοποιεί ο αντιδραστήρας, μοντελοποιείται με την δέσμευση αυτού από τα καυσαέρια, επομένως τον αντίκτυπο για το διοξείδιο του άνθρακα δεν τον επωμίζεται και ο αντιδραστήρας. Τα υπόλοιπα μέρη της εγκατάστασης έχουν μόνο θερμικές ανάγκες οι οποίες είναι χαμηλές και θεωρείται ότι καλύπτονται εσωτερικά από το σύστημα και δεν μοντελοποιούνται. Επίσης έχουν κάποιες ανάγκες νερού ωστόσο το σύστημα νερού θεωρείται κλειστό και χωρίς απώλειες, επομένως η μάζα εισόδου νερού ισούται με την μάζα εξόδου και δεν μοντελοποιείται. Από το πρώτο δοχείο διαχωρισμού, διαχωρίζονται τα υγρά από τα αέρια και εκπέμπονται στο περιβάλλον ποσότητες CO, H₂, CO₂ και MeOH, ενώ στο δεύτερο δοχείο διαχωρίζεται το νερό από την μεθανόλη. Το νερό στην συνέχεια καθαρίζεται, απιονίζεται και επιστρέφει στον ηλεκτρολύτη, ώστε να μειωθούν οι συνολικές απαιτήσεις νερού της εγκατάστασης. Ο Πίνακας 4-11 περιλαμβάνει τις ποσότητες των ρύπων και του νερού (υποπροϊόν).

Πίνακας 4-11 Υποπροϊόντα και εκπομπές από την σύνθεση της μεθανόλης.

| Παραπροϊόν | 2023 | 2030 | 2050 | Μονάδες |
|------------------|--------|--------|--------|-----------|
| CO | 9.85 | 9.57 | 9.85 | kg/t MeOH |
| H ₂ | 18.22 | 17.86 | 17.52 | kg/t MeOH |
| CO ₂ | 120.97 | 118.66 | 115.86 | kg/t MeOH |
| H ₂ O | 574.74 | 574.58 | 574.82 | kg/t MeOH |
| MeOH | 13.92 | 13.91 | 13.89 | kg/t MeOH |

4.3.3.6 Δέσμευση Διοξειδίου του Άνθρακα

Η δέσμευση του CO₂ έχει τόσο ηλεκτρικές όσο και θερμικές ανάγκες. Οι ηλεκτρικές ανάγκες είναι 54 kJ/kg CO₂, δηλαδή 9.9 kWh ανά τόνο παραγόμενης μεθανόλης. Οι θερμικές ανάγκες αντίστοιχα είναι 3134 kJ/kg CO₂, δηλαδή 574 kWh ανά τόνο παραγόμενης μεθανόλης. Οι ηλεκτρικές ανάγκες καλύπτονται από την εκάστοτε πηγή ηλεκτρικής ενέργειας του συστήματος και οι θερμικές όπως εξηγήθηκε και νωρίτερα, από την πλεονάζουσα θερμική ενέργεια του συστήματος. Επίσης υπάρχουν ανάγκες για έναν διαλύτη ο οποίος απορροφά το CO₂ και στην προκειμένη περίπτωση είναι μία αμίνη, συγκεκριμένα απαιτούνται 2 kg μονοαιθανολαμίνης (MEA) ανά τόνο CO₂, δηλαδή 3 kg/τον μεθανόλης [91]. Η χρήση MEA είναι η πιο κοινή επιλογή για δέσμευση CO₂ με μετά-καύση [92].

Το CO₂ θεωρείται βιογενούς προελεύσεως στην περίπτωση του σταθμού βιομάζας και μόνο. Ακόμη και αν η προέλευση του CO₂ είναι βιογενής, λαμβάνεται υπόψη το περιβαλλοντικό αποτύπωμα της δέσμευσής του [93]. Εξετάζεται ωστόσο και σενάριο (εγκατάσταση του 2030, 2050) στο οποίο η δέσμευση του βιογενούς CO₂ θεωρείται ότι δεν επιδρά θετικά αντιθέτως αρνητικά λόγω των καταναλώσεων για την δέσμευσή του.

4.3.4 Τέλος Κύκλου Ζωής

Όσον αφορά το τέλος κύκλου ζωής του έργου, θεωρείται ότι γίνονται ενέργειες με γνώμονα την προστασία του περιβάλλοντος, και λόγω της φύσης του έργου αλλά και του ότι η τότε κοινωνία θα δίνει ακόμα περισσότερη βάση στην κυκλική οικονομία και στην προστασία του περιβάλλοντος. Επομένως για όποιο υλικό είναι δυνατόν (μέταλλα, πλαστικά) επιλέγεται ανακύκλωσή του. Ωστόσο για όποιο υλικό δεν είναι δυνατή η ανακύκλωση μοντελοποιείται η απόθεση του σε χωματερή, αφού γίνουν οι απαραίτητες διεργασίες καθαρισμού.

4.3.5 Σενάρια υπό Μελέτη

Εξετάζεται ο αντίκτυπος των διάφορων μερών της εγκατάστασης, για την παραγωγή ενός τόνου μεθανόλης (λειτουργική μονάδα). Αυτό πραγματοποιείται με διάφορα σενάρια, αλλάζοντας διαφορετική συνιστώσα κάθε φορά.

- Αρχικά εξετάζεται το σενάριο βάσης το οποίο έχει αναλυθεί προηγουμένως με παραγωγή μεθανόλης 206.5 τόνους την ώρα (ηλεκτρόλυση 2000 MW)
- Αλλαγή μεγέθους παραγωγής σε 48 και 1.8 τόνους (μονάδες ετών 2030 και 2023 αντίστοιχα)
- Επιλογή διαφορετικής πηγή προέλευσης της ηλεκτρικής ενέργειας
- Υπόθεση ότι η δέσμευση βιογενούς CO₂ δεν φέρει κανένα όφελος
- Επιλογή χρησιμοποίησης του παραγόμενου οξυγόνου από τον ηλεκτρολύτη, έναντι απελευθέρωσης του στην ατμόσφαιρα.

5. Αποτελέσματα

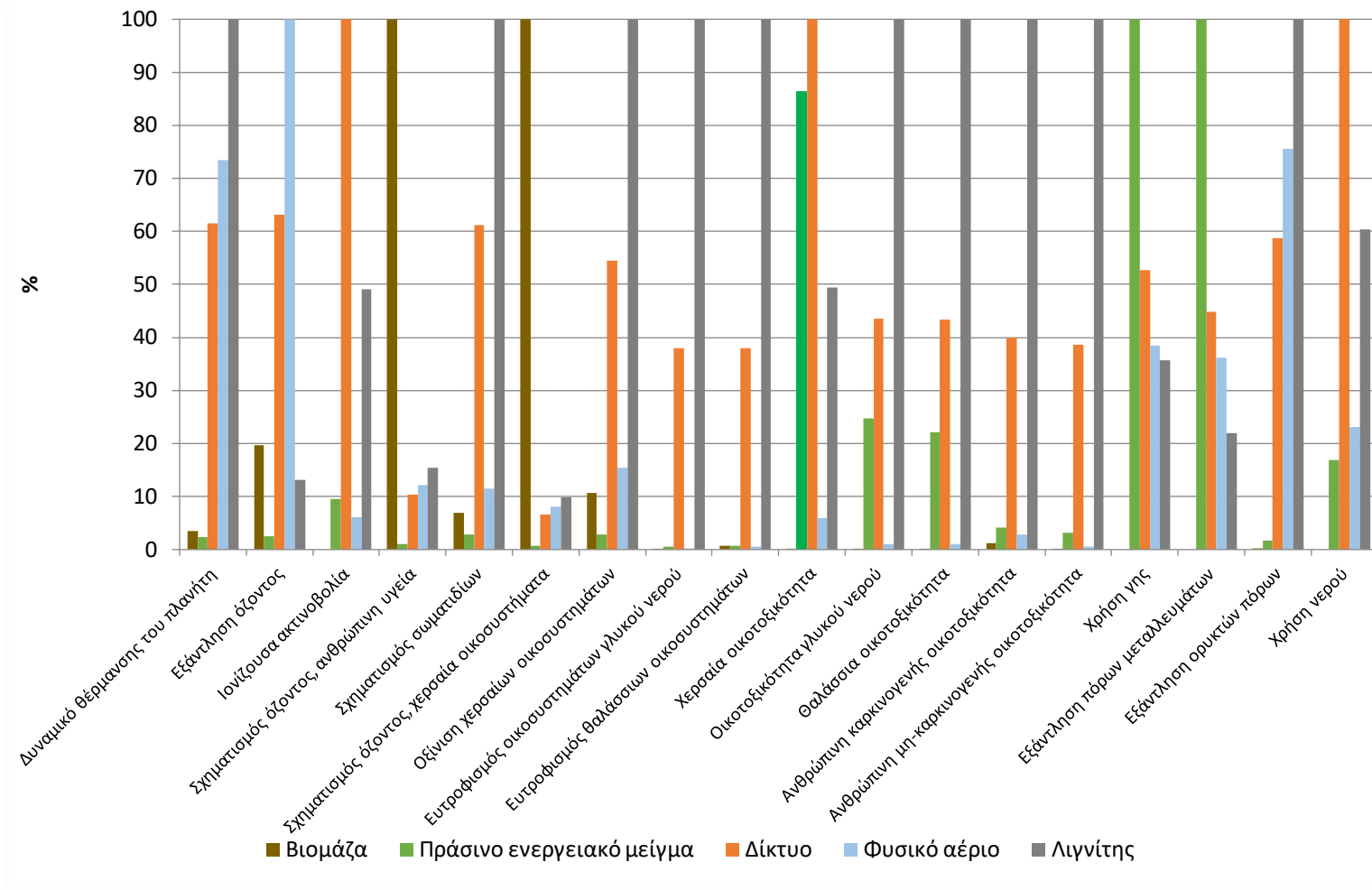
Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζονται και σχολιάζονται τα αποτελέσματα της ανάλυσης κύκλου ζωής για τα διάφορα σενάρια του συστήματος. Τα αποτελέσματα προκύπτουν με βάση την παραγωγή ενός τόνου μεθανόλης, δηλαδή την λειτουργική μονάδα.

5.1 Γενικές Συγκρίσεις

5.1.1 Πηγές ενέργειας

Αρχικά γίνεται η σύγκριση μεταξύ των πηγών ενέργειας από τις οποίες καλύπτονται οι ηλεκτρικές ανάγκες της μονάδας. Στα διαγράμματα ο όρος ΑΠΕ ισοδυναμεί με το πράσινο ενεργειακό μείγμα που αναλύθηκε νωρίτερα και αποτελείται από 50 % αιολική ενέργεια, 25 % ηλιακή και 25 % υδροηλεκτρική. Από τα διαγράμματα προκύπτει ότι το υψηλότερο δυναμικό θέρμανσης του πλανήτη, όπως είναι αναμενόμενο το έχει η παραγωγή ενέργειας από λιγνιτικό σταθμό ενώ το χαμηλότερο η παραγωγή ενέργειας από ΑΠΕ. Η ενέργεια από το δίκτυο βρίσκεται ενδιάμεσα, το οποίο είναι λογικό καθώς είναι μίξη των υπολοίπων πηγών εφόσον αφορά το ενεργειακό μείγμα της χώρας. Οι ΑΠΕ φαίνεται να έχουν υψηλό αντίκτυπο όσον αφορά την χερσαία οικοτοξικότητα, την χρήση γης και την εξάντληση πόρων μεταλλευμάτων, ενώ η χρήση ενέργειας από βιομάζα προκαλεί τον σχηματισμό όζοντος.

Παρακάτω παρουσιάζεται το Διάγραμμα 5-1 περιβαλλοντικού αντικτύπου, καθώς και ο Πίνακας 5-1 με την απόλυτη τιμή του δείκτη της υπερθέρμανσης του πλανήτη (GWP) ανά παραγόμενη MWh για τις διάφορες πηγές ενέργειας.



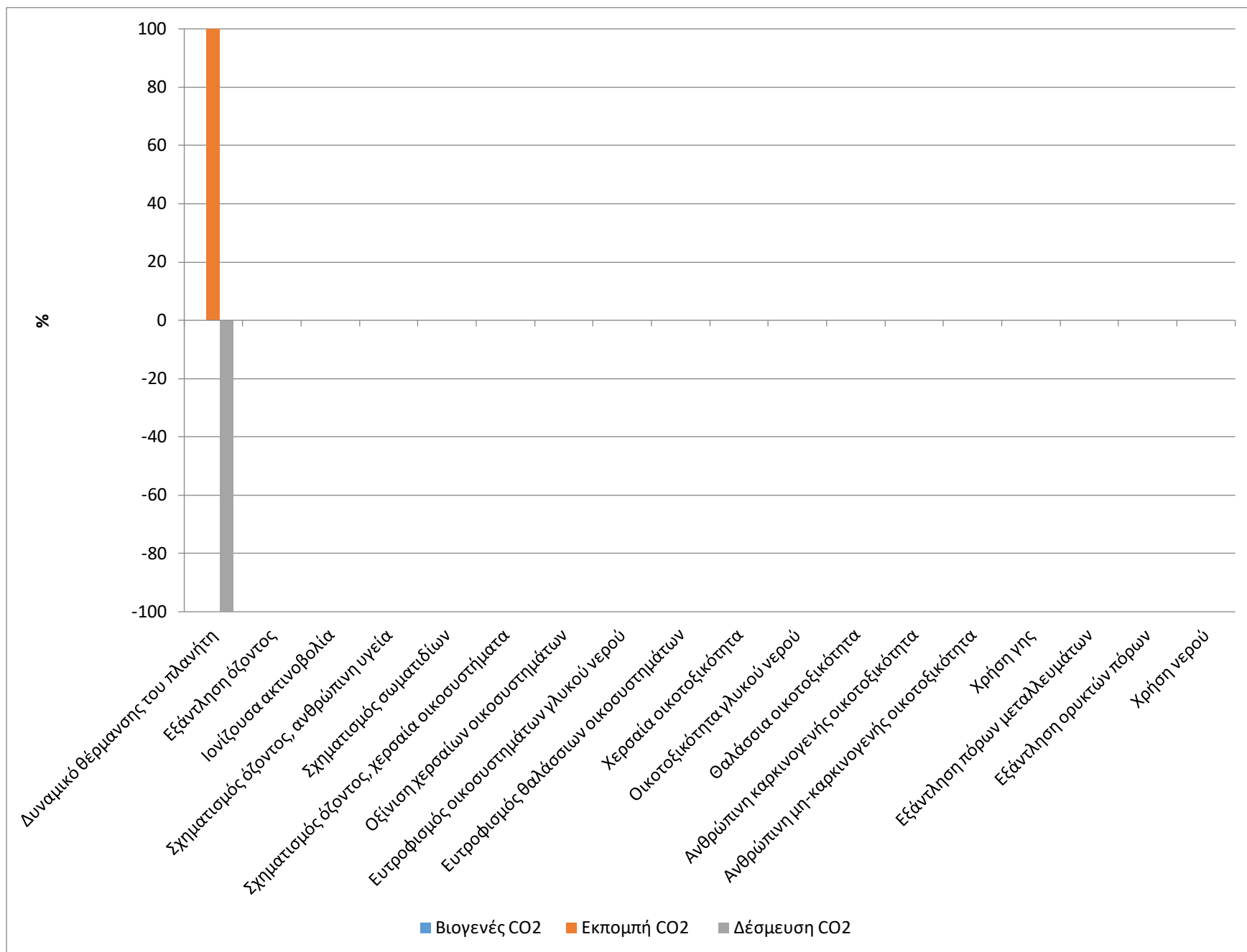
Διάγραμμα 5-1 Συγκριτικά αποτελέσματα για την παραγωγή 1 MWh από τις υπό εξέταση πηγές ενέργειας.

Πίνακας 5-1 Τιμή GWP για την παραγωγή 1 MWh από τις υπό εξέταση πηγές ενέργειας.

| Κατηγορία επιπτώσεων | Μονάδα | Βιομάζα | Πράσινο ενεργειακό μείγμα | Δίκτυο | Φυσικό αέριο | Λιγνίτης |
|--------------------------------|-----------------------|---------|---------------------------|--------|--------------|----------|
| Δυναμικό θέρμανσης του πλανήτη | kg CO ₂ eq | 46 | 31 | 800 | 956 | 1301 |

5.1.2 Εκπομπές Διοξειδίου του Άνθρακα

Το περιβαλλοντικό φορτίο που φέρει το CO₂ διαφέρει ανάλογα με την προέλευση του, συγκεκριμένα όταν είναι βιογενούς προελεύσεως δεν φέρει κανένα βάρος, ενώ όταν είναι ορυκτής προελεύσεως φέρει όλο το βάρος. Στην ανάλυση κύκλου ζωής, όσον αφορά την δέσμευση του CO₂, ο αντίκτυπος της αποφυγής εκπομπής CO₂ θεωρείται θετικός ανεξαρτήτως προέλευσης CO₂. Με αυτό το τρόπο μοντελοποιείται η δέσμευση του CO₂ ωστόσο εξετάζεται και ένα σενάριο στο οποίο η δέσμευση βιογενούς CO₂, έχει ουδέτερο αντίκτυπο. Παρακάτω παρουσιάζεται το Διάγραμμα 5-2 του περιβαλλοντικού αντικτύπου, καθώς και ο Πίνακας 5-2 με την απόλυτη τιμή του δείκτη της υπερθέρμανσης του πλανήτη (GWP) ανά τόνο CO₂ για το φορτίο που φέρει το βιογενές CO₂, η εκπομπή CO₂ και η δέσμευση CO₂.



Διάγραμμα 5-2 Συγκριτικά αποτελέσματα για το περιβαλλοντικό φορτίο που φέρει το βιογενές CO2, η εκπομπή CO2 και η δέσμευση CO2.

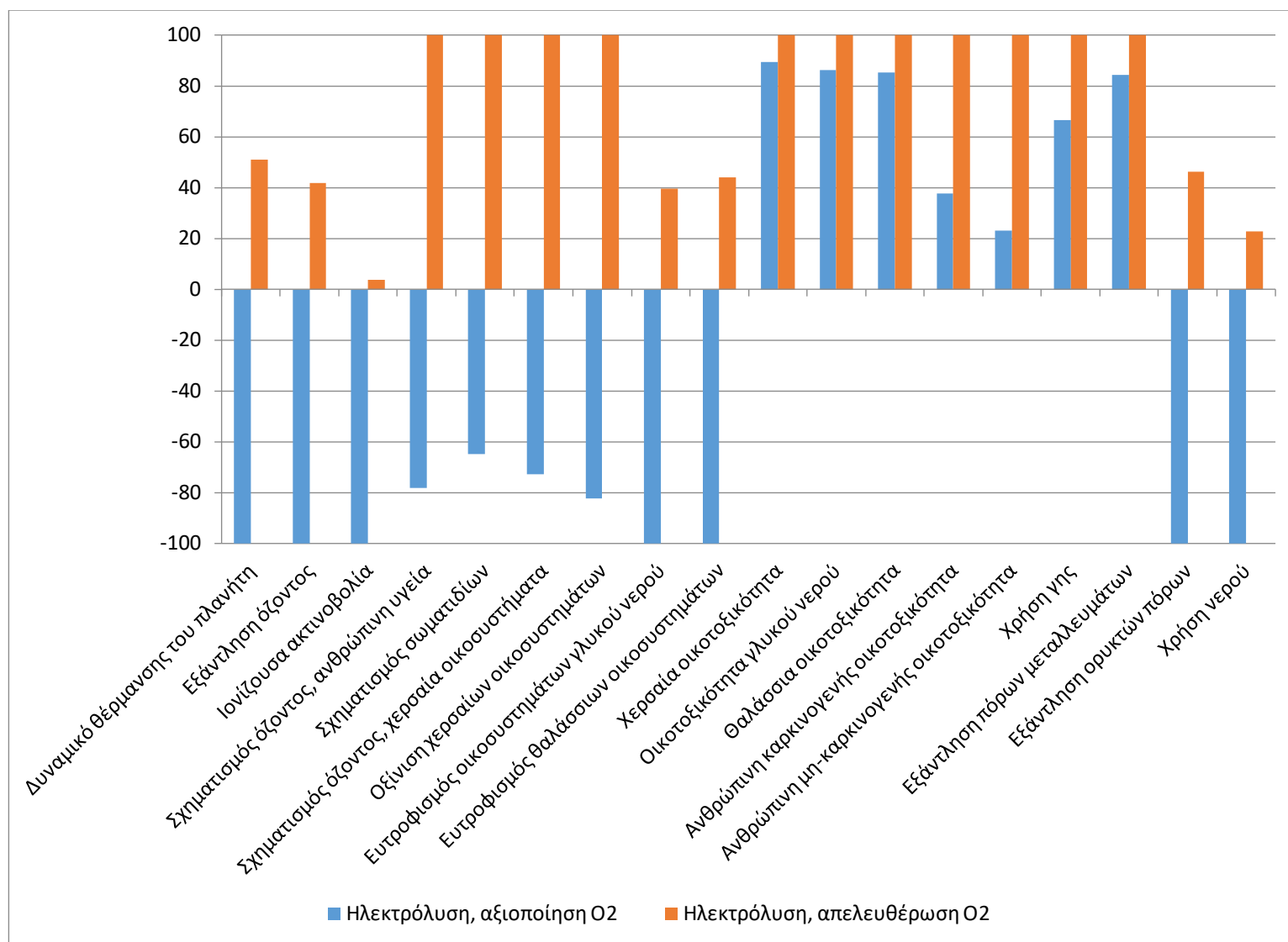
Πίνακας 5-2 Τιμή GWP για το περιβαλλοντικό φορτίο που φέρει το βιογενές CO₂, η εκπομπή CO₂ και η δέσμευση CO₂.

| Κατηγορία επιπτώσεων | Μονάδα | Βιογενές CO ₂ | Εκπομπή CO ₂ | Δέσμευση CO ₂ |
|--------------------------------|------------------------|--------------------------|-------------------------|--------------------------|
| Δυναμικό θέρμανσης του πλανήτη | kg CO ₂ -eq | 0 | 1000 | -1000 |

5.1.3 Οξυγόνο Ηλεκτρόλυσης

Όσον αφορά το οξυγόνο που παράγεται από την ηλεκτρόλυση, όπως αναφέρθηκε νωρίτερα επιλέγεται η εξέταση δύο σεναρίων. Στο βασικό σενάριο το οξυγόνο απελευθερώνεται στο περιβάλλον ενώ εξετάζονται και κάποια σενάρια στα οποία το οξυγόνο αξιοποιείται (ιατρικές, βιομηχανικές χρήσεις) και επομένως αποφεύγεται η παραγωγή του με την κυρίαρχη μέθοδο του κρυογονικού διαχωρισμού του αέρα. Η αποφυγή παραγωγής του με την μέθοδο αυτή μειώνει τον περιβαλλοντικό αντίκτυπο.

Παρακάτω παρουσιάζεται το Διάγραμμα 5-3 του περιβαλλοντικού αντικτύπου, καθώς και ο Πίνακας 5-3 με την απόλυτη τιμή του δείκτη της υπερθέρμανσης του πλανήτη (GWP) ανά τόνο MeOH για την λειτουργία του ηλεκτρολύτη της μονάδας του έτους 2030, με κάλυψη των ηλεκτρικών αναγκών από ΑΠΕ για τα δύο σενάρια σχετικά με το οξυγόνο.



Διάγραμμα 5-3 Συγκριτικά αποτελέσματα για την λειτουργία του ηλεκτρολύτη της μονάδας του έτους 2030 με κάλυψη των αναγκών από ΑΠΕ για απελευθέρωση και χρήση του οξυγόνου ανά τόνο παραγόμενης μεθανόλης.

Πίνακας 5-3 Τιμή GWP για την λειτουργία του ηλεκτρολύτη της μονάδας του έτους 2030 με κάλυψη των αναγκών από ΑΠΕ για απελευθέρωση και χρήση του οξυγόνου ανά τόνο παραγόμενης μεθανόλης.

| Κατηγορία επιπτώσεων | Μονάδα | Ηλεκτρόλυση, αξιοποίηση O ₂ | Ηλεκτρόλυση, απελευθέρωση O ₂ |
|--------------------------------|------------------------|--|--|
| Δυναμικό θέρμανσης του πλανήτη | kg CO ₂ -eq | -608 | 311 |

5.2 Αποτελέσματα Σεναρίου Αναφοράς

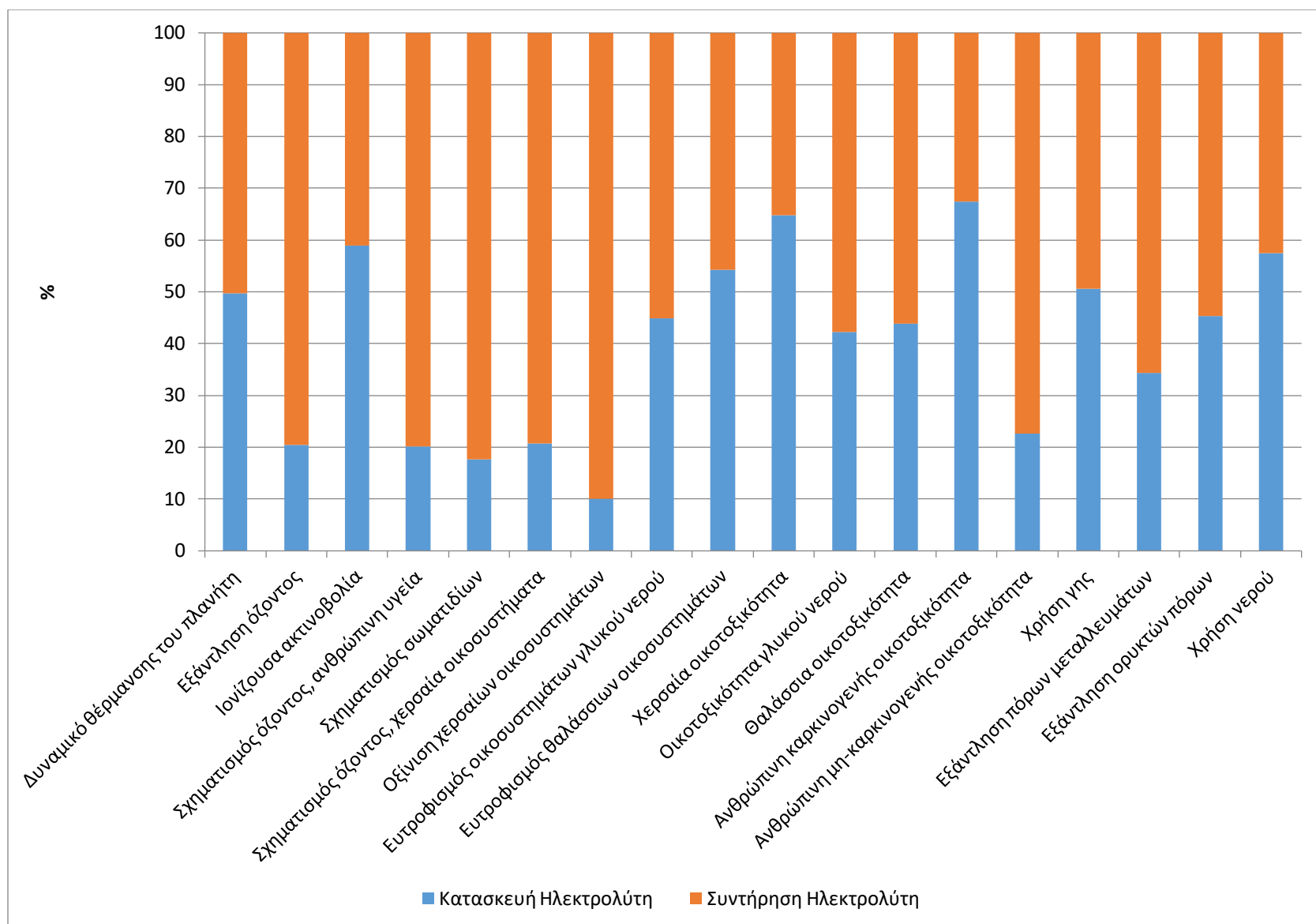
Το σενάριο αναφοράς υπενθυμίζεται πως αφορά την μεγαλύτερη μονάδα υπό εξέταση, η οποία παράγει 206.5 t/h μεθανόλης όσο λειτουργεί η μονάδα και ο συντελεστής CF είναι 0.7, ενώ χρησιμοποιεί δύο PEM ηλεκτρολύτες ισχύος 1000 MW. Παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του περιβαλλοντικού αντικτύπου της εγκατάστασης του σεναρίου αναφοράς για την παραγωγή ενός τόνου μεθανόλης. Ο αντίκτυπος προκύπτει από το άθροισμα του αποτυπώματος των διαφόρων σταδίων της εγκατάστασης από την ηλεκτρόλυση και την δέσμευση του CO₂ μέχρι και τον καθαρισμό της μεθανόλης, με όλα τα ενδιάμεσα στάδια. Κάθε στάδιο φέρει τον περιβαλλοντικό αντίκτυπο για τις πρώτες ύλες, τις μεταφορές, τις κατεργασίες και συναρμολογήσεις, την συντήρηση, την λειτουργία και τις διεργασίες σχετικά με το τέλος ζωής της εγκατάστασης. Οι διεργασίες που σχετίζονται με το τέλος ζωής της εγκατάστασης συνοπολογίζονται στο στάδιο της κατασκευής και συντήρησης, καθώς για κάθε υλικό που χρησιμοποιείται, αυτομάτως επιλέγεται και ο τρόπος με τον οποίο θα γίνει η απόθεση του. Για τον υπολογισμό του συνολικού αντικτύπου, τα στάδια της συμπίεσης, της αντίδρασης, του καθαρισμού, τα βοηθητικά μέρη της εγκατάστασης καθώς και τα υποπροϊόντα της σύνθεσης ομαδοποιούνται (σύνθεση μεθανόλης) ώστε να είναι πιο ευανάγνωστα τα διαγράμματα. Το στάδιο της ηλεκτρόλυσης θεωρείται επίσης ξεχωριστό κομμάτι, όπως και αυτό της δέσμευσης του CO₂. Τέλος η αποφυγή εκπομπής CO₂ (από την δέσμευση), παρουσιάζεται ως βασική ροή του συστήματος.

5.2.1 Αντίκτυπος Κατασκευής και Συντήρησης της Εγκατάστασης

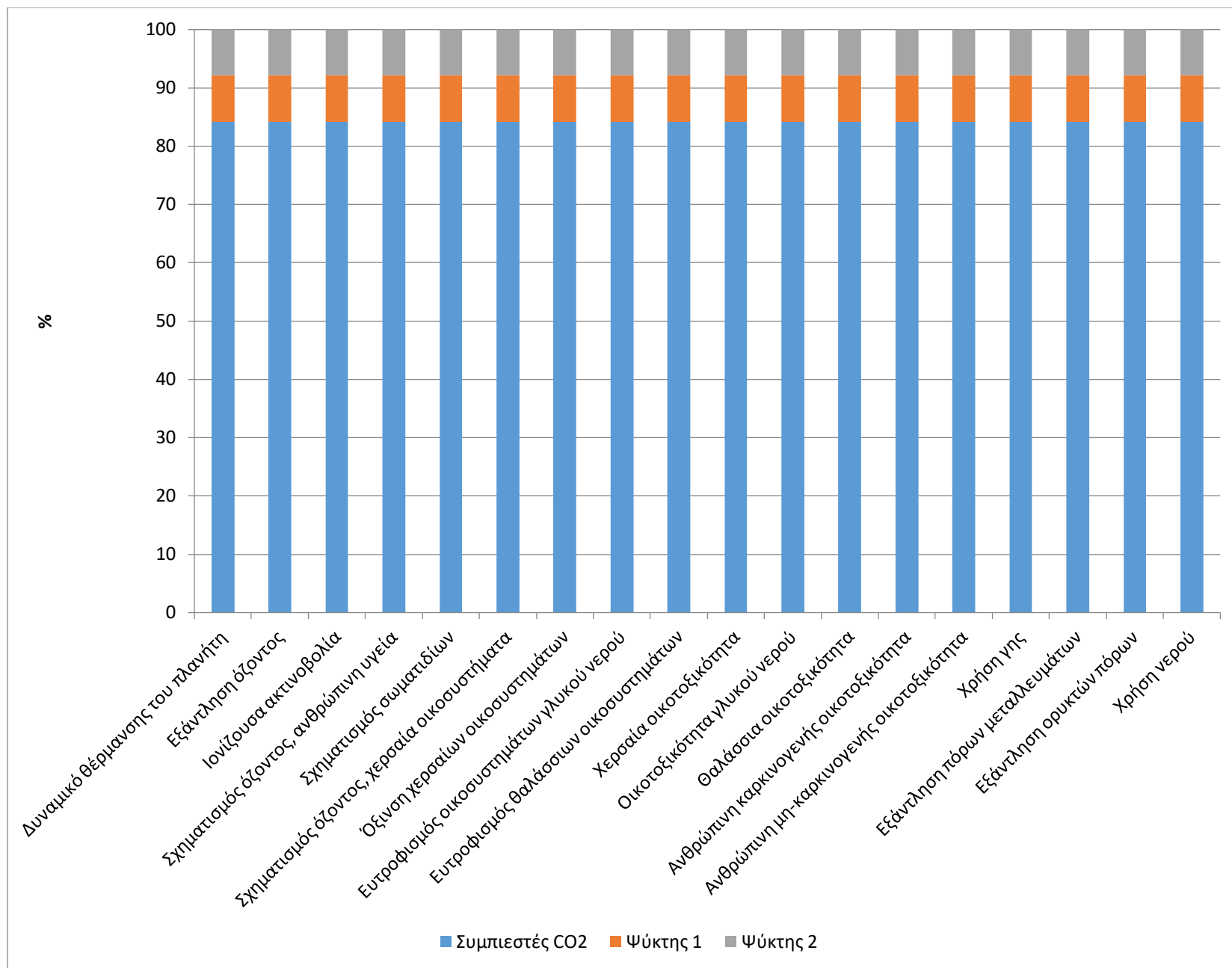
Σε αυτό το σημείο αναλύεται ο αντίκτυπος των βασικών μερών της εγκατάστασης. Συγκρίνεται ο αντίκτυπος μεταξύ του σταδίου της ηλεκτρόλυσης, της συμπίεσης, της αντίδρασης, του καθαρισμού και των βοηθητικών μερών (καλώδια, σωλήνες, τσιμέντο για βάσεις, βοηθητικά και ηλεκτρονικά μέρη εγκατάστασης), αφού αναλυθεί πρώτα το κάθε στάδιο ξεχωριστά. Όσον αφορά τον ηλεκτρολύτη ο οποίος απαιτεί σχετικά συχνή συντήρηση (5300 ώρες), φαίνεται πως μεγάλο μέρος του αντικτύπου οφείλεται σε αυτό το στάδιο. Στο στάδιο της συμπίεσης οι συμπιεστές του CO₂, φέρουν το περισσότερο περιβαλλοντικό βάρος λόγω μάζας, το ίδιο συμβαίνει και για το στάδιο της αντίδρασης με τον αντιδραστήρα, ο οποίος όχι μόνο έχει την μεγαλύτερη μάζα ανοξείδωτου χάλυβα, αλλά χρησιμοποιεί και μεγάλη ποσότητα καταλυτών, οι οποίοι έχουν υψηλό περιβαλλοντικό αποτύπωμα. Στο στάδιο του καθαρισμού, όπου τα υλικά κατασκευής είναι μόνο ανοξείδωτος χάλυβας,

καθοριστικός παράγοντας για το ποσοστό του αντικτύπου που λαμβάνει κάθε συσκευή είναι η μάζα της. Έπειτα τα βοηθητικά μέρη της εγκατάστασης όπως καλώδια και ηλεκτρονικά μέρη φέρουν υψηλό περιβαλλοντικό αποτύπωμα λόγω της πολυπλοκότερης διαδικασίας κατασκευής τους καθώς και λόγω των επικίνδυνων για την ανθρώπινη υγεία και το περιβάλλον, τοξικών υλικών που περιέχουν και απαιτούν ειδική διαχείριση στο τέλος του κύκλου ζωής τους.

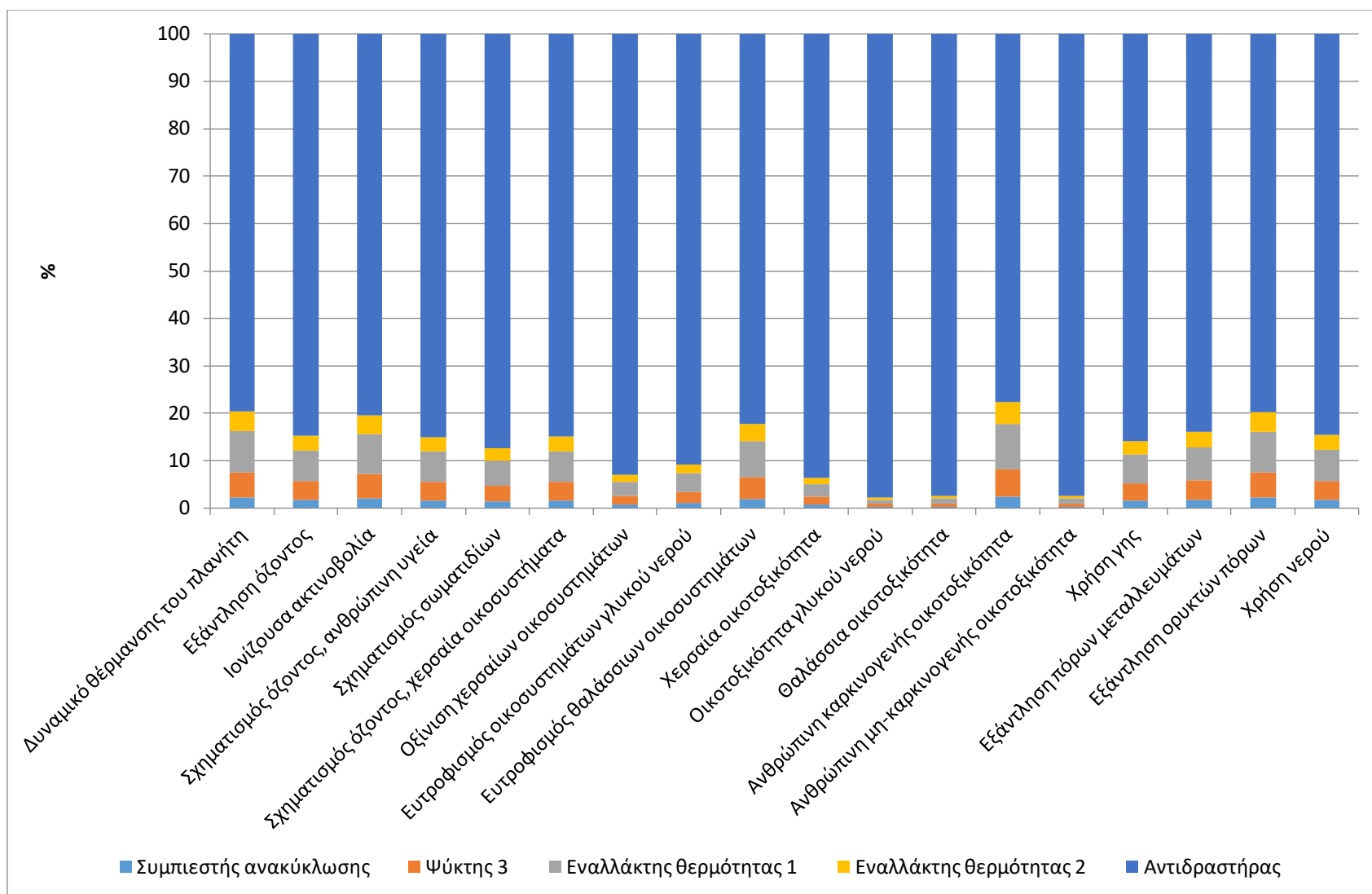
Παρακάτω παρουσιάζονται τα διαγράμματα του περιβαλλοντικού αντικτύπου, καθώς και οι πίνακες με την απόλυτη τιμή του δείκτη της υπερθέρμανσης του πλανήτη (GWP) ανά τόνο παραγόμενης μεθανόλης για το κάθε στάδιο της διαδικασίας αλλά και για την σύγκριση των σταδίων αυτών.



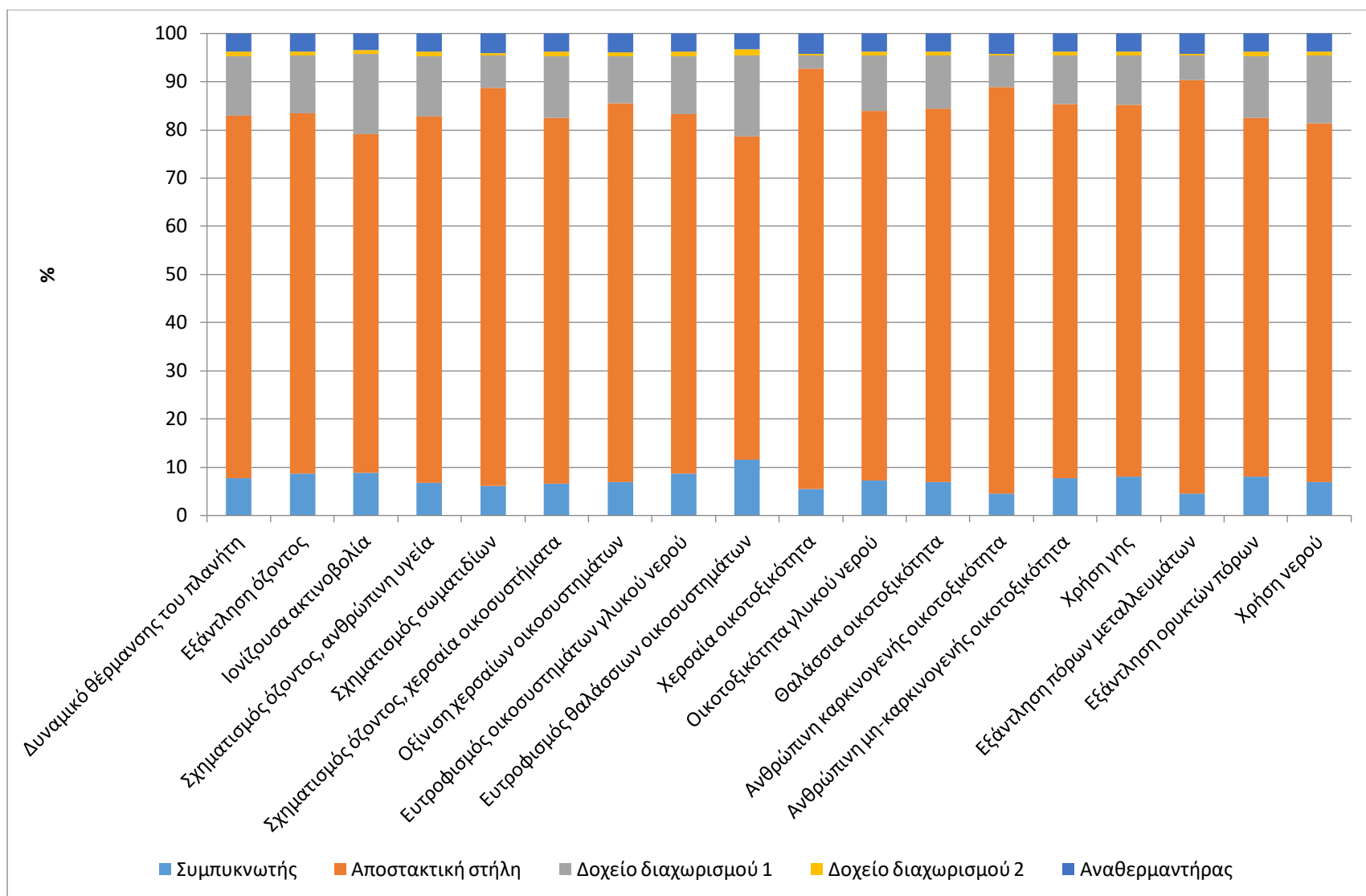
Διάγραμμα 5-4 Συγκριτικά αποτελέσματα για την κατασκευή και συντήρηση των δύο ηλεκτρολυτών ανά τόπο παραγόμενης μεθανόλης για την εγκατάσταση του έτους 2050.



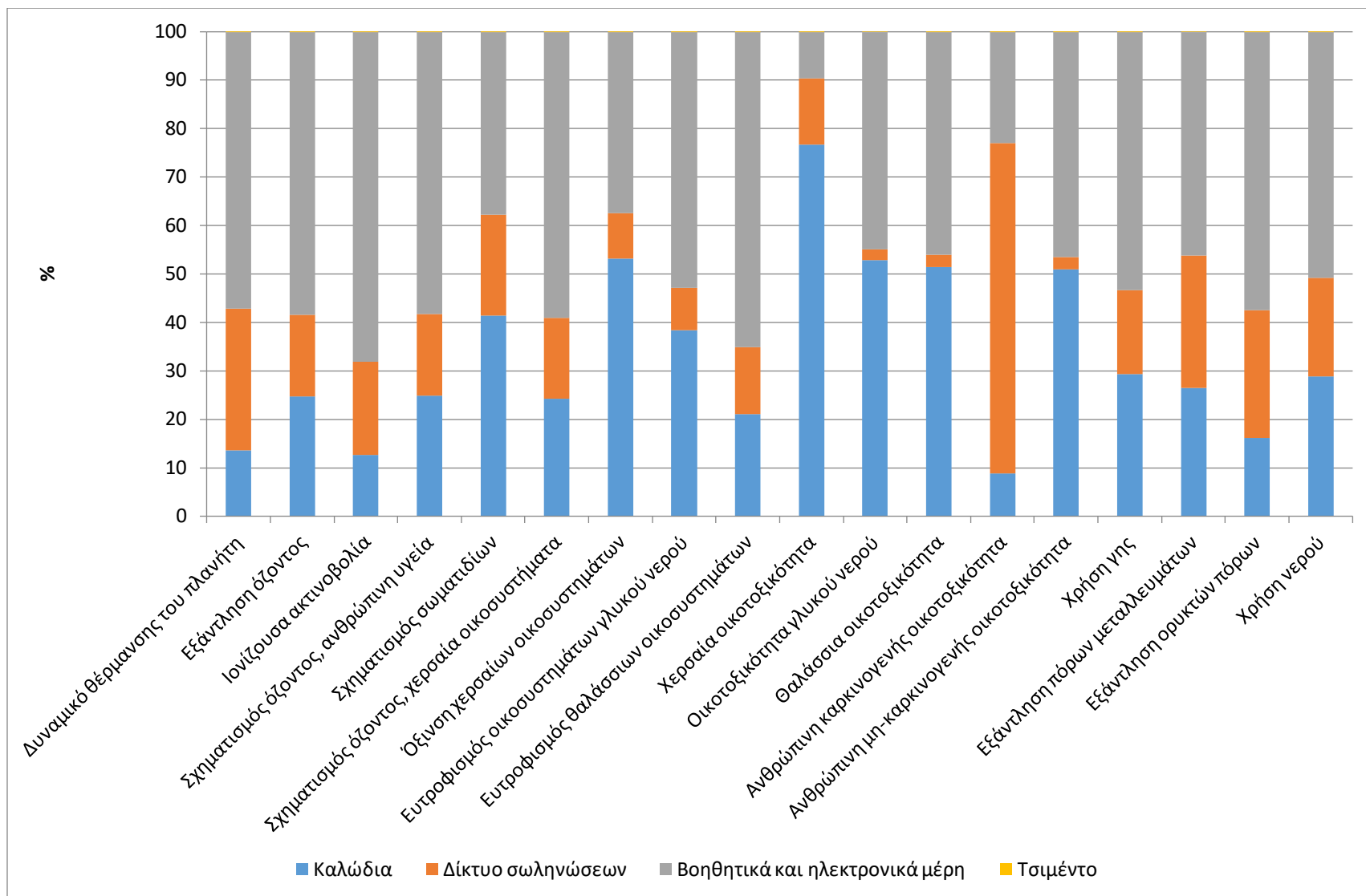
Διάγραμμα 5-5 Συγκριτικά αποτελέσματα για την κατασκευή και συντήρηση του σταδίου της συμπίεσης ανά τόνο παραγόμενης μεθανόλης για την εγκατάσταση του έτους 2050.



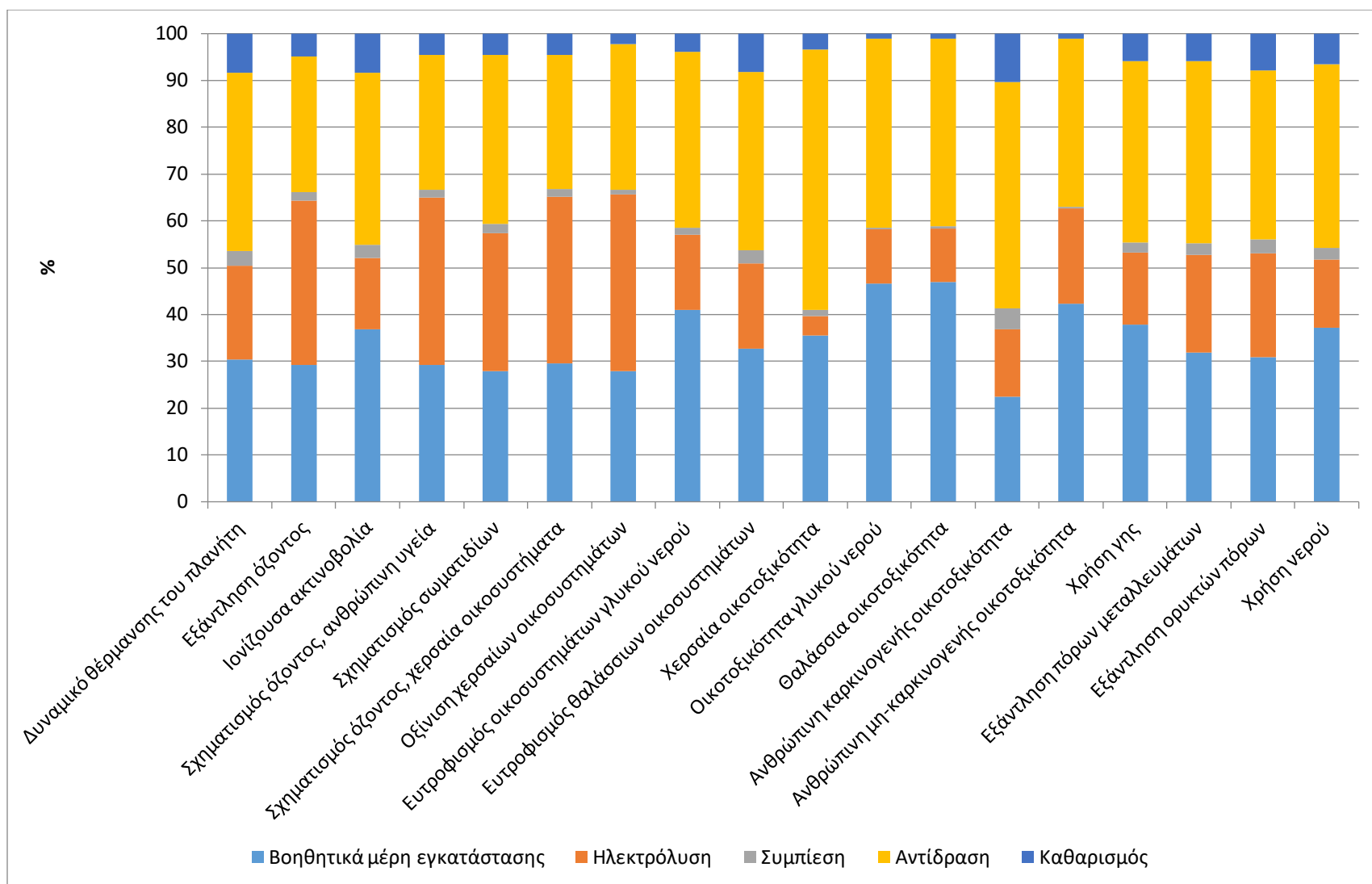
Διάγραμμα 5-6 Συγκριτικά αποτελέσματα για την κατασκευή και συντήρηση του σταδίου της αντίδρασης ανά τόνο παραγόμενης μεθανόλης για την εγκατάσταση του έτους 2050.



Διάγραμμα 5-7 Συγκριτικά αποτελέσματα για την κατασκευή και συντήρηση του σταδίου του καθαρισμού ανά τόνο παραγόμενης μεθανόλης για την εγκατάσταση του έτους 2050.



Διάγραμμα 5-8 Συγκριτικά αποτελέσματα για την κατασκευή και συντήρηση των υπολοίπων μερών της εγκατάστασης ανά τόνο παραγόμενης μεθανόλης για την εγκατάσταση του έτους 2050.



Διάγραμμα 5-9 Συγκριτικά αποτελέσματα για το στάδιο της κατασκευής και συντήρησης μεταξύ διαφόρων μερών της εγκατάστασης ανά τόνο παραγόμενης μεθανόλης για την εγκατάσταση του έτους 2050.

Πίνακας 5-4 Τιμή GWP για την κατασκευή και συντήρηση των δύο ηλεκτρολυτών ισχύος 1 GW ανά τόνο παραγόμενης μεθανόλης για την εγκατάσταση του έτους 2050.

| Κατηγορία επιπτώσεων | Μονάδα | Σύνολο | Κατασκευή Ηλεκτρολύτη | Συντήρηση Ηλεκτρολύτη |
|--------------------------------|------------------------|--------|-----------------------|-----------------------|
| Δυναμικό θέρμανσης του πλανήτη | kg CO ₂ -eq | 0.46 | 0.23 | 0.23 |

Πίνακας 5-5 Τιμή GWP για την κατασκευή και συντήρηση του σταδίου της συμπίεσης ανά τόνο παραγόμενης μεθανόλης για την εγκατάσταση του έτους 2050.

| Κατηγορία επιπτώσεων | Μονάδα | Σύνολο | Συμπιεστές CO ₂ | Ψύκτης 1 | Ψύκτης 2 |
|--------------------------------|------------------------|--------|----------------------------|----------|----------|
| Δυναμικό θέρμανσης του πλανήτη | kg CO ₂ -eq | 0.071 | 0.060 | 0.006 | 0.006 |

Πίνακας 5-6 Τιμή GWP για την κατασκευή και συντήρηση του σταδίου της αντίδρασης ανά τόνο παραγόμενης μεθανόλης για την εγκατάσταση του έτους 2050.

| Κατηγορία επιπτώσεων | Μονάδα | Σύνολο | Συμπιεστής ανακύκλωσης | Ψύκτης 3 | Εναλλάκτης θερμότητας 1 | Εναλλάκτης θερμότητας 2 | Αντιδραστήρας |
|--------------------------------|------------------------|--------|------------------------|----------|-------------------------|-------------------------|---------------|
| Δυναμικό θέρμανσης του πλανήτη | kg CO ₂ -eq | 0.86 | 0.02 | 0.05 | 0.07 | 0.04 | 0.69 |

Πίνακας 5-7 Τιμή GWP για την κατασκευή και συντήρηση του σταδίου του καθαρισμού ανά τόνο παραγόμενης μεθανόλης για την εγκατάσταση του έτους 2050.

| Κατηγορία επιπτώσεων | Μονάδα | Σύνολο | Συμπυκνωτής | Αποστακτική στήλη | Δοχείο διαχωρισμού 1 | Δοχείο διαχωρισμού 2 | Αναθερ/ρας |
|--------------------------------|------------------------|--------|-------------|-------------------|----------------------|----------------------|------------|
| Δυναμικό θέρμανσης του πλανήτη | kg CO ₂ -eq | 0.19 | 0.01 | 0.14 | 0.02 | 0.00 | 0.01 |

Πίνακας 5-8 Τιμή GWP για την κατασκευή και συντήρηση των υπολοίπων μερών της εγκατάστασης ανά τόνο παραγόμενης μεθανόλης για την εγκατάσταση του έτους 2050.

| Κατηγορία επιπτώσεων | Μονάδα | Σύνολο | Καλώδια | Δίκτυο σωληνώσεων | Βοηθητικά και ηλεκτρονικά μέρη | Τσιμέντο |
|--------------------------------|------------------------|--------|---------|-------------------|--------------------------------|----------|
| Δυναμικό θέρμανσης του πλανήτη | kg CO ₂ -eq | 0.7 | 0.1 | 0.2 | 0.4 | 0.0 |

Πίνακας 5-9 Τιμή GWP για την κατασκευή και συντήρηση των διαφόρων μερών της εγκατάστασης ανά τόνο παραγόμενης μεθανόλης για την εγκατάσταση του έτους 2050.

| Κατηγορία επιπτώσεων | Μονάδα | Σύνολο | Βοηθητικά μέρη εγκατάστασης | Ηλεκτρόλυση | Συμπύεση | Αντίδραση | Καθαρισμός |
|--------------------------------|------------------------|--------|-----------------------------|-------------|----------|-----------|------------|
| Δυναμικό θέρμανσης του πλανήτη | kg CO ₂ -eq | 2.27 | 0.69 | 0.46 | 0.07 | 0.86 | 0.19 |

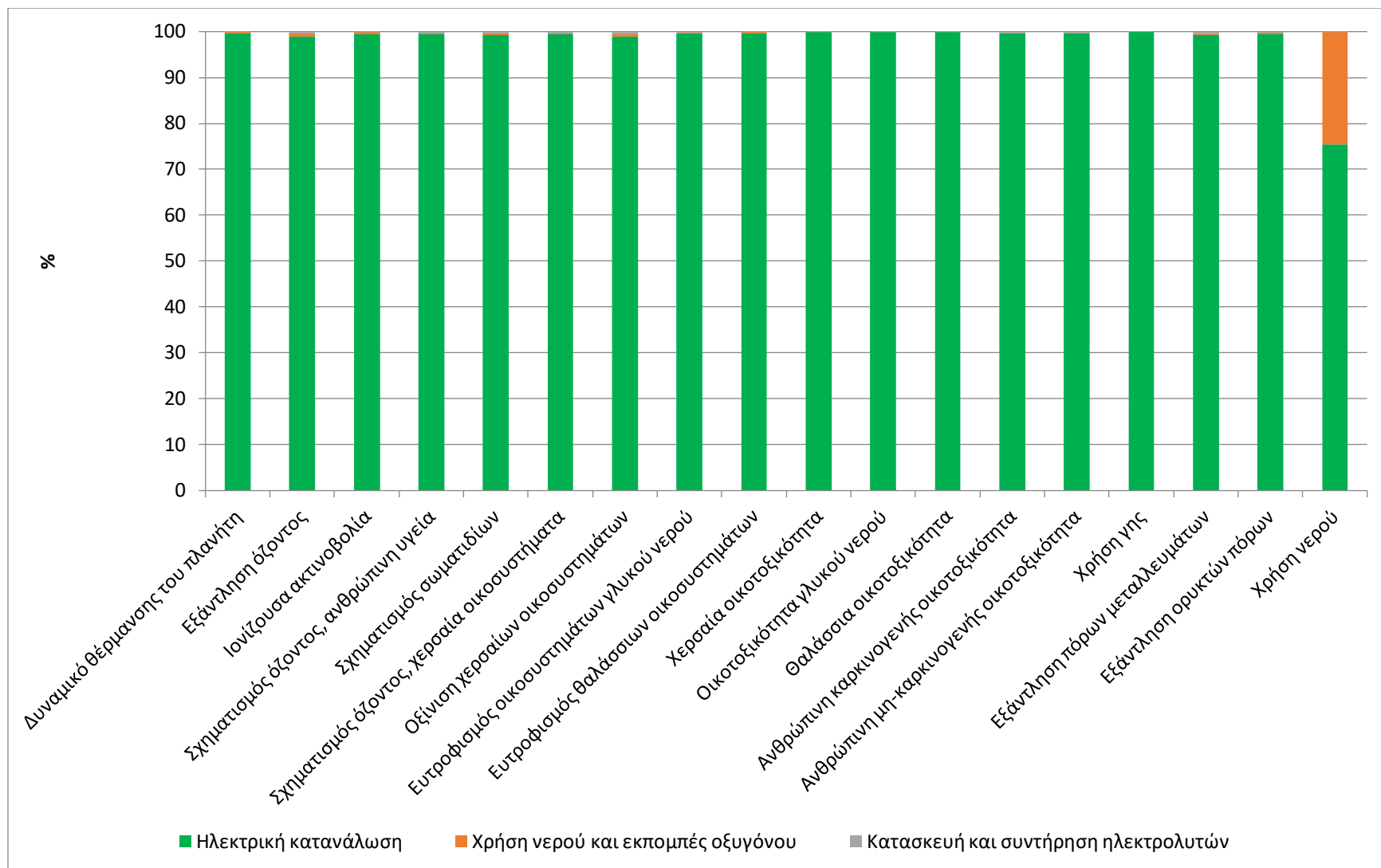
5.2.2 Συνολική Λειτουργία

Η φάση της λειτουργίας της εγκατάστασης φέρει το μεγαλύτερο φορτίο του περιβαλλοντικού αντίκτυπου της μονάδας. Είναι σημαντικό να εντοπιστούν τα στάδια τα οποία έχουν το μεγαλύτερο περιβαλλοντικό αποτύπωμα, διότι με τον τρόπο αυτό είναι δυνατόν να εστιαστεί η προσοχή σε αυτά και να υπάρξουν βελτιώσεις, οι οποίες θα μειώσουν σημαντικά το συνολικό αποτύπωμα.

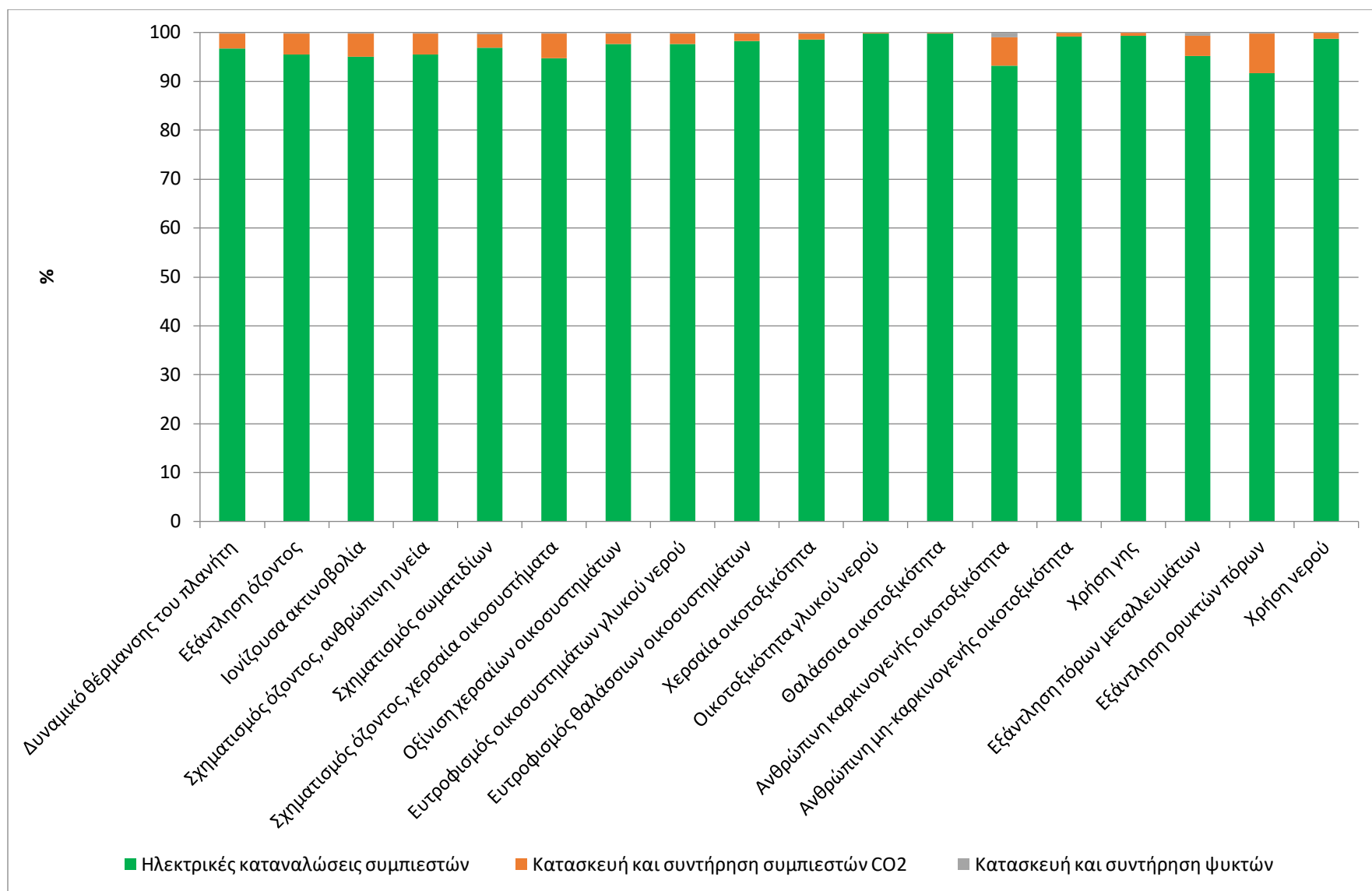
5.2.2.1 Διάφορα Στάδια

Παρακάτω παρουσιάζονται τα διαγράμματα του περιβαλλοντικού αντικτύπου, καθώς και οι πίνακες με την απόλυτη τιμή του δείκτη της υπερθέρμανσης του πλανήτη (GWP) ανά τόνο παραγόμενης μεθανόλης για όλο το κύκλο ζωής του κάθε σταδίου της εγκατάστασης. Οι ηλεκτρικές ανάγκες της εγκατάστασης θεωρείται ότι καλύπτονται από το μείγμα ΑΠΕ (50 % αιολική ενέργεια, 25 % ηλιακή ενέργεια και 25 % υδροηλεκτρική ενέργεια).

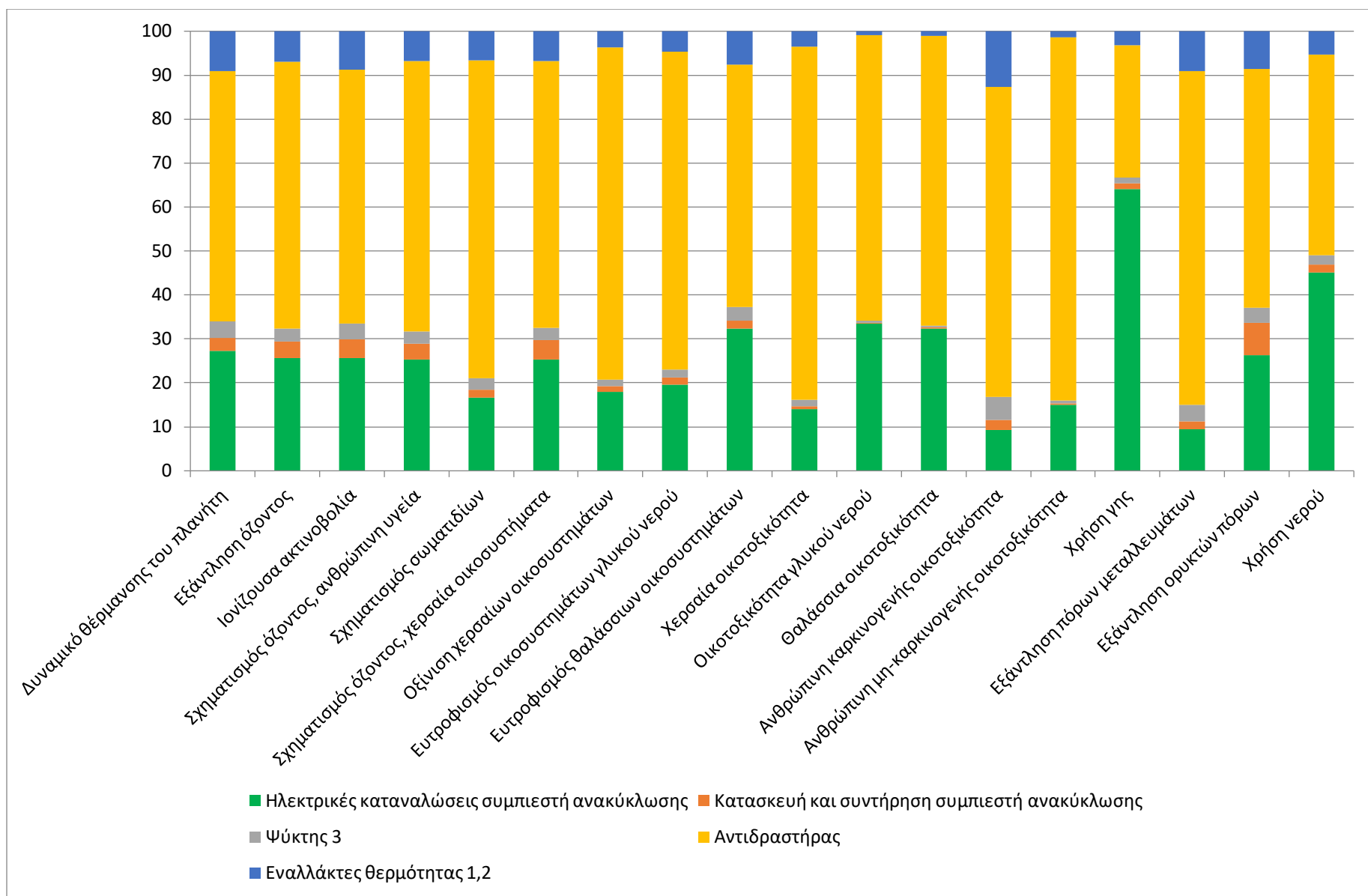
Στο στάδιο της ηλεκτρόλυσης το μεγαλύτερο μέρος του αντικτύπου το φέρει η ηλεκτρική κατανάλωση, καθώς είναι πολύ υψηλή, ενώ η χρήση νερού επιδρά προφανώς σημαντικά στην τελευταία κατηγορία επιπτώσεων. Στο στάδιο της συμπίεσης οι ηλεκτρικές ανάγκες των συμπιεστών CO₂ φέρουν το μεγαλύτερο περιβαλλοντικό φορτίο, ενώ η κατασκευή και συντήρηση τους ενώ φέρει μικρό φορτίο, είναι αρκετά υψηλότερο από αυτό των ψυκτών, λόγω μεγαλύτερης μάζας κατασκευής. Στο στάδιο της αντίδρασης, ο αντιδραστήρας λόγω του βάρους του αλλά και των υλικών των καταλυτών που χρησιμοποιεί, έχει τον υψηλότερο αντίκτυπο, με τις ηλεκτρικές καταναλώσεις του συμπιεστή να φέρουν τον δεύτερο υψηλότερο αντίκτυπο. Στο στάδιο του καθαρισμού, δεν υπάρχουν ηλεκτρικές καταναλώσεις, επομένως ο αντίκτυπος του κύκλου ζωής του σταδίου ταυτίζεται με τον αντίκτυπο της κατασκευής και συντήρησής του. Το ίδιο ισχύει και για τα βοηθητικά μέρη της εγκατάστασης.



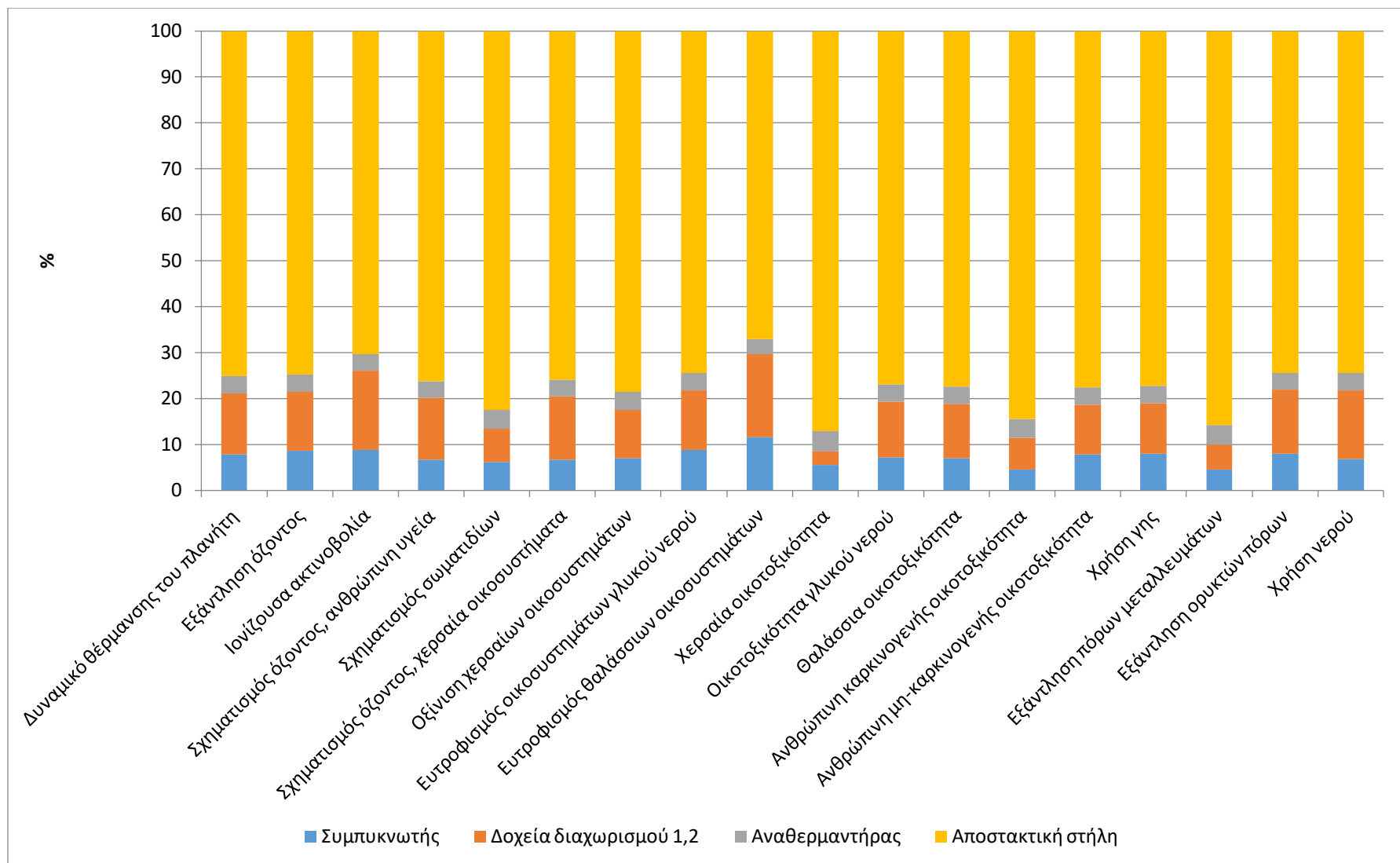
Διάγραμμα 5-10 Συγκριτικά αποτελέσματα για τον αντίκτυπο του σταδίου της ηλεκτρόλυσης ανά τόνο παραγόμενης μεθανόλης με κάλυψη των ηλεκτρικών αναγκών από ΑΠΕ για την εγκατάσταση του έτους 2050.



Διάγραμμα 5-11 Συγκριτικά αποτελέσματα για τον αντίκτυπο του σταδίου της συμπίεσης ανά τόνο παραγόμενης μεθανόλης με κάλυψη των ηλεκτρικών αναγκών από ΑΠΕ για την εγκατάσταση του έτους 2050.



Διάγραμμα 5-12 Συγκριτικά αποτελέσματα για τον αντίκτυπο του σταδίου της αντίδρασης ανά τόνο παραγόμενης μεθανόλης με κάλυψη των ηλεκτρικών αναγκών από ΑΠΕ για την εγκατάσταση του έτους 2050.



Διάγραμμα 5-13 Συγκριτικά αποτελέσματα για τον αντίκτυπο του σταδίου του καθαρισμού ανά τόνο παραγόμενης μεθανόλης με κάλυψη των ηλεκτρικών αναγκών ΑΠΕ για την εγκατάσταση του έτους 2050.

Πίνακας 5-10 Τιμή GWP για τον αντίκτυπο του σταδίου της ηλεκτρόλυσης ανά τόνο παραγόμενης μεθανόλης με κάλυψη των ηλεκτρικών αναγκών από ΑΠΕ για την εγκατάσταση του έτους 2050.

| Κατηγορία επιπτώσεων | Μονάδα | Σύνολο | Ηλεκτρική κατανάλωση ηλεκτρολύτη | Χρήση νερού και εκπομπές οξυγόνου | Κατασκευή και συντήρηση ηλεκτρολυτών |
|--------------------------------|------------------------|--------|----------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------------|
| Δυναμικό θέρμανσης του πλανήτη | kg CO ₂ -eq | 283.3 | 281.9 | 0.9 | 0.5 |

Πίνακας 5-11 Τιμή GWP για τον αντίκτυπο του σταδίου της συμπίεσης ανά τόνο παραγόμενης μεθανόλης με κάλυψη των ηλεκτρικών αναγκών από ΑΠΕ για την εγκατάσταση του έτους 2050.

| Κατηγορία επιπτώσεων | Μονάδα | Σύνολο | Ηλεκτρικές καταναλώσεις συμπίεστή | Κατασκευή και συντήρηση συμπιεστών CO ₂ | Κατασκευή και συντήρηση συμπιεστών ψυκτών |
|--------------------------------|------------------------|--------|-----------------------------------|--|---|
| Δυναμικό θέρμανσης του πλανήτη | kg CO ₂ -eq | 4.36 | 4.22 | 0.13 | 0.01 |

Πίνακας 5-12 Τιμή GWP για τον αντίκτυπο του σταδίου της αντίδρασης ανά τόνο παραγόμενης μεθανόλης με κάλυψη των ηλεκτρικών αναγκών από ΑΠΕ για την εγκατάσταση του έτους 2050.

| Κατηγορία επιπτώσεων | Μονάδα | Σύνολο | Ηλεκτρικές καταναλώσεις συμπίεστή ανακύκλωσης | Κατασκευή και συντήρηση συμπίεστή ανακύκλωσης | Ψύκτης 3 | Αντιδραστήρας | Εναλλάκτες θερμότητας 1,2 |
|--------------------------------|------------------------|--------|---|---|----------|---------------|---------------------------|
| Δυναμικό θέρμανσης του πλανήτη | kg CO ₂ -eq | 1.21 | 0.33 | 0.04 | 0.05 | 0.69 | 0.11 |

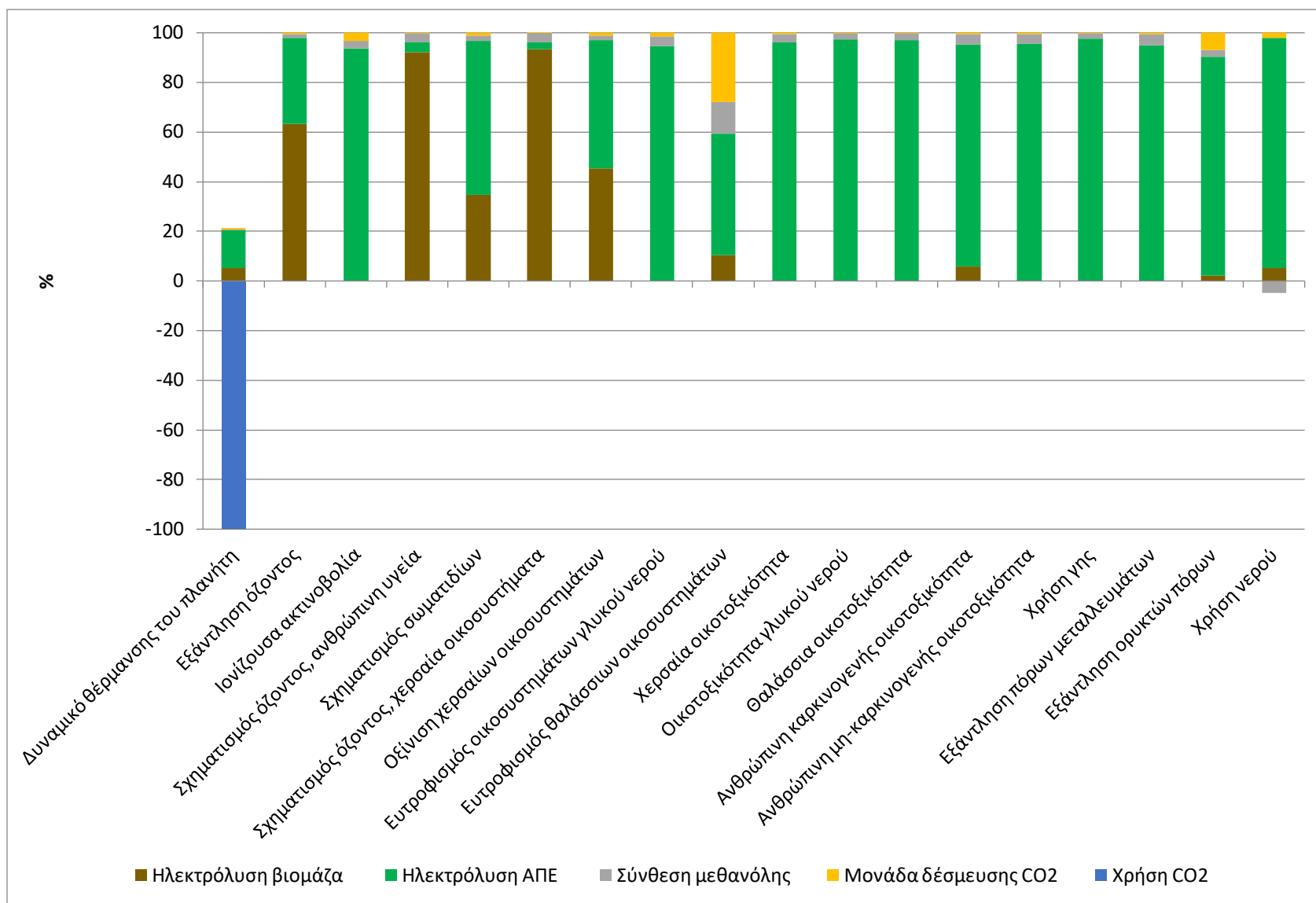
Πίνακας 5-13 Τιμή GWP για τον αντίκτυπο του σταδίου του καθαρισμού ανά τόνο παραγόμενης μεθανόλης με κάλυψη των ηλεκτρικών αναγκών από ΑΠΕ για την εγκατάσταση του έτους 2050.

| Κατηγορία επιπτώσεων | Μονάδα | Σύνολο | Συμπυκνωτής | Δοχεία διαχωρισμού 1,2 | Αναθερμαντήρας | Αποστακτική στήλη |
|--------------------------------|------------------------|--------|-------------|------------------------|----------------|-------------------|
| Δυναμικό θέρμανσης του πλανήτη | kg CO ₂ -eq | 0.19 | 0.01 | 0.03 | 0.01 | 0.14 |

5.2.2.2 Σενάριο Βάσης

Στην συνέχεια εξετάζεται ο αντίκτυπος του συνολικού κύκλου ζωής της εγκατάστασης, για το σενάριο βάσης με κάλυψη των αναγκών από ηλεκτροπαραγωγό σταθμό βιομάζας και ΑΠΕ. Αναλύεται ο περιβαλλοντικός αντίκτυπος όλου του κύκλου ζωής της εγκατάστασης στα επιμέρους στάδια με το Διάγραμμα 5-14, και παρουσιάζεται ο Πίνακας 5-14 με την απόλυτη τιμή του δείκτη της υπερθέρμανσης του πλανήτη (GWP) ανά τόνο παραγόμενης μεθανόλης.

Όσον αφορά τον συνολικό κύκλο ζωής της εγκατάστασης, το μεγαλύτερο περιβαλλοντικό αποτύπωμα φέρει το στάδιο της ηλεκτρόλυσης όπως φαίνεται στο Διάγραμμα 5-14 και αυτό λόγω των υπερβολικά υψηλών καταναλώσεων ενέργειας των δύο ηλεκτρολυτών. Επίσης το αρνητικό δυναμικό θέρμανσης του πλανήτη προκύπτει από την αποφυγή εκπομπών CO₂ μέσω της διαδικασίας της δέσμευσης. Επίσης λόγω των ΜΕΑ, το στάδιο της δέσμευσης έχει σημαντικό αντίκτυπο στον ευτροφισμό των θαλασσών. Τέλος αμελητέο αντίκτυπο φαίνεται να έχει το στάδιο της σύνθεσης της μεθανόλης.



Διάγραμμα 5-14 Συγκριτικά αποτελέσματα για τον αντίκτυπο ολόκληρου του κύκλου ζωής της εγκατάστασης ανά τόνο παραγόμενης μεθανόλης με κάλυψη των αναγκών από ηλεκτροπαραγωγό σταθμό βιομάζας και ΑΠΕ για την εγκατάσταση του έτους 2050.

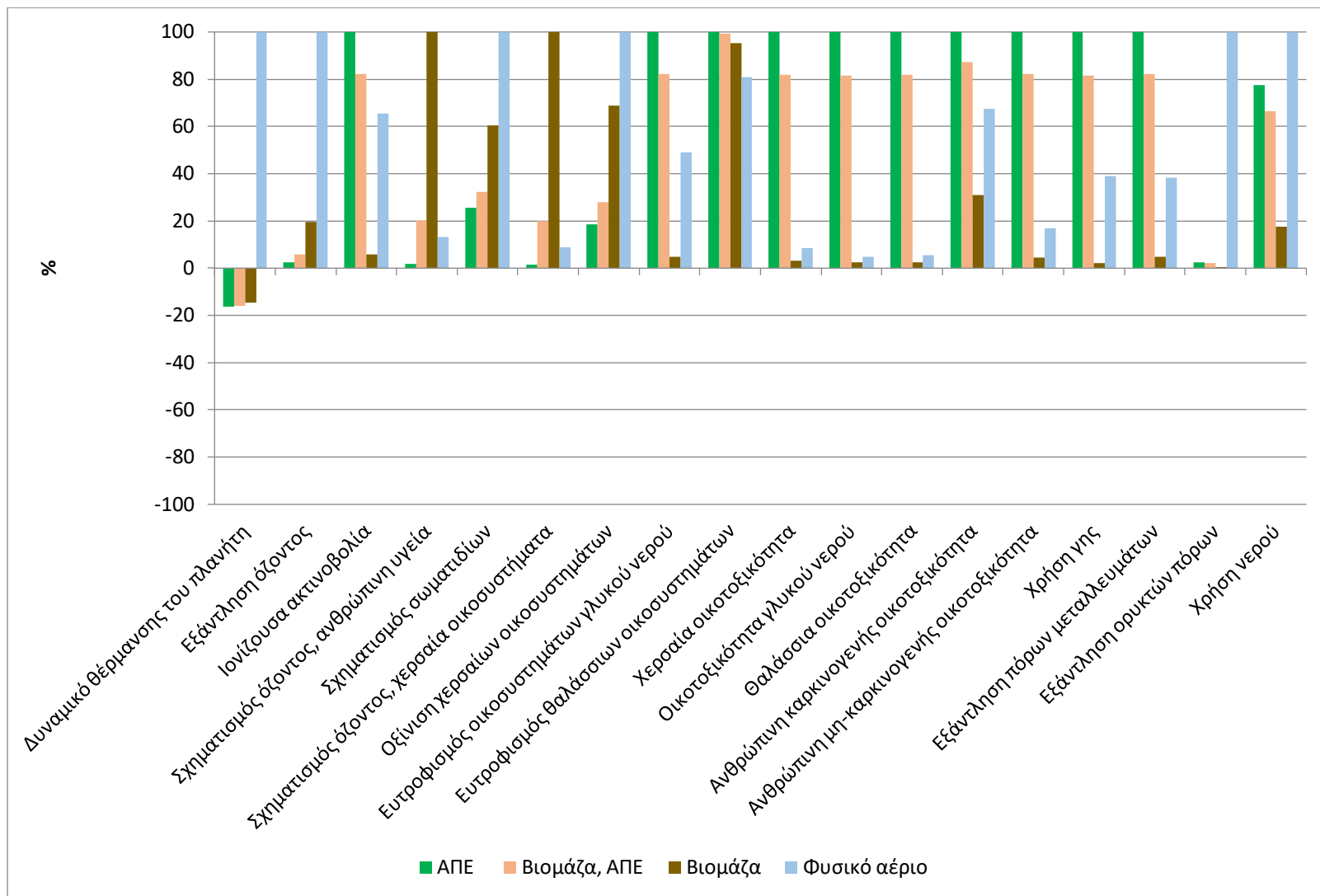
Πίνακας 5-14 Τιμή GWP για τον αντίκτυπο ολόκληρου του κύκλου ζωής της εγκατάστασης ανά τόνο παραγόμενης μεθανόλης με κάλυψη των αναγκών από ηλεκτροπαραγωγό σταθμό βιομάζας και ΑΠΕ για την εγκατάσταση του έτους 2050.

| Κατηγορία επιπτώσεων | Μονάδα | Σύνολο | Ηλ/της βιομάζα | Ηλ/της ΑΠΕ | Σύνθεση μεθανόλης | Μονάδα δέσμευσης CO ₂ | Χρήση CO ₂ |
|--------------------------------|-------------------------|--------|----------------|------------|-------------------|----------------------------------|-----------------------|
| Δυναμικό θέρμανσης του πλανήτη | kg CO ₂ - eq | -1190 | 79 | 230 | 7 | 10 | -1516 |

5.2.2.3 Πηγές Ενέργειας

Ο συνολικός αντίκτυπος της μονάδας μεταβάλλεται σε μεγάλο βαθμό με την αλλαγή της πηγής ενέργειας. Αυτό συμβαίνει διότι όπως παρατηρήθηκε και παραπάνω το μεγαλύτερο μερίδιο του περιβαλλοντικού αποτυπώματος το φέρει το στάδιο της ηλεκτρόλυσης λόγω των υψηλών ηλεκτρικών αναγκών. Εξετάζονται 4 σενάρια διαφορετικών πηγών ενέργειας, όπως αναλύθηκε και νωρίτερα. Λόγω της δέσμευσης CO₂ παρατηρείται πως το δυναμικό θέρμανσης του πλανήτη προκύπτει αρνητικό για όλα τα σενάρια εκτός αυτού στο οποίο γίνεται κάλυψη των αναγκών με ηλεκτροπαραγωγό σταθμό φυσικού αερίου, ο οποίος έχει υψηλές εκπομπές CO₂ ορυκτής προελεύσεως αλλά και μικρές εκπομπές μεθανίου.

Παρακάτω παρουσιάζεται το Διάγραμμα 5-15 του περιβαλλοντικού αντικτύπου, καθώς και ο Πίνακας 5-15 με την απόλυτη τιμή του δείκτη της υπερθέρμανσης του πλανήτη (GWP) ανά τόνο παραγόμενης μεθανόλης για όλο το κύκλο ζωής της μονάδας ανάλογα με την εκάστοτε πηγή ενέργειας.



Διάγραμμα 5-15 Συγκριτικά αποτελέσματα για τον αντίκτυπο ολόκληρου του κύκλου ζωής της εγκατάστασης ανά τόνο παραγόμενης μεθανόλης με κάλυψη των ηλεκτρικών αναγκών από διαφορετικές πηγές ενέργειας για την εγκατάσταση του έτους 2050.

Πίνακας 5-15 Τιμή GWP για τον αντίκτυπο ολόκληρου του κύκλου ζωής της εγκατάστασης ανά τόνο παραγόμενης μεθανόλης με κάλυψη των ηλεκτρικών αναγκών από διαφορετικές πηγές ενέργειας για την εγκατάσταση του έτους 2050.

| Κατηγορία επιπτώσεων | Μονάδα | ΑΠΕ | Βιομάζα, ΑΠΕ | Βιομάζα | Φυσικό αέριο |
|--------------------------------|------------------------|-------|--------------|---------|--------------|
| Δυναμικό θέρμανσης του πλανήτη | kg CO ₂ -eq | -1216 | -1190 | -1080 | 7473 |

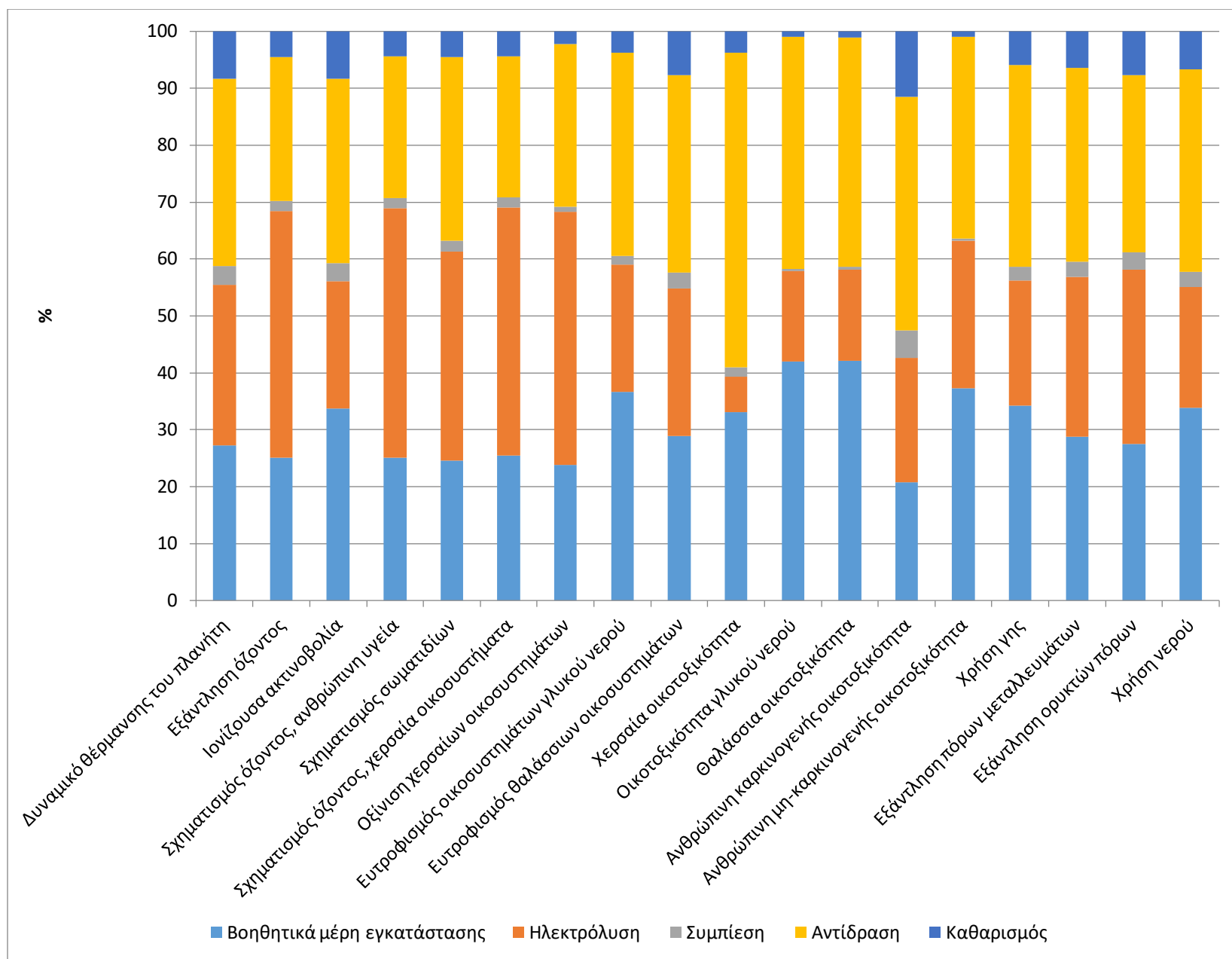
5.3 Αποτελέσματα Σεναρίου Έτους 2030

Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για το σενάριο του έτους 2030 στο οποίο η παραγωγή μεθανόλης είναι 48 t/h όσο λειτουργεί η μονάδα και ο συντελεστής CF είναι 0.7, ενώ χρησιμοποιείται ένας PEM ηλεκτρολύτης ισχύος 500 MW, για την παραγωγή του απαιτούμενου υδρογόνου. Η αρχή λειτουργίας του συστήματος παραμένει ίδια, διαφέρει όμως η κλίμακα και η ηλεκτρική κατανάλωση του ηλεκτρολύτη η οποία είναι υψηλότερη ανά τόνο παραγόμενου υδρογόνου, επίσης το εργοστάσιο βιομάζας ισχύος 375 MW καλύπτει μεγαλύτερο ποσοστό των αναγκών, καθώς οι συνολικές ενεργειακές απαιτήσεις της μονάδας είναι χαμηλότερες. Επίσης εξετάζεται και το σενάριο στο οποίο η δέσμευση βιογενούς CO₂ φέρει μόνο το περιβαλλοντικό βάρος των διεργασιών της δέσμευσης και κανένα όφελος. Τέλος επιλέγεται να μοντελοποιηθεί και το σενάριο αξιοποίησης του παραγόμενου από τον ηλεκτρολύτη οξυγόνου.

5.3.1 Αντίκτυπος Κατασκευής και Συντήρησης της εγκατάστασης

Σε αυτό το σημείο συγκρίνεται ο αντίκτυπος μεταξύ του σταδίου της ηλεκτρόλυσης, της συμπίεσης, της αντίδρασης, του καθαρισμού και των υπόλοιπων βοηθητικών μερών (καλώδια, σωλήνες, τσιμέντο για βάσεις, βοηθητικά και ηλεκτρονικά μέρη εγκατάστασης). Η κατασκευή και συντήρηση των διαφόρων μερών της εγκατάστασης γίνεται με τον ίδιο τρόπο και τα ίδια υλικά όπως και για την μονάδα του έτους 2050, ωστόσο ο ηλεκτρολύτης λαμβάνει μεγαλύτερο μέρος του αντικτύπου καθώς μικραίνει λιγότερο από ότι τα άλλα μέρη της εγκατάστασης (μάζες λαμβάνονται από την παράλληλη έρευνα στο ASPEN) σε σχέση με την παραγωγή μεθανόλης.

Παρακάτω παρουσιάζεται το Διάγραμμα 5-16 του περιβαλλοντικού αντικτύπου, καθώς και ο Πίνακας 5-16 με την απόλυτη τιμή του δείκτη της υπερθέρμανσης του πλανήτη (GWP) ανά τόνο παραγόμενης μεθανόλης για τα διάφορα στάδια της εγκατάστασης.



Διάγραμμα 5-16 Συγκριτικά αποτελέσματα για το στάδιο της κατασκευής και συντήρησης μεταξύ διαφόρων μερών της εγκατάστασης ανά τόνο παραγόμενης μεθανόλης για την εγκατάσταση του έτους 2030.

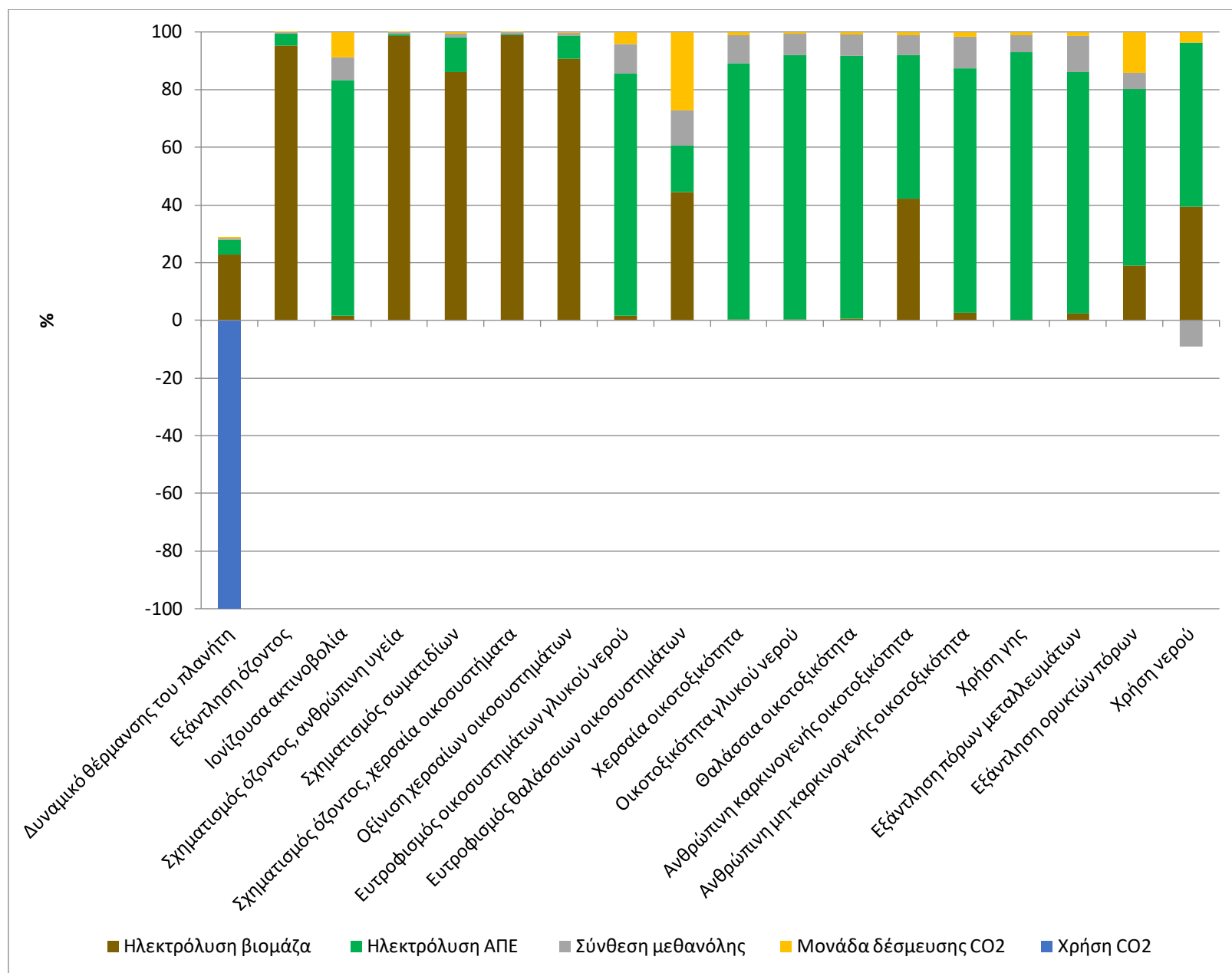
Πίνακας 5-16 Τιμή GWP για την κατασκευή και συντήρηση των διαφόρων μερών της εγκατάστασης ανά τόνο παραγόμενης μεθανόλης για την εγκατάσταση του έτους 2030.

| Κατηγορία επιπτώσεων | Μονάδα | Σύνολο | Βοηθητικά μέρη εγκατάστασης | Ηλ/λυση | Συμπίεση | Αντίδραση | Καθαρισμός |
|--------------------------------|------------------------|--------|-----------------------------|---------|----------|-----------|------------|
| Δυναμικό θέρμανσης του πλανήτη | kg CO ₂ -eq | 2.70 | 0.74 | 0.76 | 0.09 | 0.89 | 0.22 |

5.3.2 Συνολική Λειτουργία

Στην συνέχεια εξετάζεται ο αντίκτυπος του συνολικού κύκλου ζωής της εγκατάστασης, για την μονάδα του έτους 2030, με κάλυψη των αναγκών από ηλεκτροπαραγωγό σταθμό βιομάζας και ΑΠΕ. Αναλύεται ο περιβαλλοντικός αντίκτυπος όλου του κύκλου ζωής της εγκατάστασης στα επιμέρους στάδια με το Διάγραμμα 5-17, και παρουσιάζεται ο Πίνακας 5-17 με την απόλυτη τιμή του δείκτη της υπερθέρμανσης του πλανήτη (GWP) ανά τόνο παραγόμενης μεθανόλης.

Όσον αφορά τον συνολικό κύκλο ζωής της εγκατάστασης, το μεγαλύτερο περιβαλλοντικό αποτύπωμα φέρει και πάλι το στάδιο της ηλεκτρόλυσης, ωστόσο ο σταθμός βιομάζας καλύπτει υψηλότερο ποσοστό των αναγκών σε σχέση με το σενάριο του 2050 και επομένως η χρήση ενέργειας από βιομάζα από τον ηλεκτρολύτη φέρει και υψηλότερο αντίκτυπο (Πίνακας 5-17). Επίσης το αρνητικό δυναμικό θέρμανσης του πλανήτη προκύπτει από την αποφυγή εκπομπών CO₂ μέσω της διαδικασίας της δέσμευσης. Επίσης λόγω των ΜΕΑ, το στάδιο της δέσμευσης έχει σημαντικό αντίκτυπο στον ευτροφισμό των θαλασσών και ελάχιστα χαμηλότερο στην εξάντληση των ορυκτών πόρων. Τέλος σχετικά χαμηλό αντίκτυπο φαίνεται να έχει το στάδιο της σύνθεσης της μεθανόλης, ωστόσο υψηλότερο από ότι για την μονάδα του 2050, καθώς η χαμηλότερη χρήση ΑΠΕ, κάνει τον αντίκτυπο του σταδίου της σύνθεσης πιο εμφανή για τις κατηγορίες επιπτώσεων στις οποίες οι ΑΠΕ έχουν υψηλή επίδραση.



Διάγραμμα 5-17 Συγκριτικά αποτελέσματα για τον αντίκτυπο ολόκληρου του κύκλου ζωής της εγκατάστασης ανά τόνο παραγόμενης μεθανόλης με κάλυψη των αναγκών από ηλεκτροπαραγωγή σταθμό βιομάζας και ΑΠΕ για την εγκατάσταση του έτους 2030.

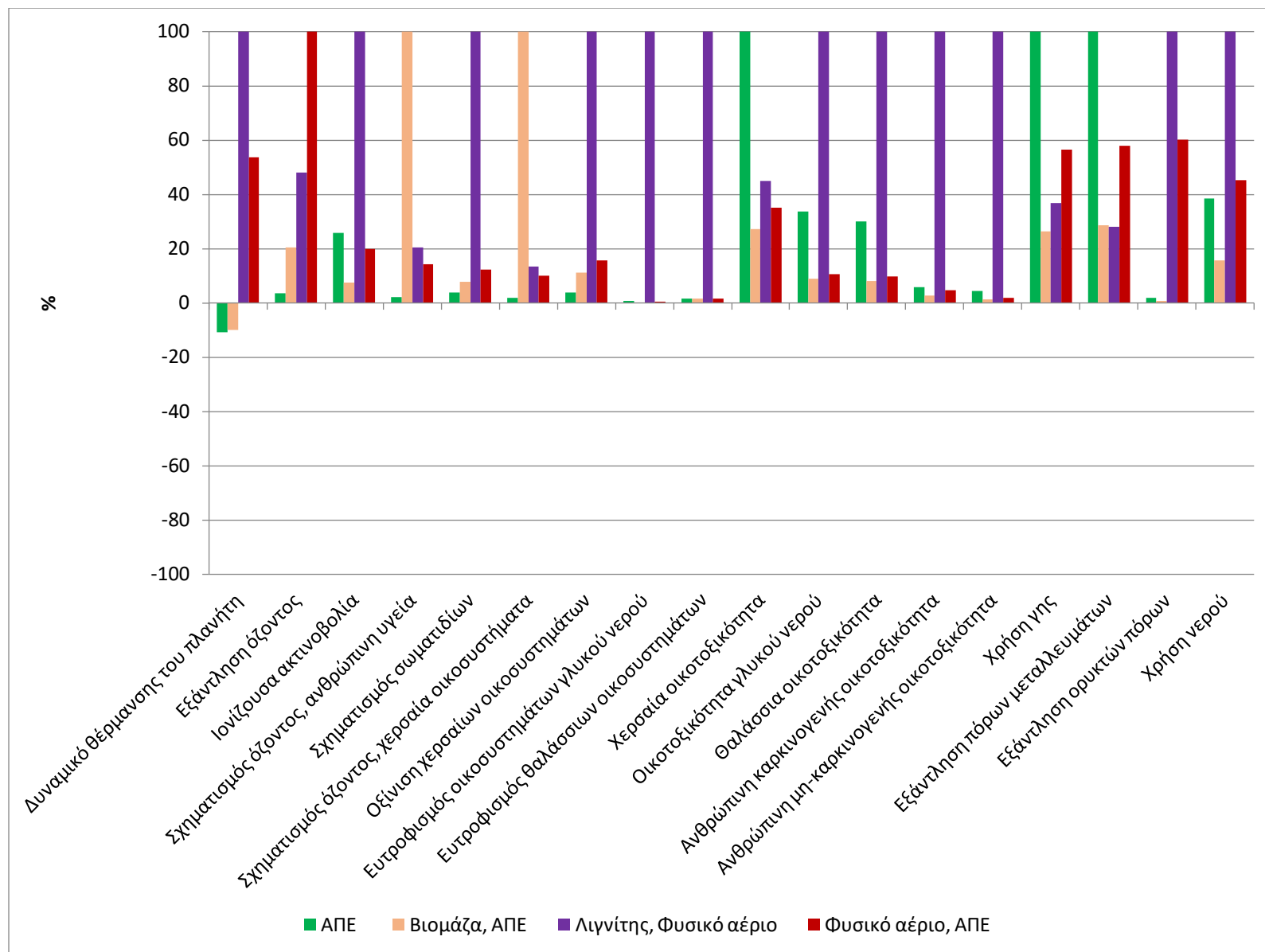
Πίνακας 5-17 Τιμή GWP για τον αντίκτυπο ολόκληρου του κύκλου ζωής της εγκατάστασης ανά τόνο παραγόμενης μεθανόλης με κάλυψη των αναγκών από ηλεκτροπαραγωγό σταθμό βιομάζας και ΑΠΕ για την εγκατάσταση του έτους 2030.

| Κατηγορία επιπτώσεων | Μονάδα | Σύνολο | ΗΛ/της βιομάζα | ΗΛ/της ΑΠΕ | Σύνθεση μεθανόλης | Μονάδα δέσμευσης CO ₂ | Χρήση CO ₂ |
|--------------------------------|-------------------------|--------|----------------|------------|-------------------|----------------------------------|-----------------------|
| Δυναμικό θέρμανσης του πλανήτη | kg CO ₂ - eq | -1076 | 345 | 78 | 7 | 10 | -1516 |

5.3.2.1 Πηγές Ενέργειας

Στο σημείο αυτό εξετάζεται ο συνολικός αντίκτυπος της μονάδας ανάλογα με την εκάστοτε πηγή ενέργειας. Ως πηγή ενέργειας επιλέγεται να εξετασθεί και ο λιγνίτης, παρά τα σχέδια για απολιγνιτοποίηση έως το 2030, καθώς αυτή ίσως καθυστερήσει.

Παρουσιάζεται το Διάγραμμα 5-18 του περιβαλλοντικού αντικτύπου, καθώς και ο Πίνακας 5-18 με την απόλυτη τιμή του δείκτη της υπερθέρμανσης του πλανήτη (GWP) ανά τόνο παραγόμενης μεθανόλης για όλο το κύκλο ζωής της μονάδας για τις διάφορες πηγές ενέργειας. Όπως είναι αναμενόμενο το σενάριο κάλυψης των ηλεκτρικών αναγκών από λιγνιτικό σταθμό, φέρει το υψηλότερο περιβαλλοντικό αποτύπωμα. Ενώ στα δύο πρώτα σενάρια το δυναμικό θέρμανσης του πλανήτη είναι αρνητικό, παρατηρείται ότι στο τρίτο σενάριο με την μερική κάλυψη των αναγκών από σταθμό φυσικού αερίου αυτό γίνεται θετικό.



Διάγραμμα 5-18 Συγκριτικά αποτελέσματα για τον αντίκτυπο ολόκληρου του κύκλου ζωής της εγκατάστασης ανά τόνο παραγόμενης μεθανόλης με κάλυψη των ηλεκτρικών αναγκών από διαφορετικές πηγές ενέργειας για την εγκατάσταση του έτους 2030.

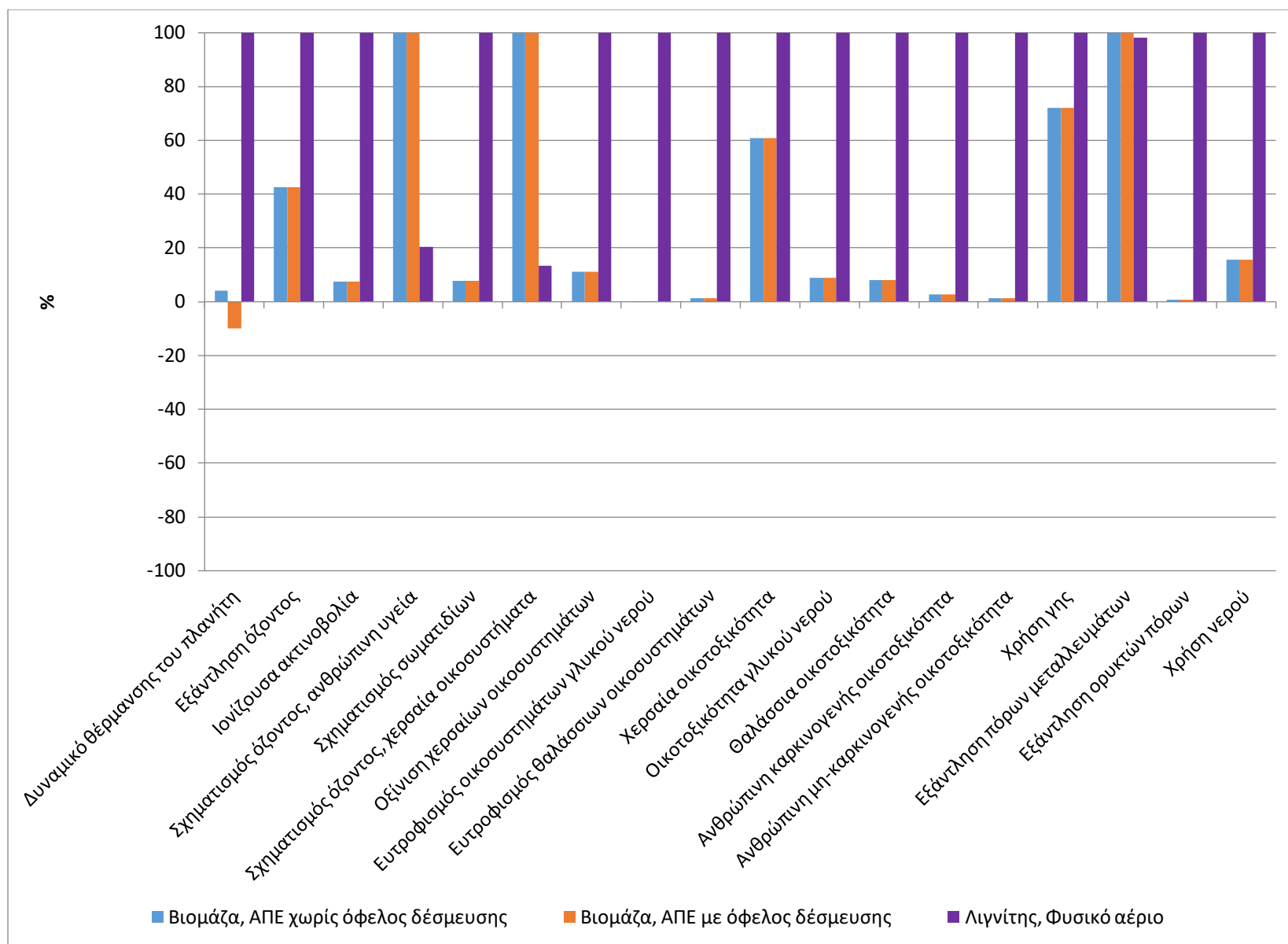
Πίνακας 5-18 Τιμή GWP για τον αντίκτυπο ολόκληρου του κύκλου ζωής της εγκατάστασης ανά τόνο παραγόμενης μεθανόλης με κάλυψη των ηλεκτρικών αναγκών από διαφορετικές πηγές ενέργειας για την εγκατάσταση του έτους 2030.

| Κατηγορία επιπτώσεων | Μονάδα | ΑΠΕ | Βιομάζα, ΑΠΕ | Λιγνίτης, Φυσικό αέριο | Φυσικό αέριο, ΑΠΕ |
|--------------------------------|------------------------|-------|--------------|------------------------|-------------------|
| Δυναμικό θέρμανσης του πλανήτη | kg CO ₂ -eq | -1188 | -1076 | 10914 | 5875 |

5.3.3 Δέσμευση Διοξειδίου του Άνθρακα Βιογενούς Προέλευσης

Στο σενάριο αυτό γίνεται η υπόθεση ότι η δέσμευση βιογενούς CO₂ φέρει μόνο το περιβαλλοντικό φορτίο των διεργασιών της δέσμευσης και όχι τον θετικό αντίκτυπο της μείωσης των ρύπων καθώς το CO₂ είναι βιογενούς προελεύσεως. Με τον τρόπο αυτό φαίνεται να αυξάνονται οι συνολικές εκπομπές CO₂ και επομένως μεγαλώνει η τιμή του GWP.

Παρακάτω παρουσιάζεται το Διάγραμμα 5-19 του περιβαλλοντικού αντικτύπου, καθώς και ο Πίνακας 5-19 με την απόλυτη τιμή του δείκτη της υπερθέρμανσης του πλανήτη (GWP) ανά τόνο παραγόμενης μεθανόλης για τον κύκλο ζωής της εγκατάστασης με υπόθεση ουδέτερου και θετικού αντικτύπου της δέσμευσης βιογενούς CO₂, με πηγή ενέργειας ηλεκτροπαραγωγό σταθμό βιομάζας και ΑΠΕ, καθώς και με πηγή ενέργειας Λιγνιτικό σταθμό και σταθμό φυσικού αερίου. Όταν δεν προσμετράται το όφελος της δέσμευσης 1516 kg CO₂ -eq, όσο δηλαδή και το ανά τόνο μεθανόλης δεσμευμένο CO₂, το GWP γίνεται θετικό ακόμα και με κάλυψη των αναγκών από σταθμό ηλεκτροπαραγωγής βιομάζας και ΑΠΕ (1^ο σενάριο) . Προφανώς για το 3^ο σενάριο, αυτό στο οποίο η κάλυψη των αναγκών γίνεται από λιγνιτικό σταθμό και σταθμό φυσικού αερίου, οι εκπομπές CO₂ είναι ορυστικής προέλευσης και επομένως η υπόθεση που έγινε για την δέσμευση βιογενούς προέλευσης CO₂ δεν έχει καμία επίδραση στον αντίκτυπο.



Διάγραμμα 5-19 Συγκριτικά αποτελέσματα για τον αντίκτυπο ολόκληρου του κύκλου ζωής της εγκατάστασης ανά τόνο παραγόμενης μεθανόλης με κάλυψη των ηλεκτρικών αναγκών από διαφορετικές πηγές ενέργειας για την εγκατάσταση του έτους 2030.

Πίνακας 5-19 Τιμή GWP μεταξύ υπόθεσης ουδέτερου και θετικού αντικτύπου της δέσμευσης βιογενούς CO₂, με κάλυψη των ηλεκτρικών αναγκών από διαφορετικές πηγές για την μονάδα του έτους 2030.

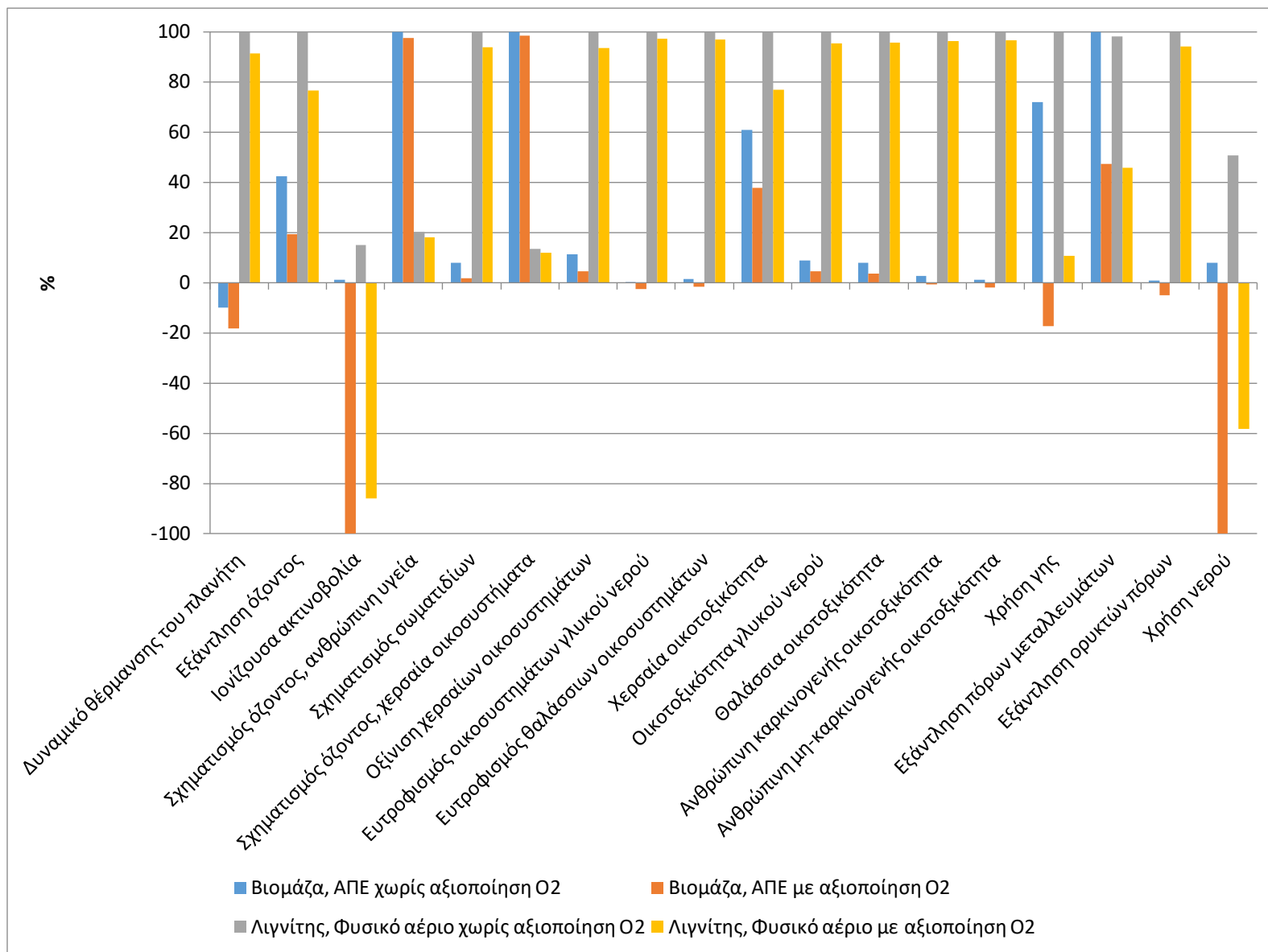
| Κατηγορία επιπτώσεων | Μονάδα | Βιομάζα, ΑΠΕ χωρίς όφελος δέσμευσης | Βιομάζα, ΑΠΕ με όφελος δέσμευσης | Λιγνίτης, Φυσικό αέριο |
|--------------------------------|------------------------|-------------------------------------|----------------------------------|------------------------|
| Δυναμικό θέρμανσης του πλανήτη | kg CO ₂ -eq | 440 | -1076 | 10914 |

5.3.4 Αξιοποίηση Οξυγόνου

Στο σενάριο αυτό εξετάζεται η περίπτωση αξιοποίησης του παραγόμενου από τον ηλεκτρολύτη οξυγόνου. Η αξιοποίηση αυτή μειώνει τον περιβαλλοντικό αντίκτυπο του ηλεκτρολύτη καθώς αποφεύγεται η παραγωγή του οξυγόνου με την μέθοδο του κρουγονικού διαχωρισμού του αέρα. Να σημειωθεί πως δεν έχει μοντελοποιηθεί το σύστημα αποθήκευσης και συμπίεσης του απαιτούμενου οξυγόνου καθώς θεωρείται ότι έχει ελάχιστο αντίκτυπο [94] και μία τέτοια ανάλυση είναι εκτός των ορίων της παρούσας εργασίας.

Παρακάτω παρουσιάζεται το Διάγραμμα 5-20 του περιβαλλοντικού αντικτύπου, καθώς και ο Πίνακας 5-20 με τις απόλυτες τιμές του δείκτη της υπερθέρμανσης του πλανήτη (GWP) ανά τόνο παραγόμενης μεθανόλης για τον κύκλο ζωής της εγκατάστασης με αξιοποίηση και απελευθέρωση του παραγόμενου οξυγόνου, αρχικά με πηγή ενέργειας την βιομάζα και τις ΑΠΕ και ύστερα λιγνιτικό σταθμό και σταθμό φυσικού αερίου.

Παρατηρείται πως όταν οι ανάγκες καλύπτονται από λιγνιτικό σταθμό και σταθμό φυσικού αερίου, η σχετική μείωση του αποτυπώματος με την χρησιμοποίηση του οξυγόνου, είναι πολύ μικρότερη από ότι όταν χρησιμοποιούνται πράσινες πηγές ενέργειας οι οποίες έχουν χαμηλό αποτύπωμα. Οι κατηγορίες επιπτώσεων που φαίνεται να επηρεάζονται σημαντικά είναι η ιονίζουσα ακτινοβολία, η χρήση γης και η χρήση νερού, το οποίο εξηγείται με το ότι η μέθοδος του κρουγονικού διαχωρισμού του αέρα για την παραγωγή οξυγόνου, η οποία αποφεύγεται, έχει υψηλό αντίκτυπο σε αυτές τις κατηγορίες.



Διάγραμμα 5-20 Συγκριτικά αποτελέσματα μεταξύ απελευθέρωσης και χρησιμοποίησης του παραγόμενου οξυγόνου, με κάλυψη των ηλεκτρικών αναγκών από διαφορετικές πηγές για την μονάδα του έτους 2030.

Πίνακας 5-20 Τιμή GWP για απελευθέρωση και χρησιμοποίηση του παραγόμενου οξυγόνου, με κάλυψη των ηλεκτρικών αναγκών από διάφορες για την μονάδα του έτους 2030.

| Κατηγορία επιπτώσεων | Μονάδα | Βιομάζα, ΑΠΕ χωρίς αξιοποίηση O ₂ | Βιομάζα, ΑΠΕ με αξιοποίηση O ₂ | Λιγνίτης, Φυσικό αέριο χωρίς αξιοποίηση O ₂ | Λιγνίτης, Φυσικό αέριο με αξιοποίηση O ₂ |
|--------------------------------|-------------------------|--|---|--|---|
| Δυναμικό θέρμανσης του πλανήτη | kg CO ₂ - eq | -1076 | -1995 | 10914 | 9996 |

5.4 Αποτελέσματα Σεναρίου Έτους 2023

Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για το σενάριο του έτους 2023 στο οποίο η παραγωγή μεθανόλης είναι 1.8 t/h όσο λειτουργεί η μονάδα και ο συντελεστής CF είναι 0.7, ενώ χρησιμοποιείται ένας PEM ηλεκτρολύτης ισχύος 20 MW. Η αρχή λειτουργίας του συστήματος παραμένει ίδια, διαφέρει όμως και πάλι η κλίμακα και η ηλεκτρική κατανάλωση του ηλεκτρολύτη η οποία είναι υψηλότερη και από τα δύο προηγούμενα σενάρια, επίσης στο στάδιο της συμπίεσης υπάρχει και ένας συμπιεστής για το υδρογόνο, διότι οι σημερινοί ηλεκτρολύτες δεν το συμπιέζουν στην κατάλληλη πίεση των 60 bar. Να σημειωθεί ότι το εργοστάσιο βιομάζας ισχύος 375 MW παράγει περισσότερη ενέργεια από ότι χρειάζεται η μονάδα και επομένως είτε καλύπτει όλες τις ανάγκες είτε επιλέγεται η χρήση άλλης πηγής ενέργειας.

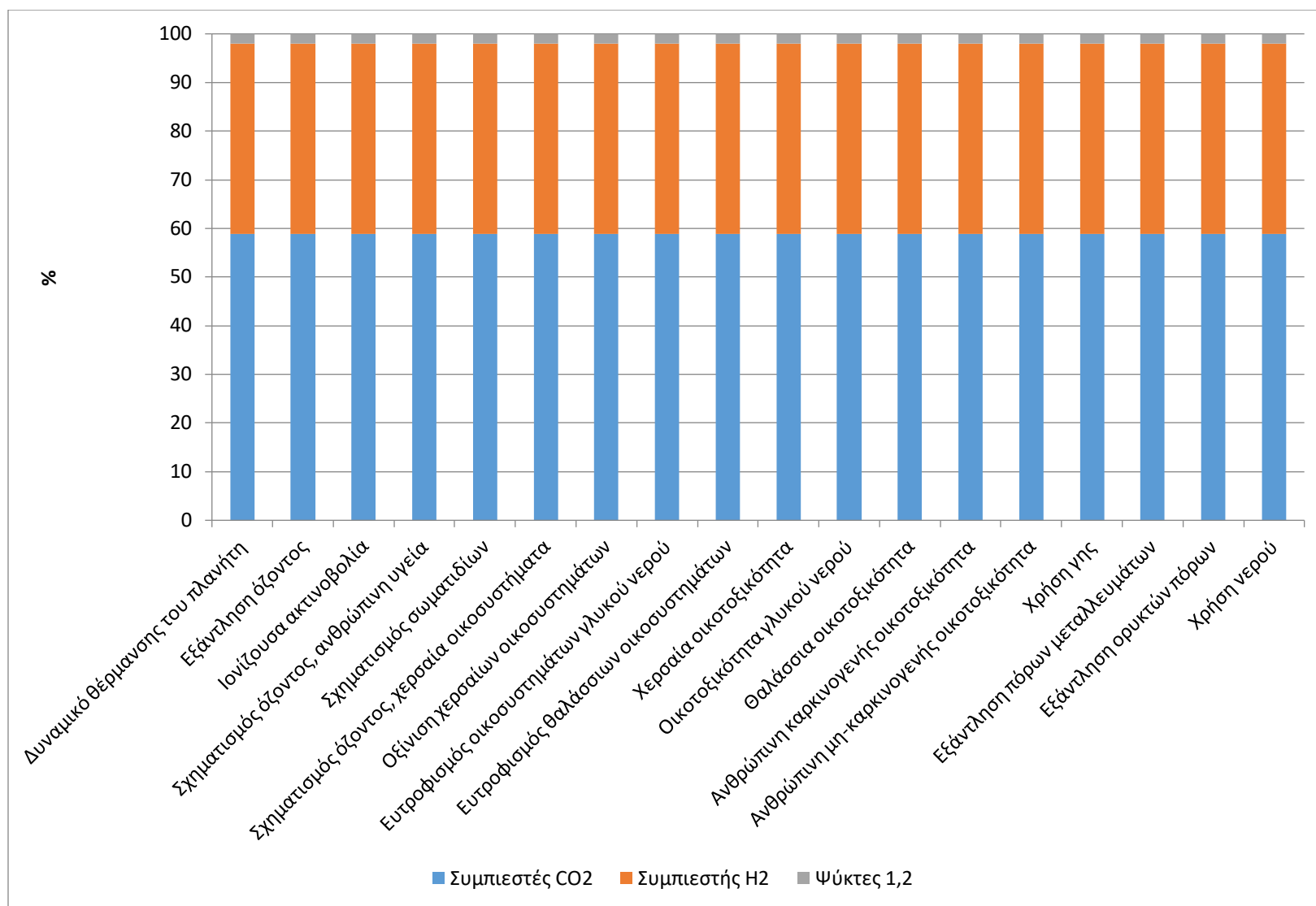
5.4.1 Αντίκτυπος Κατασκευής και Συντήρησης της εγκατάστασης

Σε αυτό το σημείο συγκρίνεται ο αντίκτυπος μεταξύ του σταδίου της ηλεκτρόλυσης, της συμπίεσης, της αντίδρασης, του καθαρισμού και των βοηθητικών μερών (καλώδια, σωλήνες, τσιμέντο για βάσεις, βοηθητικά και ηλεκτρονικά μέρη εγκατάστασης). Ανάλυση στις επιμέρους συνιστώσες του γίνεται μόνο για το στάδιο της συμπίεσης καθώς μόνο αυτό είναι διαφορετικό σε σχέση με τις μονάδες των άλλων ετών, έχοντας έναν παραπάνω συμπιεστή υδρογόνου.

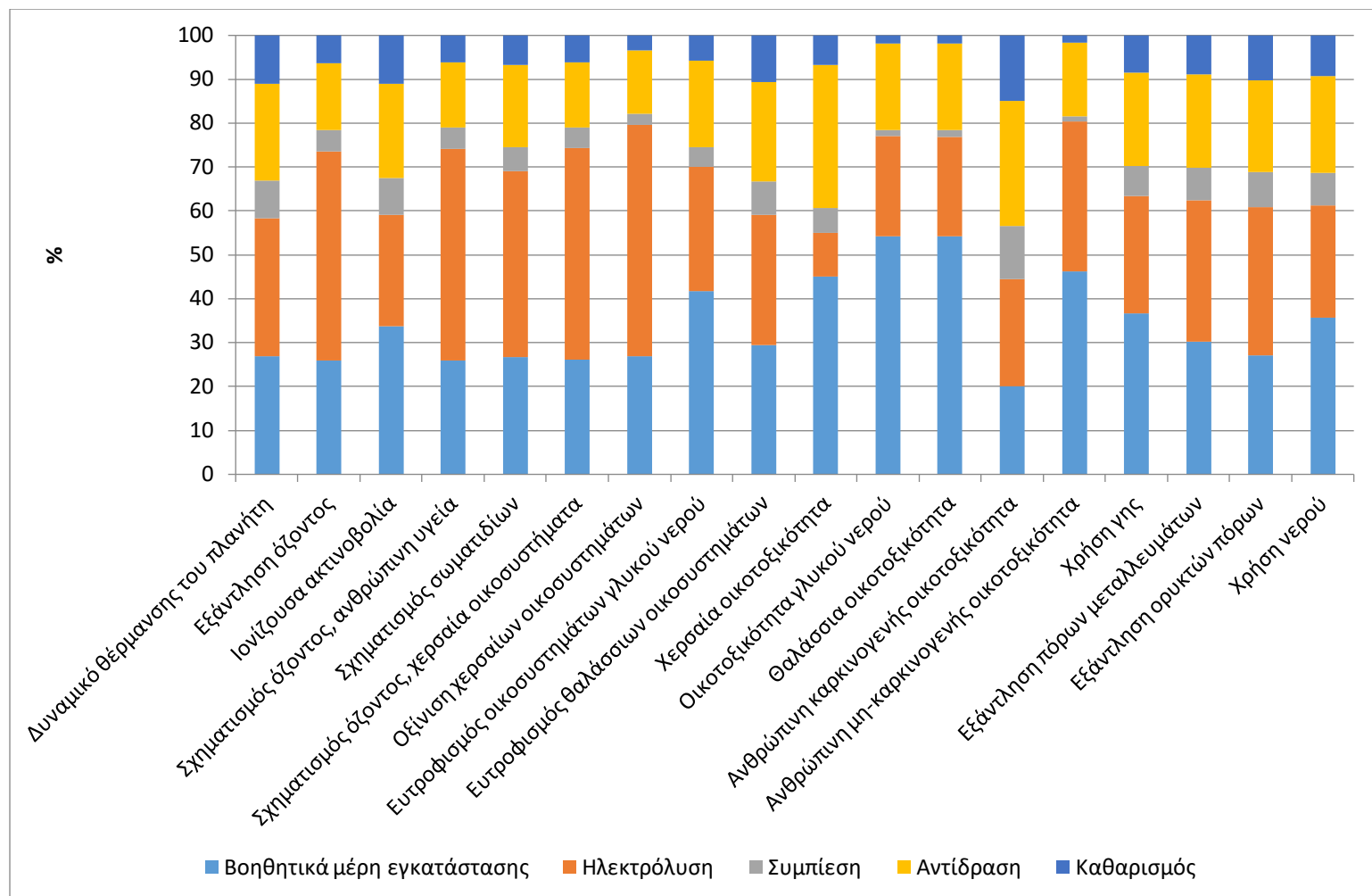
Παρακάτω παρουσιάζεται το Διάγραμμα 5-21 του περιβαλλοντικού αντικτύπου, καθώς και ο Πίνακας 5-21 με την απόλυτη τιμή του δείκτη της υπερθέρμανσης του πλανήτη (GWP) ανά τόνο παραγόμενης μεθανόλης για το στάδιο της συμπίεσης. Έπειτα παρουσιάζεται το Διάγραμμα 5-22 του περιβαλλοντικού αντικτύπου, καθώς και ο Πίνακας 5-22 με την απόλυτη τιμή του δείκτη της υπερθέρμανσης του πλανήτη (GWP) ανά τόνο παραγόμενης μεθανόλης για τα διάφορα στάδια της εγκατάστασης.

Όσον αφορά το στάδιο της συμπίεσης, παρατηρείται ότι η συνεισφορά του συμπιεστή H₂ στο περιβαλλοντικό αποτύπωμα είναι ελάχιστα μικρότερη από αυτή του συνόλου των τριών συμπιεστών, το οποίο εξηγείται με την μικρότερη μάζα του. Επίσης λόγω του ότι το υλικό

κατασκευής είναι κοινό για όλες τις συσκευές του σταδίου της συμπίεσης, ο αντίκτυπος κάθε συσκευής στις 18 κατηγορίες επιπτώσεων λαμβάνει το ίδιο ποσοστό κάθε φορά.



Διάγραμμα 5-21 Συγκριτικά αποτελέσματα για την κατασκευή και συντήρηση του σταδίου της συμπίεσης ανά τόνο παραγόμενης μεθανόλης για την εγκατάσταση του έτους 2023.



Διάγραμμα 5-22 Συγκριτικά αποτελέσματα για την κατασκευή και συντήρηση μεταξύ διαφόρων μερών της εγκατάστασης ανά τόνο παραγόμενης μεθανόλης για την εγκατάσταση του έτους 2023.

Πίνακας 5-21 Τιμή GWP για την κατασκευή και συντήρηση του σταδίου της συμπίεσης ανά τόνο παραγόμενης μεθανόλης για την εγκατάσταση του έτους 2023.

| Κατηγορία επιπτώσεων | Μονάδα | Σύνολο | Συμπιεστές CO ₂ | Συμπιεστής H ₂ | Ψύκτες 1,2 |
|--------------------------------|------------------------|--------|----------------------------|---------------------------|------------|
| Δυναμικό θέρμανσης του πλανήτη | kg CO ₂ -eq | 0.89 | 0.52 | 0.35 | 0.02 |

Πίνακας 5-22 Τιμή GWP για την κατασκευή και συντήρηση των διαφόρων μερών της εγκατάστασης ανά τόνο παραγόμενης μεθανόλης για την εγκατάσταση του έτους 2023.

| Κατηγορία επιπτώσεων | Μονάδα | Σύνολο | Βοηθητικά μέρη εγκατάστασης | Ηλ/ση | Συμπίεση | Αντίδραση | Καθαρισμός |
|--------------------------------|------------------------|--------|-----------------------------|-------|----------|-----------|------------|
| Δυναμικό θέρμανσης του πλανήτη | kg CO ₂ -eq | 10.34 | 2.78 | 3.25 | 0.89 | 2.29 | 1.14 |

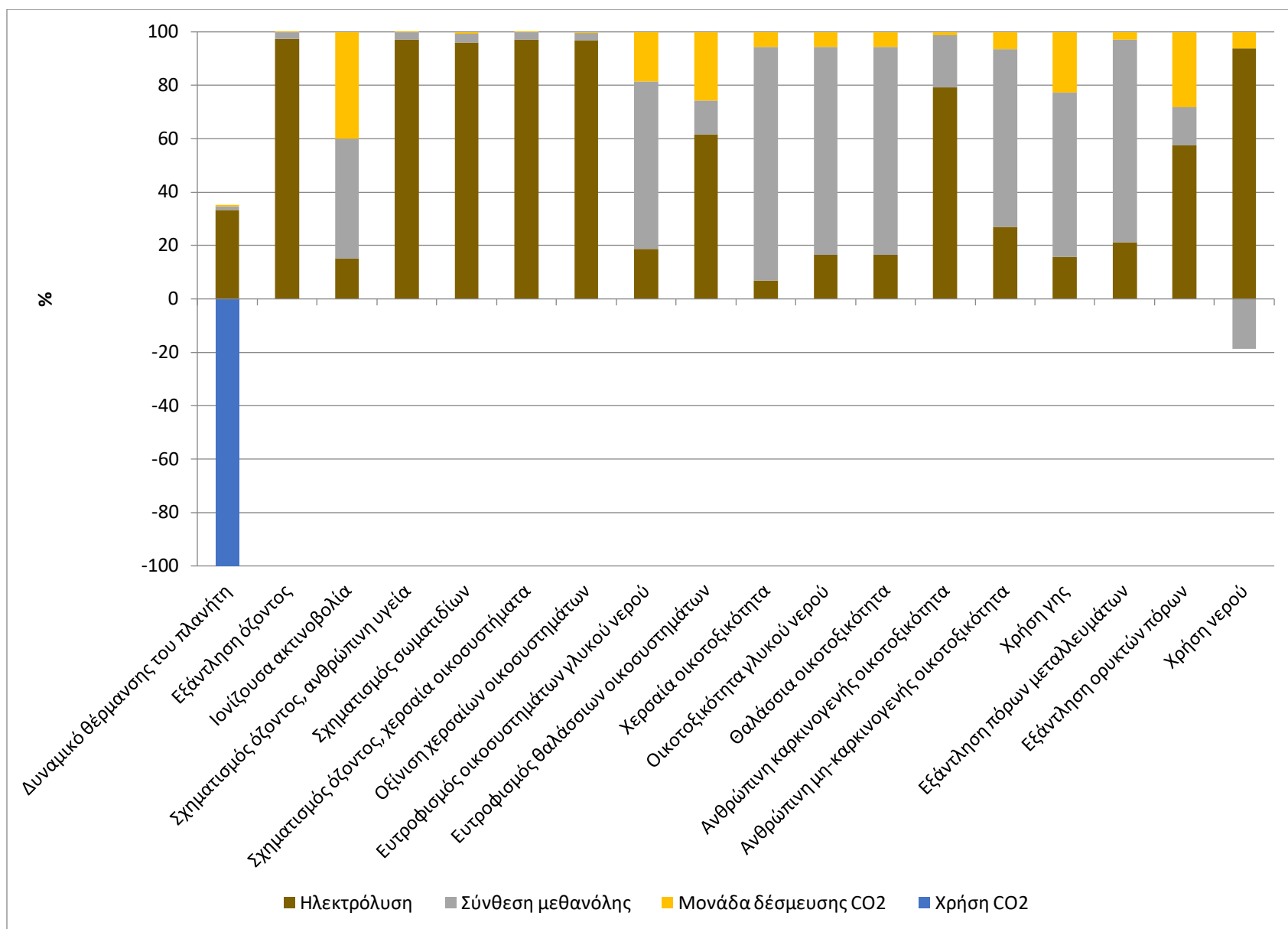
5.4.2 Συνολική Λειτουργία

Στο σημείο αυτό εξετάζεται ο συνολικός αντίκτυπος της μονάδας ανάλογα με την εκάστοτε πηγή ενέργειας. Επίσης όπως αναφέρθηκε οι ανάγκες υπερκαλύπτονται από το ηλεκτροπαραγωγό σταθμό βιομάζας των 375 MW επομένως εξετάζεται σε ένα σενάριο ως μοναδική πηγή ενέργειας. Ύστερα εξετάζεται και η περίπτωση κάλυψης όλων των αναγκών από ΑΠΕ και στην συνέχεια από λιγνιτικό σταθμό. Ως πηγή ενέργειας επιλέγεται να εξετασθεί και αυτή του δικτύου καθώς στις βάσεις του Simapro υπάρχουν δεδομένα για το τωρινό δίκτυο της Ελλάδας, το οποίο στα επόμενα έτη θα έχει αλλάξει, έχοντας διαφορετικές ποσοτώσεις από τις διάφορες πηγές ενέργειας.

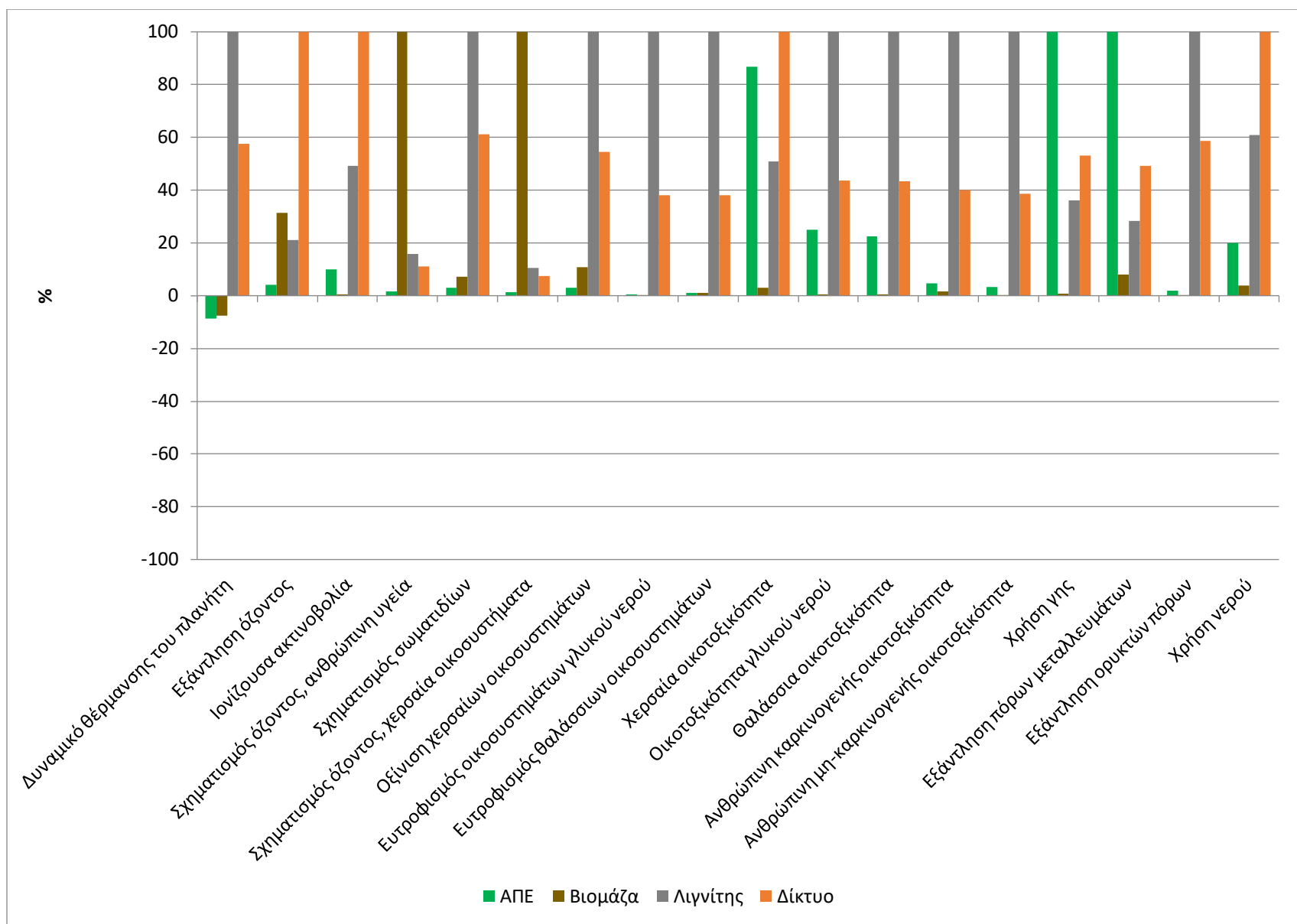
Παρουσιάζεται το Διάγραμμα 5-23 του περιβαλλοντικού αντικτύπου, καθώς και ο Πίνακας 5-23 με την απόλυτη τιμή του δείκτη της υπερθέρμανσης του πλανήτη (GWP) ανά τόνο παραγόμενης μεθανόλης για όλο το κύκλο ζωής της μονάδας με κάλυψη των αναγκών από ηλεκτροπαραγωγό σταθμό βιομάζας. Τέλος παρουσιάζεται το Διάγραμμα 5-24 του περιβαλλοντικού αντικτύπου, καθώς και ο Πίνακας 5-24 με την απόλυτη τιμή του δείκτη της υπερθέρμανσης του πλανήτη (GWP) ανά τόνο παραγόμενης μεθανόλης για όλο το κύκλο ζωής της μονάδας με κάλυψη των αναγκών από τις διάφορες πηγές ενέργειας.

Όσον αφορά το Διάγραμμα 5-23 παρατηρείται υψηλή επίδραση του σταδίου σύνθεσης της μεθανόλης σε αρκετές κατηγορίες επιπτώσεων, λόγω του ότι σε αυτές τις κατηγορίες σημαντική επίδραση είχε η χρήση ηλεκτρικής ενέργειας από ΑΠΕ, η οποία τώρα απουσιάζει, έχοντας αντικατασταθεί από βιομάζα εξ ολοκλήρου. Ωστόσο και πάλι το στάδιο της ηλεκτροδότησης φαίνεται να έχει τον υψηλότερο αντίκτυπο στις περισσότερες κατηγορίες.

Τέλος στο Διάγραμμα 5-24, όπως είναι αναμενόμενο αρνητικό δυναμικό θέρμανσης του πλανήτη παρουσιάζουν τα σενάρια στα οποία η κάλυψη των ενεργειακών αναγκών πραγματοποιείται με βιομάζα και ΑΠΕ, ενώ το υψηλότερο GWP παρουσιάζεται για την περίπτωση του λιγνίτη.



Διάγραμμα 5-23 Συγκριτικά αποτελέσματα για τον αντίκτυπο του κύκλου ζωής των διαφόρων σταδίων της μονάδας, ανά τόνο παραγόμενης μεθανόλης με κάλυψη των ηλεκτρικών αναγκών από ηλεκτροπαραγωγό σταθμό βιομάζας για την εγκατάσταση του έτους 2023.



Διάγραμμα 5-24 Συγκριτικά αποτελέσματα για τον αντίκτυπο του κύκλου ζωής της εγκατάστασης ανά τόνο παραγόμενης μεθανόλης με κάλυψη των ηλεκτρικών αναγκών από διαφορετικές πηγές ενέργειας για την εγκατάσταση του έτους 2023.

Πίνακας 5-23 Τιμή GWP για τον αντίκτυπο του κύκλου ζωής των διαφόρων σταδίων της μονάδας, ανά τόνο παραγόμενης μεθανόλης με κάλυψη των ηλεκτρικών αναγκών από ηλεκτροπαραγωγό σταθμό βιομάζας για την εγκατάσταση του έτους 2023.

| Κατηγορία επιπτώσεων | Μονάδα | Σύνολο | Ηλεκτρόλυση | Σύνθεση μεθανόλης | Μονάδα δέσμευσης CO ₂ | Χρήση CO ₂ |
|--------------------------------|-------------------------|--------|-------------|-------------------|----------------------------------|-----------------------|
| Δυναμικό θέρμανσης του πλανήτη | kg CO ₂ - eq | -982 | 506 | 18 | 10 | -1516 |

Πίνακας 5-24 Τιμή GWP για τον αντίκτυπο ολόκληρου του κύκλου ζωής της εγκατάστασης ανά τόνο παραγόμενης μεθανόλης με κάλυψη των ηλεκτρικών αναγκών από διαφορετικές πηγές ενέργειας για την εγκατάσταση του έτους 2023.

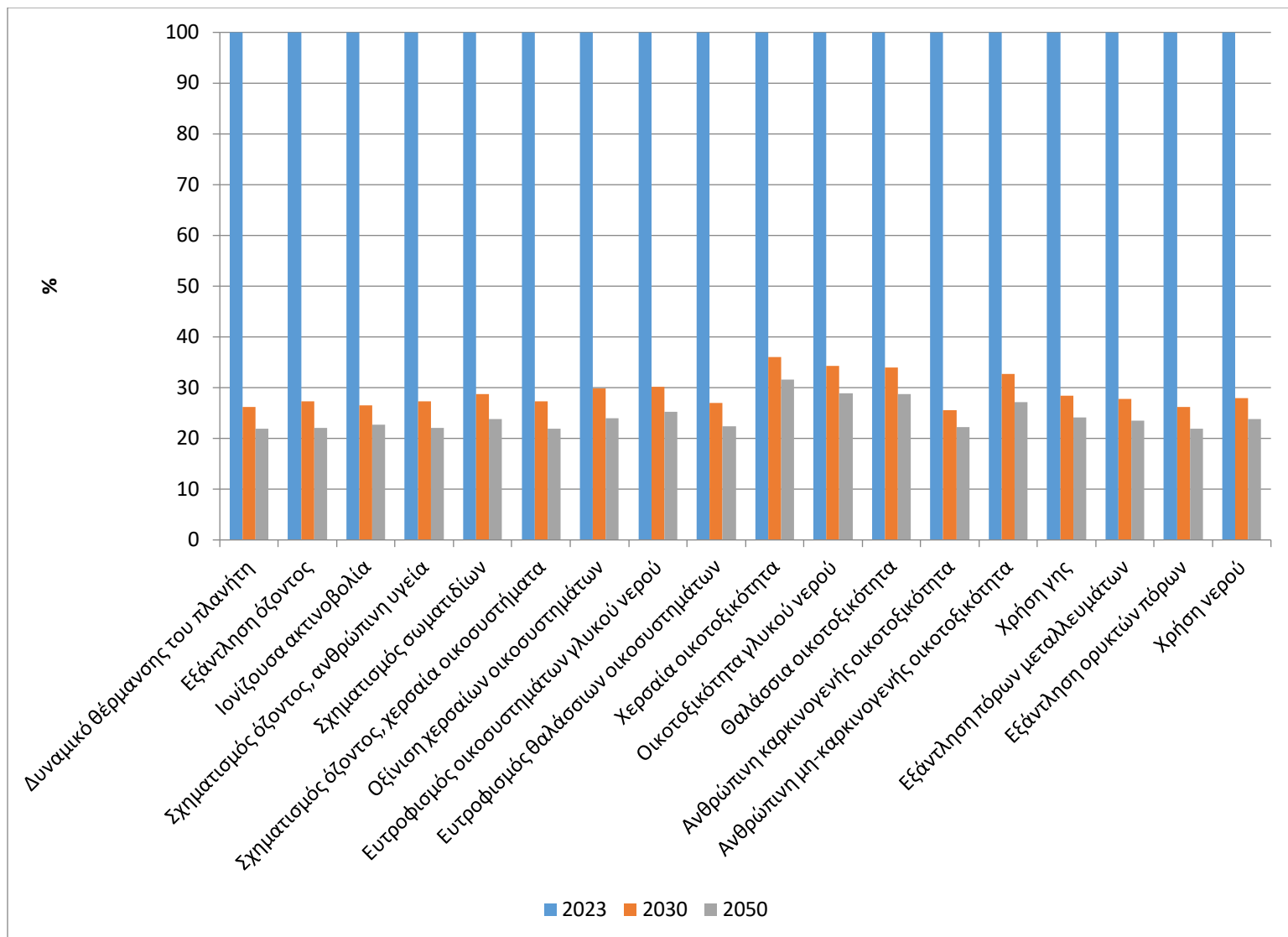
| Κατηγορία επιπτώσεων | Μονάδα | ΑΠΕ | Βιομάζα | Λιγνίτης | Δίκτυο |
|--------------------------------|------------------------|-------|---------|----------|--------|
| Δυναμικό θέρμανσης του πλανήτη | kg CO ₂ -eq | -1148 | -982 | 13218 | 7595 |

5.5 Σύγκριση Μονάδων

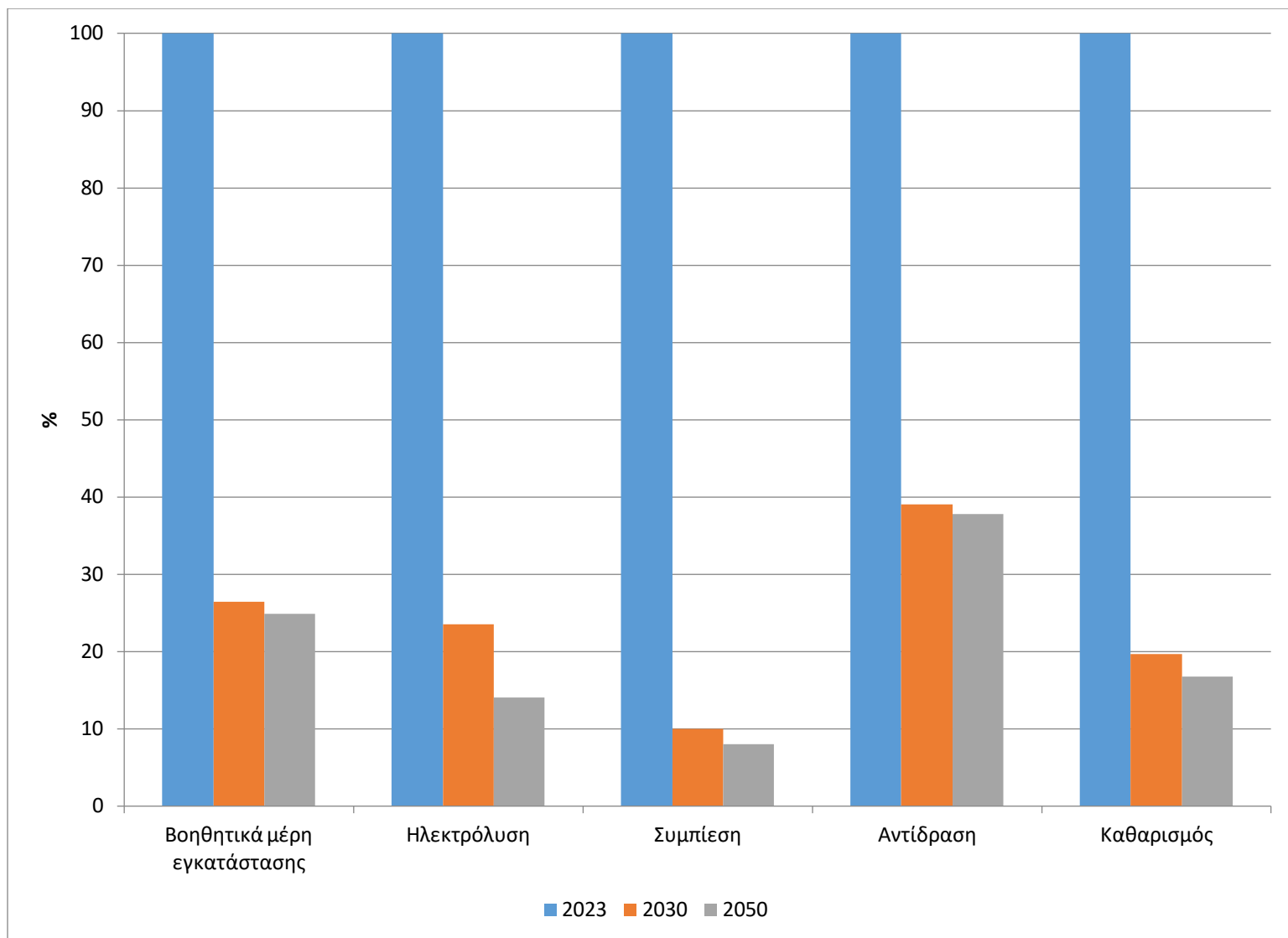
5.5.1 Κατασκευή και Συντήρηση

Σε αυτό το σημείο γίνεται σύγκριση μεταξύ των μονάδων των ετών 2023, 2030 και 2050. Αρχικά συγκρίνονται τα στάδια της κατασκευής και συντήρησης για το σύνολο της εγκατάστασης. Η κατασκευή και συντήρηση των διαφόρων μερών της εγκατάστασης γίνεται με τον ίδιο τρόπο και τα ίδια υλικά για τις τρεις μονάδες με εξαίρεση το στάδιο της συμπίεσης όπου στην μονάδα του έτους 2023 υπάρχει και ένας συμπιεστής υδρογόνου. Ωστόσο λόγω του ότι η κλιμάκωση του μεγέθους γίνεται με βάση τον κανόνα του συντελεστή των έξι δεκάτων για τον ηλεκτρολύτη αλλά και λόγω των μαζών των συσκευών που προκύπτουν από την παράλληλη έρευνα στο ASPEN, διαπιστώνεται ότι απαιτούνται περισσότερα υλικά ανά τόνο μεθανόλης, όσο μικραίνει η μονάδα. Με αυτό το τρόπο ερμηνεύεται το υψηλότερο περιβαλλοντικό αποτύπωμα της εγκατάστασης και συντήρησης των μικρότερων μονάδων. Ο αντίκτυπος για το έτος 2023 είναι αρκετά μεγαλύτερος λόγω του ότι η μονάδα έχει σχεδόν 27 φορές μικρότερη δυναμικότητα από αυτή του 2030, ενώ η μονάδα του 2030 έχει μόνο 4.3 φορές μικρότερη δυναμικότητα από αυτή του 2050.

Παρακάτω παρουσιάζεται το Διάγραμμα 5-25 του περιβαλλοντικού αντικτύπου, καθώς και ο Πίνακας 5-25 με την απόλυτη τιμή του δείκτη της υπερθέρμανσης του πλανήτη (GWP) ανά τόνο παραγόμενης μεθανόλης για την κατασκευή και συντήρηση των τριών μονάδων. Επίσης παρουσιάζεται το Διάγραμμα 5-26 με την σύγκριση του δυναμικού θέρμανσης του πλανήτη (GWP) ανά τόνο παραγόμενης μεθανόλης για την κατασκευή και συντήρηση των επιμέρους σταδίων των τριών μονάδων.



Διάγραμμα 5-25 Συγκριτικά αποτελέσματα για την κατασκευή και συντήρηση των μονάδων ανά τόνο παραγόμενης μεθανόλης για τις εγκαταστάσεις των ετών 2023, 2030 και 2050.



Διάγραμμα 5-26 Συγκριτικά αποτελέσματα δυναμικού θέρμανσης του πλανήτη για την κατασκευή και συντήρηση των διαφόρων σταδίων των μονάδων ανά τόνο παραγόμενης μεθανόλης για τις εγκαταστάσεις των ετών 2023, 2030 και 2050.

Πίνακας 5-25 Τιμή GWP για την κατασκευή και συντήρηση των μονάδων ανά τόνο παραγόμενης μεθανόλης για τις εγκαταστάσεις των ετών 2023, 2030 και 2050.

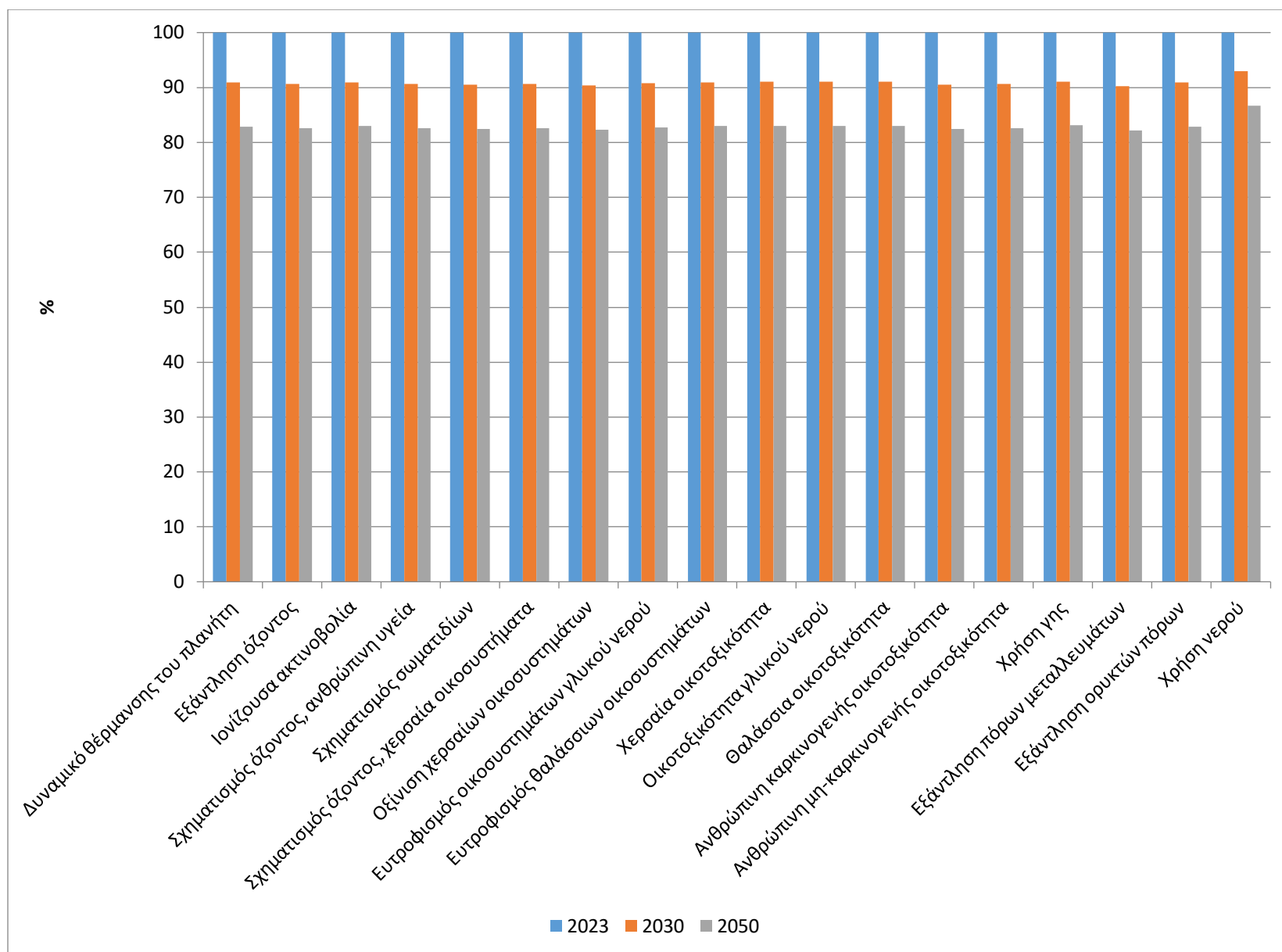
| Κατηγορία επιπτώσεων | Μονάδα | Κατασκευή και συντήρηση Εγκατάστασης 2023 | Κατασκευή και συντήρηση Εγκατάστασης 2030 | Κατασκευή και συντήρηση Εγκατάστασης 2050 |
|--------------------------------|-------------------------|---|---|---|
| Δυναμικό θέρμανσης του πλανήτη | kg CO ₂ - eq | 10.34 | 2.70 | 2.27 |

5.5.2 Ηλεκτρόλυση

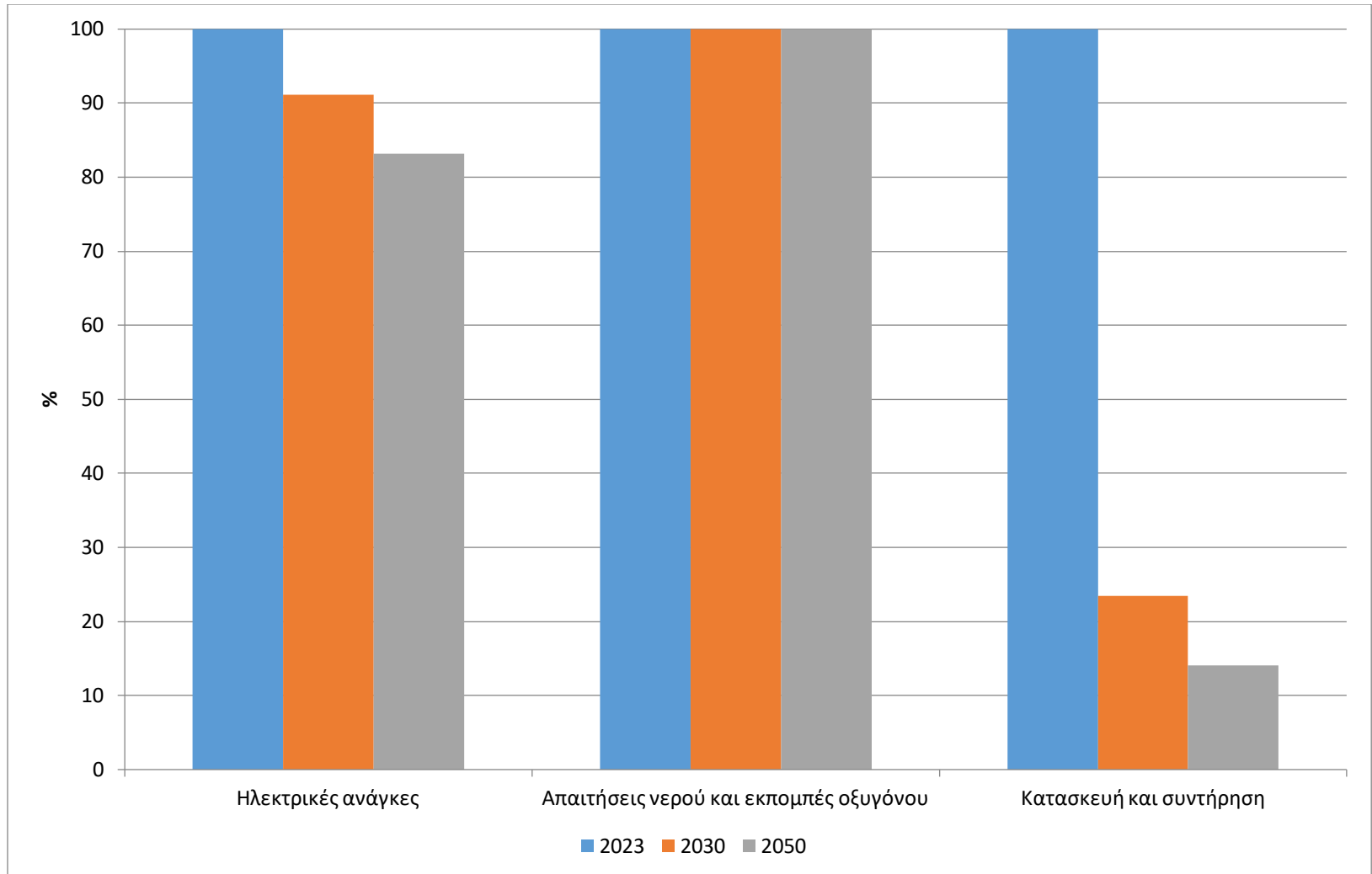
Εξετάζεται το στάδιο της ηλεκτρόλυσης καθώς έχει υψηλό ποσοστό συμμετοχής στον συνολικό αντίκτυπο της μονάδας και η ηλεκτρική κατανάλωση ανά τόνο παραγόμενου υδρογόνου μεταβάλλεται με τα έτη.

Οι ηλεκτρικές ανάγκες της ηλεκτρόλυσης θεωρείται ότι καλύπτονται αποκλειστικά από ΑΠΕ ώστε να γίνει σωστή σύγκριση μεταξύ των μονάδων. Αυτό διότι η ηλεκτρόλυση του έτους 2050 απαιτεί μεγαλύτερα ποσά ενέργειας και επομένως όταν λαμβάνει από τον ηλεκτροπαραγωγό σταθμό βιομάζας ισχύος 375 MW όλη την ενέργεια που αυτός δύναται να προσφέρει, το ποσοστό των ΑΠΕ για την ηλεκτρόλυση γίνεται πολύ υψηλότερο από το αντίστοιχο ποσοστό για το έτος 2030 για παράδειγμα.

Παρατηρείται αύξηση του αντικτύπου σε όλους τους τομείς με την αποκλιμάκωση της μονάδας, διότι οι ηλεκτρικές καταναλώσεις της ηλεκτρόλυσης για τα έτη 2023, 2030 και 2050 είναι 52.75, 48 και 43.8 kWh/kg H₂ αντίστοιχα. Το υψηλότερο περιβαλλοντικό αποτύπωμα παρατηρείται και λόγω υψηλότερου αντικτύπου του σταδίου κατασκευής και συντήρησης όπως εξηγήθηκε παραπάνω, με βάση την κλιμάκωση του μεγέθους, με τον κανόνα του συντελεστή των έξι δεκάτων για τον ηλεκτρολύτη. Η κατηγορία επιπτώσεων με την λιγότερη αύξηση φαίνεται να είναι αυτή της χρήσης νερού, καθώς ενώ με την αύξηση των ηλεκτρικών αναγκών αυξάνεται η χρήση νερού (καθώς απαιτείται νερό για την παραγωγή της ενέργειας αυτής από τις ΑΠΕ), η χρήση νερού για την ίδια την διαδικασία της ηλεκτρόλυσης παραμένει σταθερή (10 kg νερού ανά kg υδρογόνου). Παρακάτω παρουσιάζεται το Διάγραμμα 5-27 του περιβαλλοντικού αντικτύπου, καθώς και ο Πίνακας 5-26 με την απόλυτη τιμή του δείκτη της υπερθέρμανσης του πλανήτη (GWP) ανά τόνο παραγόμενης μεθανόλης για το κύκλο ζωής του σταδίου της ηλεκτρόλυσης για τις τρεις μονάδες. Τέλος παρουσιάζεται το Διάγραμμα 5-28 με την σύγκριση του δυναμικού θέρμανσης του πλανήτη (GWP) ανά τόνο παραγόμενης μεθανόλης για τις επιμέρους συνιστώσες του σταδίου της ηλεκτρόλυσης για τις τρεις μονάδες.



Διάγραμμα 5-27 Συγκριτικά αποτελέσματα για τον αντίκτυπο του σταδίου της ηλεκτρόλυσης ανά τόνο παραγόμενης μεθανόλης με κάλυψη των ηλεκτρικών αναγκών από ΑΠΕ για τις εγκαταστάσεις των ετών 2023, 2030 και 2050.



Διάγραμμα 5-28 Συγκριτικά αποτελέσματα για το δυναμικό θέρμανσης του πλανήτη, για τις επιμέρους συνιστώσες του σταδίου της ηλεκτρόλυσης για τις εγκαταστάσεις των ετών 2023, 2030 και 2050.

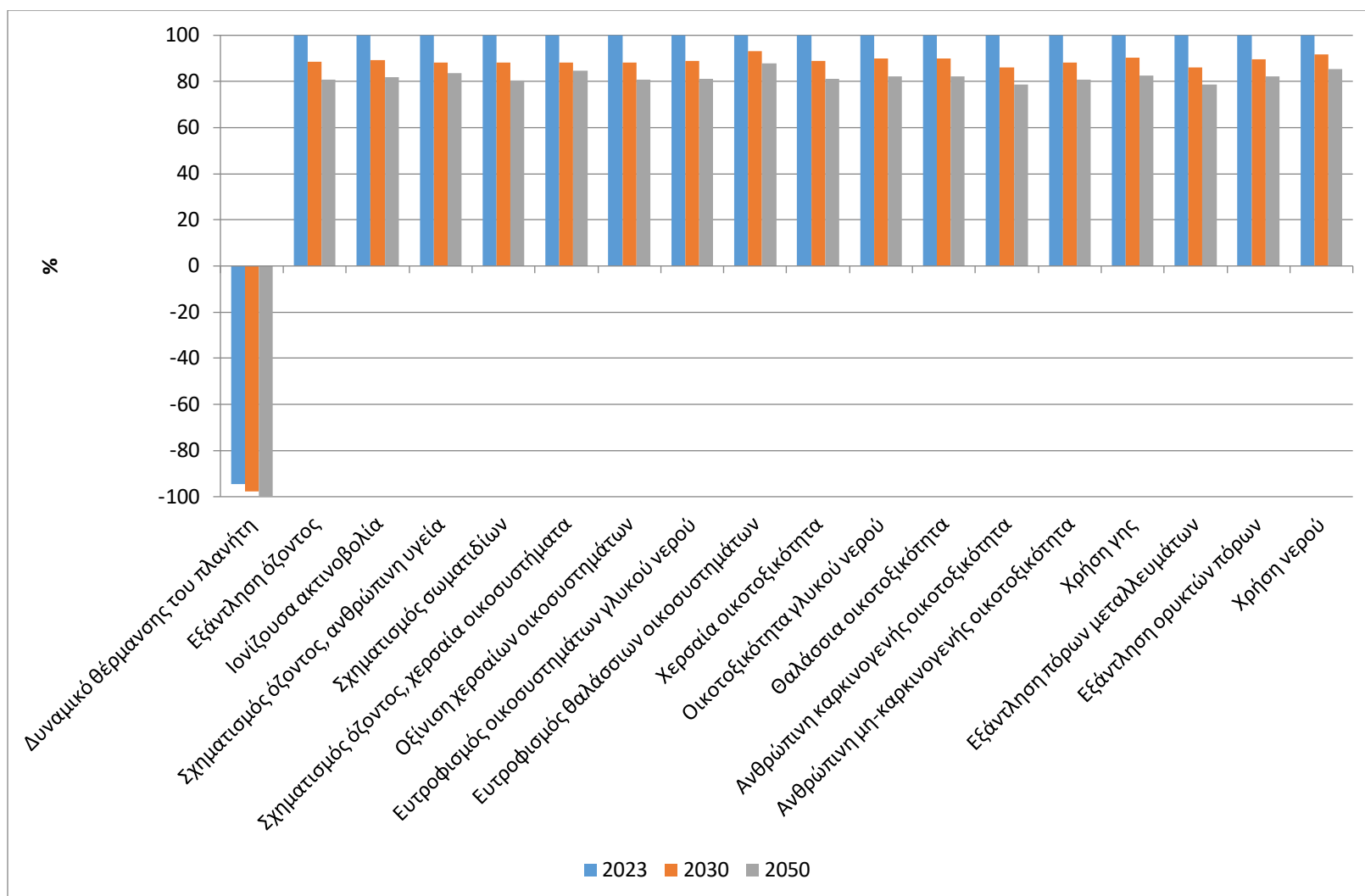
Πίνακας 5-26 Τιμή GWP για τον αντίκτυπο του σταδίου της ηλεκτρόλυσης ανά τόνο παραγόμενης μεθανόλης με κάλυψη των ηλεκτρικών αναγκών από ΑΠΕ για τις εγκαταστάσεις των ετών 2023, 2030 και 2050.

| Κατηγορία επιπτώσεων | Μονάδα | Στάδιο ηλεκτρόλυσης 2023 | Στάδιο ηλεκτρόλυσης 2030 | Στάδιο ηλεκτρόλυσης 2050 |
|--------------------------------|------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| Δυναμικό θέρμανσης του πλανήτη | kg CO ₂ -eq | 343 | 311 | 283 |

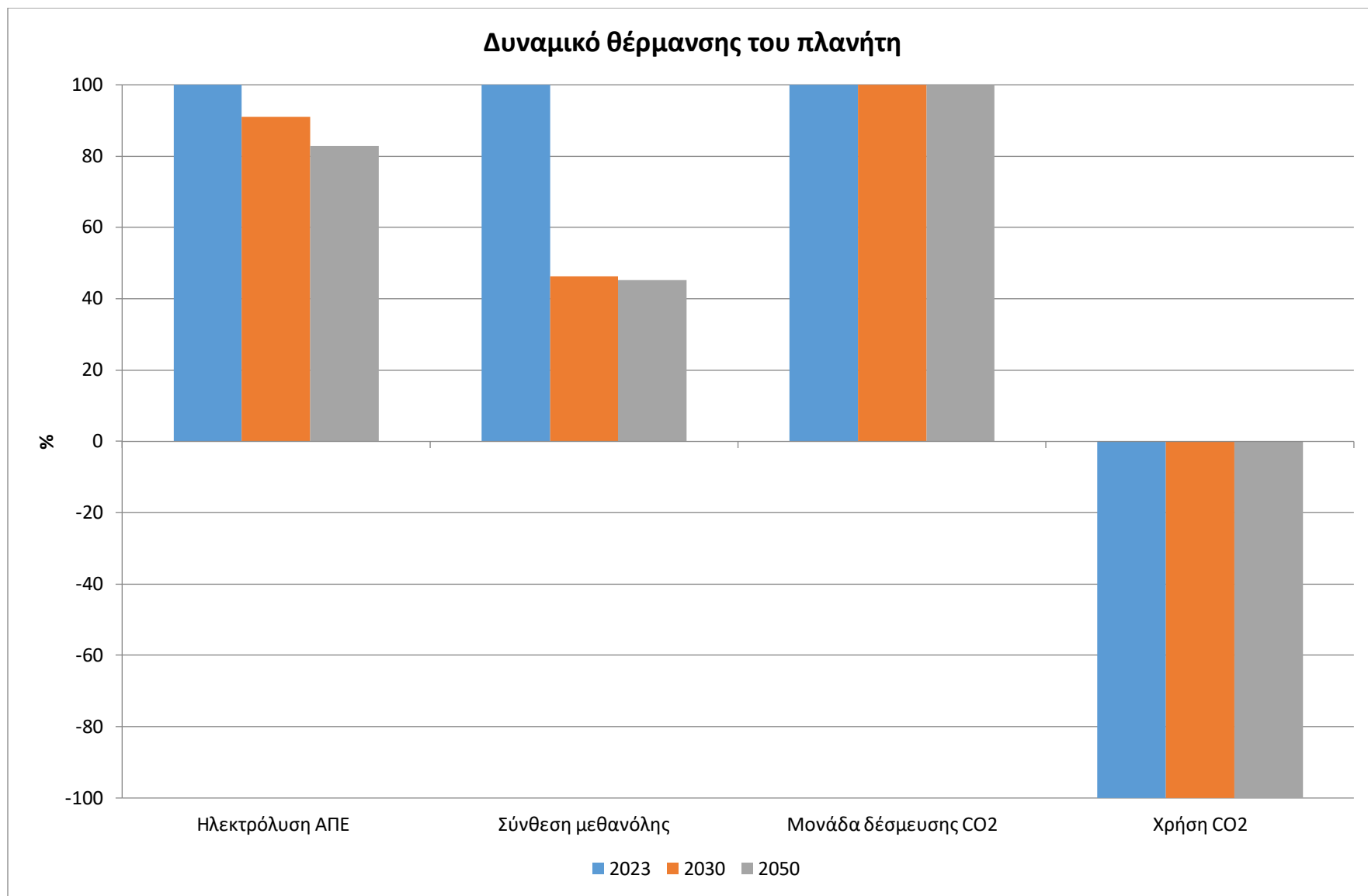
5.5.3 Συνολικός Αντίκτυπος Μονάδων

Υστερα συγκρίνεται ο συνολικός αντίκτυπος του κύκλου ζωής των μονάδων, όταν οι ηλεκτρικές ανάγκες καλύπτονται αποκλειστικά από ΑΠΕ, για τον ίδιο λόγο που εξηγήθηκε παραπάνω στην σύγκριση του σταδίου της ηλεκτρόλυσης μεταξύ των μονάδων. Το σενάριο “ΑΠΕ 100 %” έχει υψηλότερο αντίκτυπο, για το έτος 2023 και ύστερα για το έτος 2030 λόγω υψηλότερων καταναλώσεων του ηλεκτρολύτη καθώς και λόγω της κατασκευής και συντήρησης της μονάδας. Παρακάτω παρουσιάζεται το Διάγραμμα 5-29 του περιβαλλοντικού αντικτύπου, καθώς και ο Πίνακας 5-27 με την απόλυτη τιμή του δείκτη της υπερθέρμανσης του πλανήτη (GWP) ανά τόνο παραγόμενης μεθανόλης για το κύκλο ζωής των τριών μονάδων όταν οι ηλεκτρικές ανάγκες καλύπτονται από ΑΠΕ 100 %. Τέλος παρουσιάζεται το Διάγραμμα 5-30 με την σύγκριση του δυναμικού θέρμανσης του πλανήτη (GWP) ανά τόνο παραγόμενης μεθανόλης για τις επιμέρους συνιστώσες της μονάδας, όταν οι ηλεκτρικές ανάγκες καλύπτονται από ΑΠΕ 100 %, για τις εγκαταστάσεις των ετών 2023, 2030 και 2050.

Στο Διάγραμμα 5-30 ο αντίκτυπος του σταδίου της ηλεκτρόλυσης μειώνεται με την πάροδο του χρόνου για λόγους που έχουν αναλυθεί νωρίτερα. Επίσης ο αντίκτυπος του σταδίου της σύνθεσης της μεθανόλης είναι διαφορετικός για την εγκατάσταση του έτους 2023 λόγω του ενός επιπλέον συμπιεστή πέρα από την αποκλιμάκωση της παραγωγής και την αύξηση των απαιτούμενων υλικών για την κατασκευή και συντήρηση των διαφόρων συσκευών. Η διαφορά είναι τόσο σημαντική επειδή το στάδιο της συμπίεσης φέρει το υψηλότερο περιβαλλοντικό φορτίο όσον αφορά το στάδιο της σύνθεσης της μεθανόλης και ο συμπιεστής υδρογόνου είναι ελάχιστα λιγότερο ενεργοβόρος και βαρύτερος από ότι οι τρεις συμπιεστές CO₂ μαζί, φέροντας περίπου το 40% του συνολικού αντικτύπου του σταδίου της συμπίεσης. Επίσης ο αντίκτυπος της μονάδας της δέσμευσης όπως και της χρήσης CO₂ φαίνεται πως παραμένει σταθερός, καθώς το δεσμευόμενο CO₂ ανά τόνο μεθανόλης δεν μεταβάλλεται και έχει θεωρηθεί πως σταθερός παραμένει και ο τρόπος λειτουργίας της μονάδας δέσμευσης.



Διάγραμμα 5-29 Συγκριτικά αποτελέσματα για τον αντίκτυπο των μονάδων ανά τόνο παραγόμενης μεθανόλης με κάλυψη των ηλεκτρικών αναγκών από ΑΠΕ για τα έτη 2023, 2030 και 2050.



Διάγραμμα 5-30 Συγκριτικά αποτελέσματα για το δυναμικό υπερθέρμανσης του πλανήτη, των σταδίων της μονάδας ανά τόνο παραγόμενης μεθανόλης με κάλυψη των ηλεκτρικών αναγκών από ΑΠΕ για τις εγκαταστάσεις των ετών 2023, 2030 και 2050.

Πίνακας 5-27 Τιμή GWP για τον αντίκτυπο των μονάδων ανά τόνο παραγόμενης μεθανόλης με κάλυψη των ηλεκτρικών αναγκών από ΑΠΕ για τα έτη 2023, 2030 και 2050.

| Κατηγορία επιπτώσεων | Μονάδα | Κύκλος ζωής μονάδας 2023, με χρήση ΑΠΕ | Κύκλος ζωής μονάδας 2030, με χρήση ΑΠΕ | Κύκλος ζωής μονάδας 2050, με χρήση ΑΠΕ |
|--------------------------------|-------------------------|--|--|--|
| Δυναμικό θέρμανσης του πλανήτη | kg CO ₂ - eq | -1148 | -1188 | -1216 |

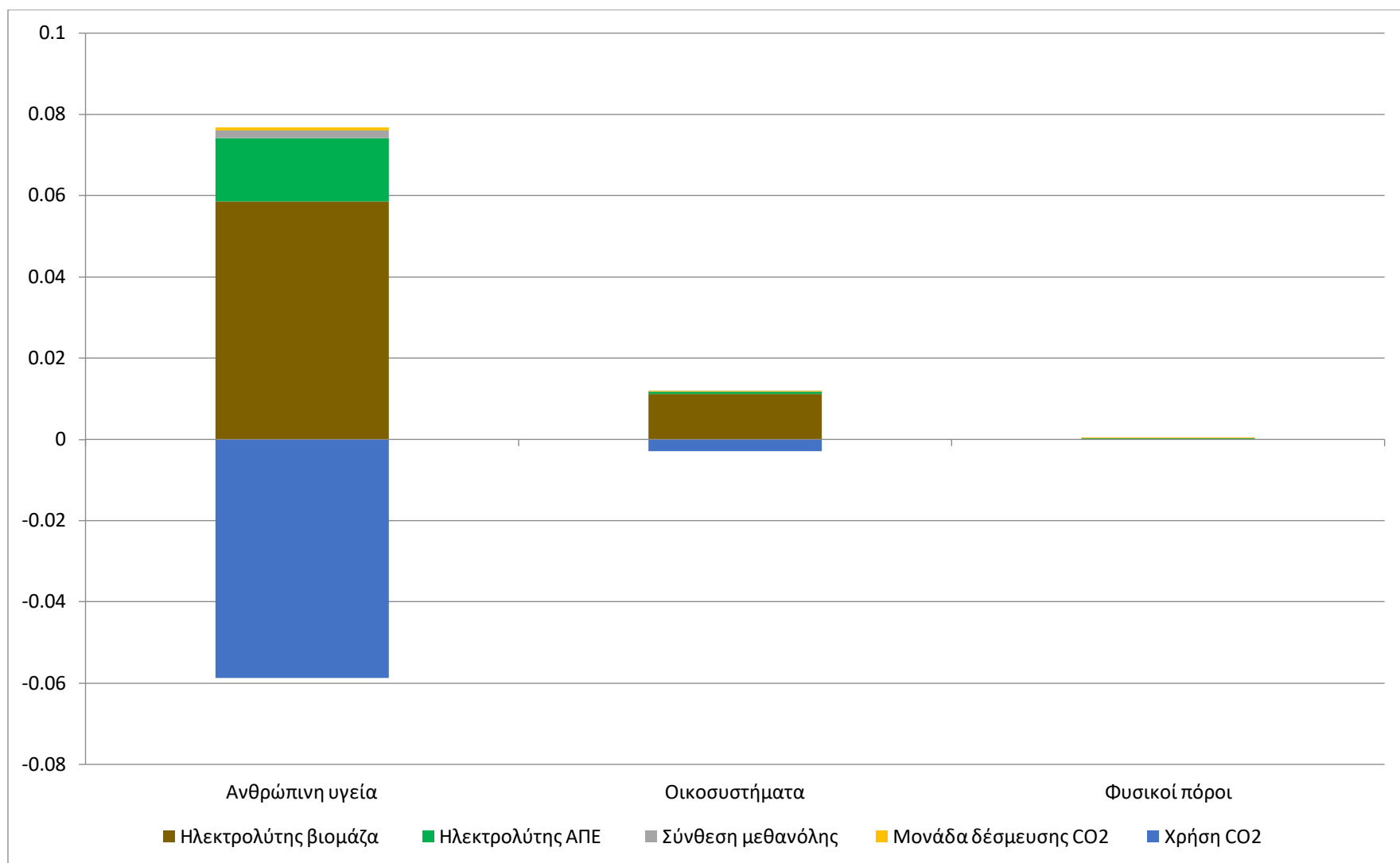
5.6 Αντίκτυπος στις Τελικές Κατηγορίες Επιπτώσεων

Τέλος πραγματοποιείται και μία ανάλυση σε τελικές κατηγορίες επιπτώσεων (endpoint) με κανονικοποίηση, ώστε να υπολογιστεί ο αντίκτυπος της παραγωγής μεθανόλης στις τρεις κατηγορίες :

- Βλάβη στην ανθρώπινη υγεία
- Βλάβη στην ποιότητα των οικοσυστημάτων
- Βλάβη στην διαθεσιμότητα των πόρων

Αρχικά πραγματοποιείται η ανάλυση για την μονάδα του έτους 2030, για λειτουργία της με κάλυψη των αναγκών από ηλεκτροπαραγωγό σταθμό βιομάζας και ΑΠΕ. Παρατηρείται πως η σημαντικότερη βλάβη προκαλείται στην ανθρώπινη υγεία και στα οικοσυστήματα. Η χρήση του CO₂ μειώνει σημαντικά την βλάβη στην ανθρώπινη υγεία, λόγω της αποφυγής εκπομπής CO₂, ενώ το στάδιο της ηλεκτρόλυσης φαίνεται να προκαλεί το μεγαλύτερο μέρος του προβλήματος. Μηδαμινός είναι συγκριτικά ο αντίκτυπος των υπόλοιπων σταδίων.

Παρακάτω παρουσιάζεται το Διάγραμμα 5-31 του περιβαλλοντικού αντικτύπου σε επίπεδο endpoint, καθώς και ο Πίνακας 5-28 με τις τιμές των τριών δεικτών ανά τόνο μεθανόλης για τον κύκλο ζωής της μονάδας του έτους 2030, για το σενάριο κάλυψης των αναγκών από ηλεκτροπαραγωγό σταθμό βιομάζας και ΑΠΕ.

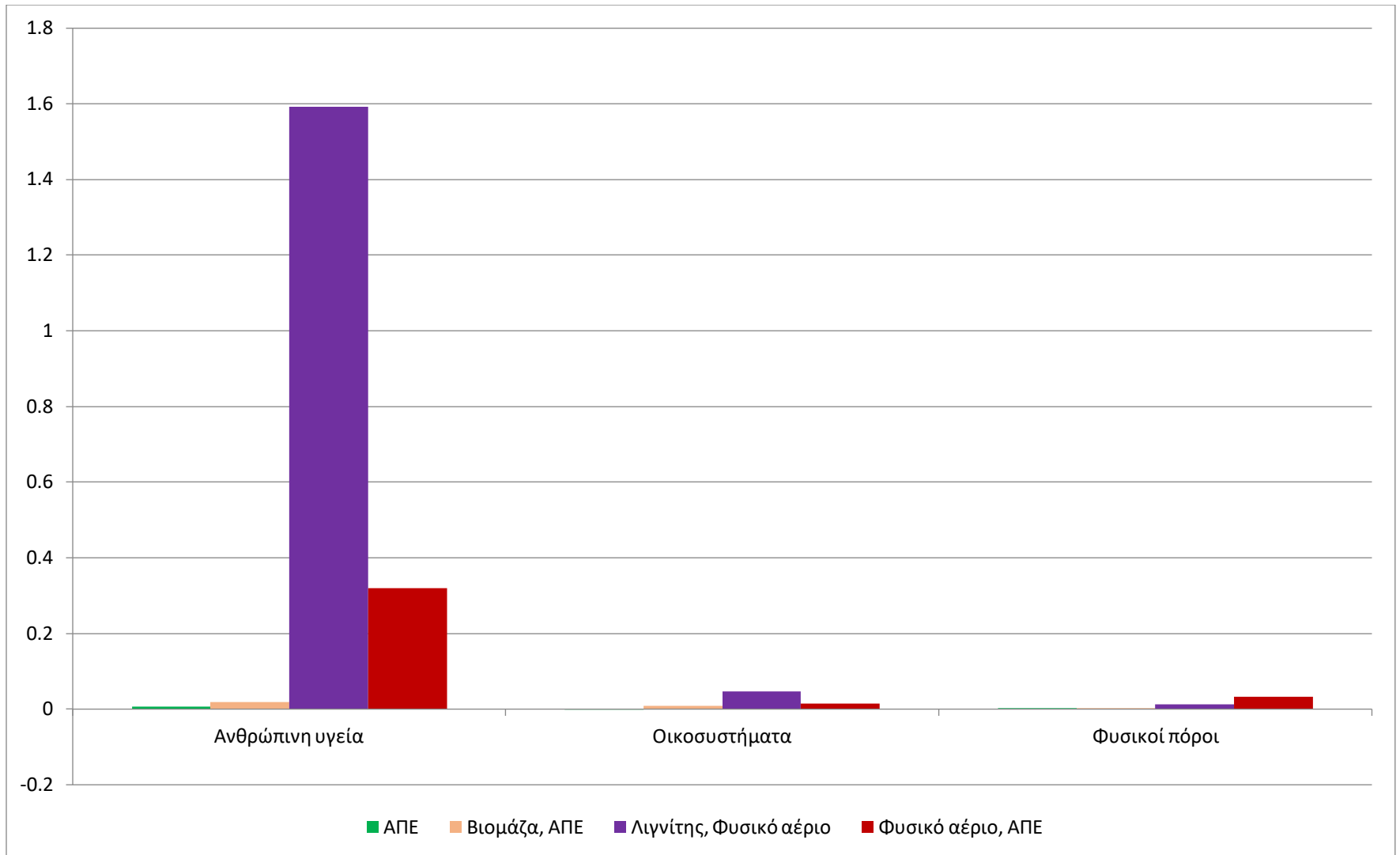


Διάγραμμα 5-31 Συγκριτικά αποτελέσματα για τον αντίκτυπο στις τελικές κατηγορίες επιπτώσεων με κανονικοποίηση, για τα στάδια της μονάδας ανά τόνο παραγόμενης μεθανόλης με κάλυψη των ηλεκτρικών αναγκών από ΑΠΕ για την μονάδα του έτους 2030.

Πίνακας 5-28 Τιμές δεικτών τελικών κατηγοριών επιπτώσεων με κανονικοποίηση, για τα διάφορα στάδια της μονάδας ανά τόνο παραγόμενης μεθανόλης με κάλυψη των ηλεκτρικών αναγκών από βιομάζα και ΑΠΕ για την μονάδα του έτους 2030.

| Κατηγορία επιπτώσεων | Μονάδα | Ηλ/της βιομάζα | Ηλ/της ΑΠΕ | Σύνθεση μεθανόλης | Μονάδα δέσμευσης CO ₂ | Χρήση CO ₂ |
|----------------------|------------|----------------|------------|-------------------|----------------------------------|-----------------------|
| Ανθρώπινη υγεία | DALY | 58.6 | 15.7 | 1.8 | 0.9 | -58.7 |
| Οικοσυστήματα | species.yr | 11.2 | 0.5 | 0.1 | 0.0 | -2.9 |
| Φυσικοί πόροι | USD2013 | 0.1 | 0.2 | 0.0 | 0.1 | 0.0 |

Στην συνέχεια γίνεται σύγκριση σε επίπεδο endpoint με κανονικοποίηση για την μονάδα του έτους 2030, για την κάλυψη των αναγκών από διαφορετικές πηγές ενέργειας. Όπως είναι αναμενόμενο η κάλυψη των αναγκών από λιγνίτη και φυσικό αέριο, προκαλεί την περισσότερη βλάβη στην ανθρώπινη υγεία και στα οικοσυστήματα. Ωστόσο όσον αφορά την εξάντληση των φυσικών πόρων ο συνδυασμός φυσικού αερίου και ΑΠΕ φαίνεται να είναι ο χειρότερος από τους 4 που εξετάστηκαν, ωστόσο το μεγαλύτερο μερίδιο ευθύνης προφανώς το έχει η χρήση φυσικού αερίου. Παρακάτω παρουσιάζεται το Διάγραμμα 5-32 του αντικτύπου σε επίπεδο endpoint με κανονικοποίηση καθώς και ο Πίνακας 5-29 Πίνακας 5-29 Τιμές δεικτών τελικών κατηγοριών επιπτώσεων με κανονικοποίηση για τον κύκλο ζωής της μονάδας ανά τόνο παραγόμενης μεθανόλης με κάλυψη των ηλεκτρικών αναγκών από διαφορετικές πηγές για την μονάδα του έτους 2030. με τις τιμές των τριών δεικτών τελικών κατηγοριών επιπτώσεων, ανά τόνο μεθανόλης για τον κύκλο ζωής της μονάδας του έτους 2030, για το σενάριο κάλυψης των αναγκών από διαφορετικές πηγές ενέργειας.

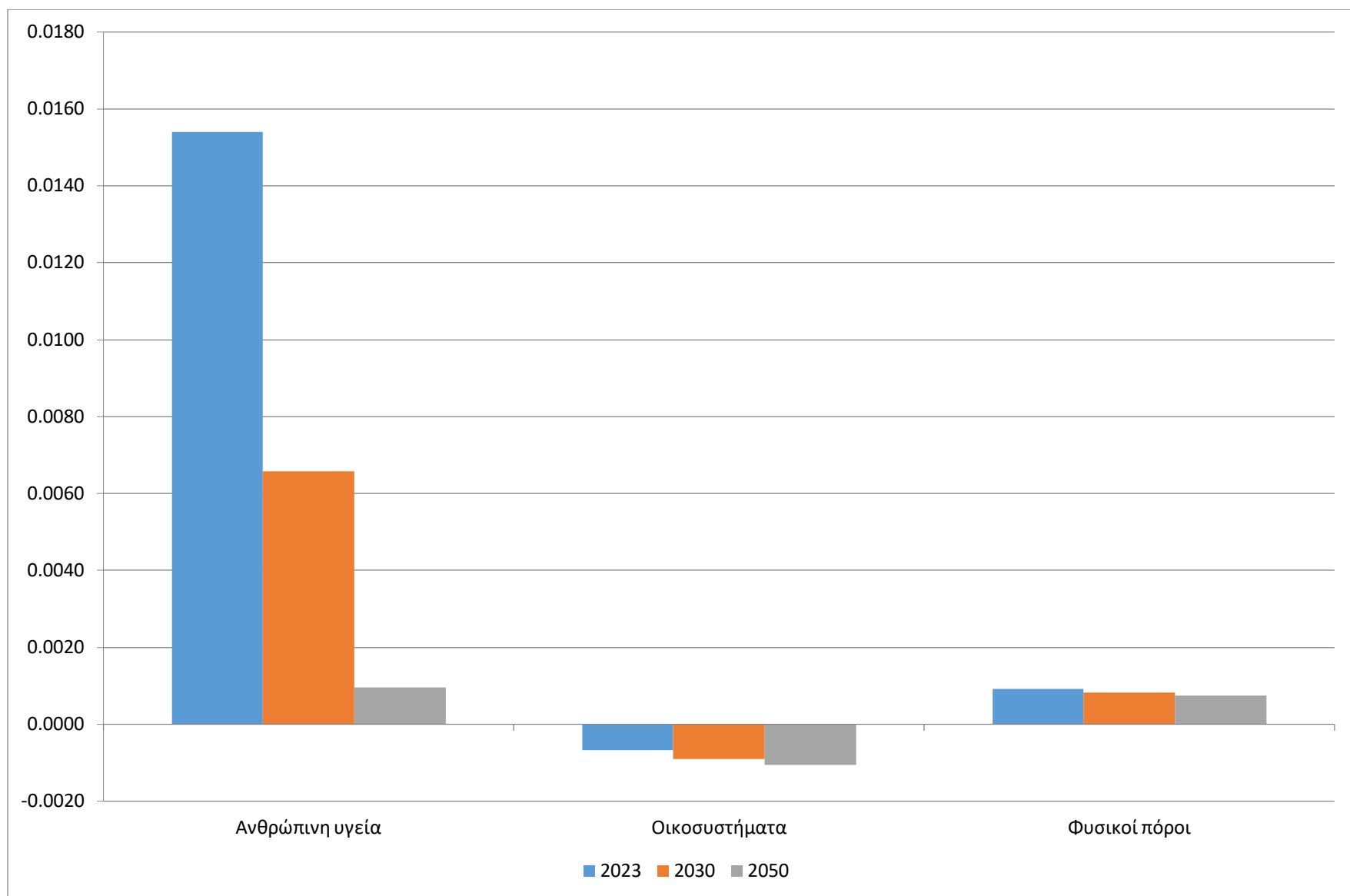


Διάγραμμα 5-32 Συγκριτικά αποτελέσματα για τον αντίκτυπο στις τελικές κατηγορίες επιπτώσεων με κανονικοποίηση, για τον κύκλο ζωής της μονάδας ανά τόνο παραγόμενης μεθανόλης με κάλυψη των ηλεκτρικών αναγκών από διαφορετικές πηγές ενέργειας για την μονάδα του έτους 2030.

Πίνακας 5-29 Τιμές δεικτών τελικών κατηγοριών επιπτώσεων με κανονικοποίηση για τον κύκλο ζωής της μονάδας ανά τόνο παραγόμενης μεθανόλης με κάλυψη των ηλεκτρικών αναγκών από διαφορετικές πηγές για την μονάδα του έτους 2030.

| Κατηγορία επιπτώσεων | Μονάδα | ΑΠΕ | Βιομάζα, ΑΠΕ | Λιγνίτης, Φυσικό αέριο | Φυσικό αέριο, ΑΠΕ |
|----------------------|------------|------|--------------|------------------------|-------------------|
| Ανθρώπινη υγεία | DALY | 6.6 | 18.2 | 1591.9 | 318.9 |
| Οικοσυστήματα | species.yr | -0.9 | 9.0 | 46.3 | 13.9 |
| Φυσικοί πόροι | USD2013 | 0.8 | 0.4 | 11.9 | 32.2 |

Τέλος γίνεται σύγκριση μεταξύ των μονάδων των ετών 2023, 2030 και 2050. Όπως είναι αναμενόμενο ο αντίκτυπος είναι υψηλότερος για την μονάδα του έτους 2023 και χαμηλότερος για αυτή του έτους 2050, όπως παρατηρήθηκε και στην ανάλυση “midpoint”. Παρατηρείται πως η σημαντικότερη βλάβη προκαλείται και πάλι στην ανθρώπινη υγεία, ενώ η βλάβη στα οικοσυστήματα είναι αρνητική λόγω της δέσμευσης CO₂, σε συνδυασμό με τον χαμηλό αντίκτυπο της χρήσης ενέργειας από ΑΠΕ. Παρακάτω παρουσιάζεται το Διάγραμμα 5-33 του αντικτύπου σε επίπεδο “endpoint” με κανονικοποίηση, ανά τόνο μεθανόλης για τον κύκλο ζωής των μονάδων των ετών 2023, 2030 και 2050 για το σενάριο κάλυψης των αναγκών από ΑΠΕ.

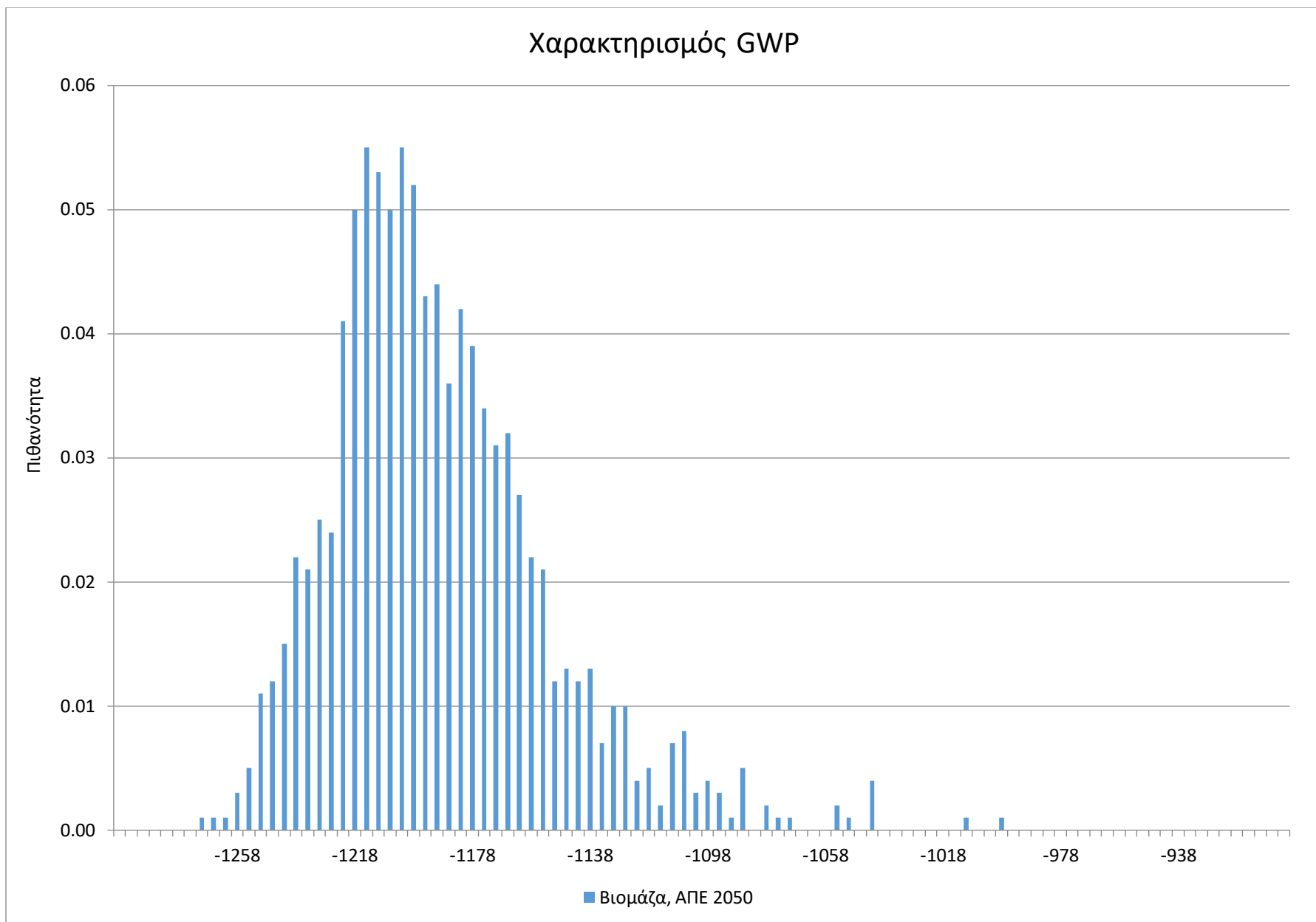


Διάγραμμα 5-33 Συγκριτικά αποτελέσματα για τον αντίκτυπο στις τελικές κατηγορίες επιπτώσεων με κανονικοποίηση, για τον κύκλο ζωής των μονάδων των ετών 2023, 2030 και 2050 ανά τόνο παραγόμενης μεθανόλης με κάλυψη των ηλεκτρικών αναγκών από ΑΠΕ.

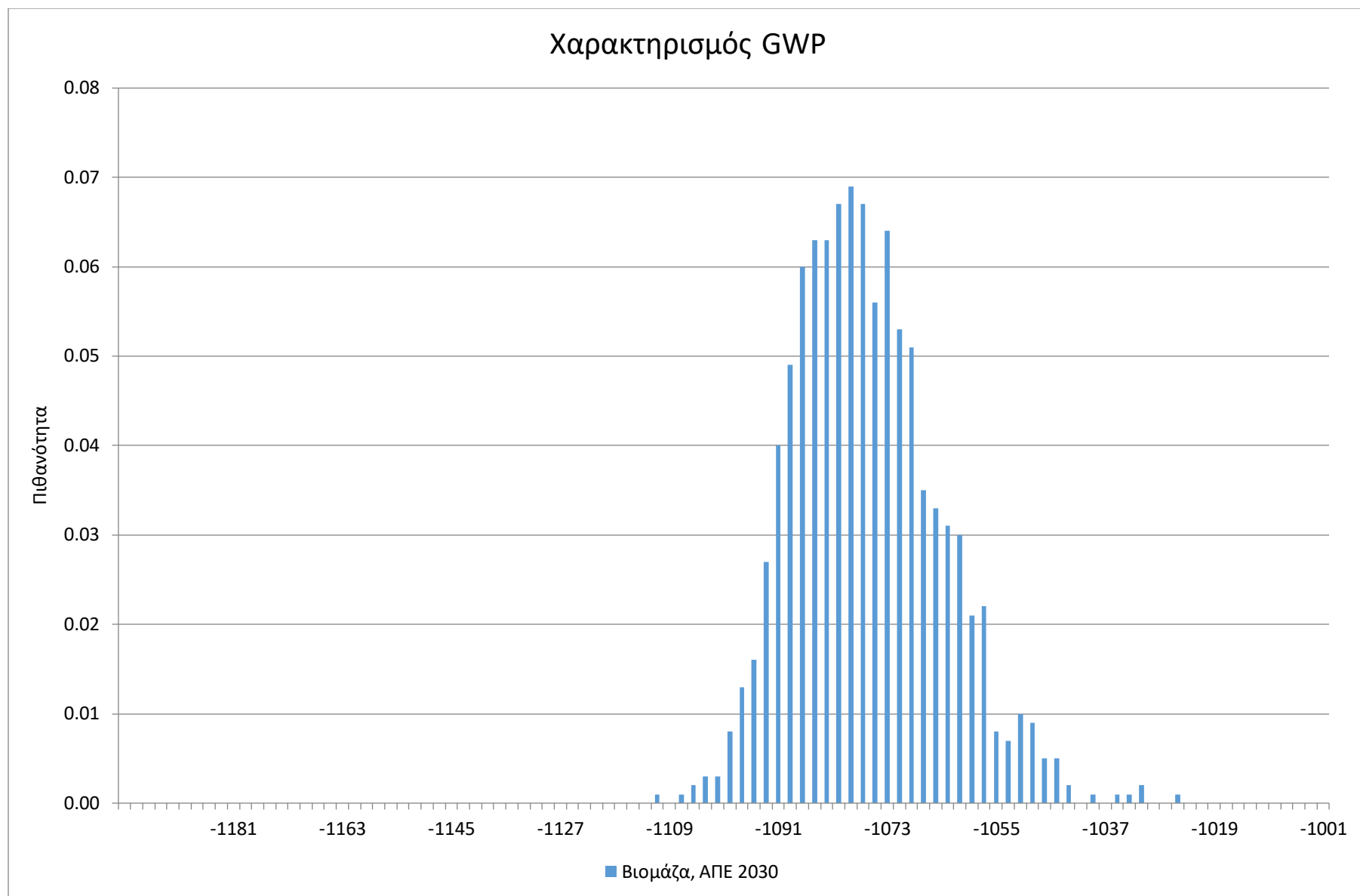
6. Ανάλυση Αβεβαιότητας και Ευαισθησίας

6.1 Ανάλυση Αβεβαιότητας

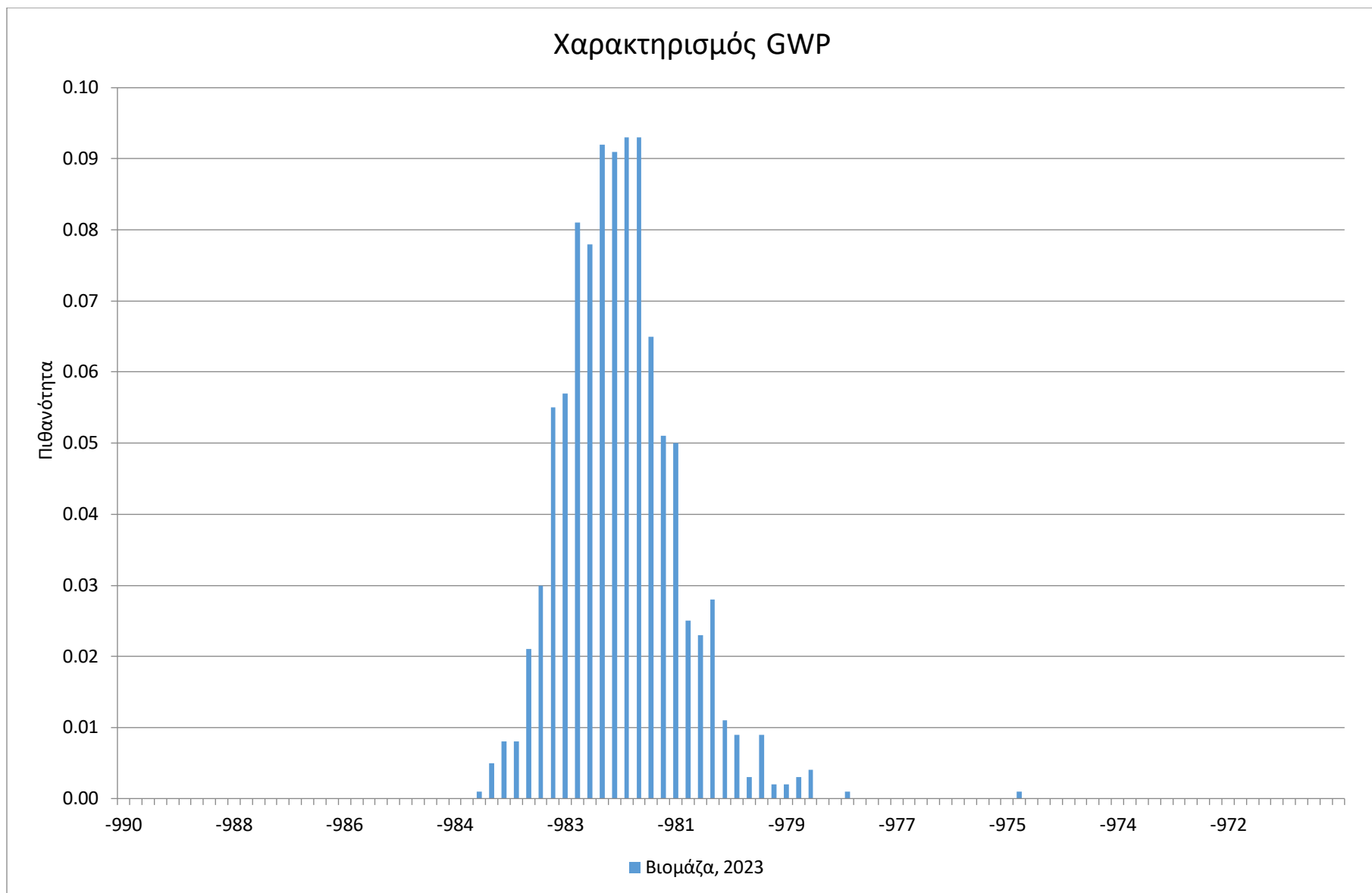
Πραγματοποιείται ανάλυση αβεβαιότητας, σύμφωνα με την προσομοίωση «Monte Carlo» του λογισμικού “SimaPro”. Τα αποτελέσματα για το σενάριο αναφοράς και για τις μονάδες των ετών 2050, 2030 και 2023 παρουσιάζονται παρακάτω. Επιλέχθηκε να εξεταστεί το σενάριο κάλυψης των αναγκών από ηλεκτροπαραγωγό σταθμό βιομάζας και ΑΠΕ για τις μονάδες των ετών 2030 και 2050 και το σενάριο κάλυψης από ηλεκτροπαραγωγό σταθμό βιομάζας αποκλειστικά για την μονάδα του έτους 2023. Σύμφωνα με τα γραφήματα και για επίπεδο εμπιστοσύνης 95 %, οι ισοδύναμες εκπομπές CO₂ για το σύστημα αναφοράς κυμαίνονται από -1248 CO₂-eq/ton έως -1098 CO₂-eq/ton, ενώ για την εγκατάσταση του έτους 2030 και 2023 από -1096 CO₂-eq/ton έως -1049 CO₂-eq/ton και από -983 CO₂-eq/ton έως -980 CO₂-eq/ton αντίστοιχα.



Διάγραμμα 6-1 Ανάλυση αβεβαιότητας δυναμικού θέρμανσης του πλανήτη, για χρήση ενέργειας από ηλεκτροπαραγωγό σταθμό βιομάζας και ΑΠΕ για το σενάριο αναφοράς.



Διάγραμμα 6-2 Ανάλυση αβεβαιότητας δυναμικού θέρμανσης του πλανήτη, για χρήση ενέργειας από ηλεκτροπαραγωγό σταθμό βιομάζας και ΑΠΕ για το σενάριο του έτους 2030.



Πίνακας 6-1 Ανάλυση αβεβαιότητας δυναμικού θέρμανσης του πλανήτη, για χρήση ενέργειας από ηλεκτροπαραγωγό σταθμό βιομάζας και ΑΠΕ για το σενάριο αναφοράς.

| Κατηγορία επιπτώσεων | Μονάδα | Μέσος | Διάμεσος | Τυπική απόκλιση | Συντελεστής μεταβλητότητας | 2.5 % | 97.5% | SEM |
|--------------------------------|-------------------------|-------|----------|-----------------|----------------------------|-------|-------|-----|
| Δυναμικό θέρμανσης του πλανήτη | kg CO ₂ - eq | -1189 | -1196 | 37.3 | -3.1 | -1248 | -1098 | 1.2 |

Πίνακας 6-2 Ανάλυση αβεβαιότητας δυναμικού θέρμανσης του πλανήτη, για χρήση ενέργειας από ηλεκτροπαραγωγό σταθμό βιομάζας και ΑΠΕ για το σενάριο του έτους 2030.

| Κατηγορία επιπτώσεων | Μονάδα | Μέσος | Διάμεσος | Τυπική απόκλιση | Συντελεστής μεταβλητότητας | 2.5 % | 97.5% | SEM |
|--------------------------------|-------------------------|-------|----------|-----------------|----------------------------|-------|-------|------|
| Δυναμικό θέρμανσης του πλανήτη | kg CO ₂ - eq | -1076 | -1077 | 12.09 | -1.12 | -1096 | -1049 | 0.38 |

Πίνακας 6-3 Ανάλυση αβεβαιότητας δυναμικού θέρμανσης του πλανήτη, για χρήση ενέργειας από ηλεκτροπαραγωγό σταθμό βιομάζας για το σενάριο του έτους 2023.

| Κατηγορία επιπτώσεων | Μονάδα | Μέσος | Διάμεσος | Τυπική απόκλιση | Συντελεστής μεταβλητότητας | 2.5 % | 97.5% | SEM |
|--------------------------------|-------------------------|-------|----------|-----------------|----------------------------|-------|-------|------|
| Δυναμικό θέρμανσης του πλανήτη | kg CO ₂ - eq | -982 | -982 | 0.92 | -0.09 | -983 | -980 | 0.03 |

6.2 Ανάλυση Ευαισθησίας

Με στόχο την αξιολόγηση της επίδρασης της αλλαγής διαφόρων παραμέτρων στο περιβαλλοντικό αποτύπωμα της μονάδας διεξάγεται μία ανάλυση ευαισθησίας. Καθώς το σενάριο της μεγαλύτερης κλίμακας είναι πραγματοποιήσιμο στο μακρινό μέλλον επιλέγεται να γίνει ανάλυση ευαισθησίας για το σενάριο του έτους 2030 (με κάλυψη των ηλεκτρικών αναγκών από ηλεκτροπαραγωγό σταθμό βιομάζας και ΑΠΕ), για το οποίο υπάρχει αρκετή αβεβαιότητα ως προς κάποιες μεταβλητές, ωστόσο το εύρος της διακύμανσης τους, δύναται να εκτιμηθεί ευκολότερα. Επίσης για το έτος 2023 η υλοποίηση του έργου είναι σχετικά απίθανη και οι διακυμάνσεις των μεταβλητών μικρές. Οι μεταβλητές που επιλέγονται είναι οι ηλεκτρικές ανάγκες του ηλεκτρολύτη, το ποσοστό της βελτίωσης του περιβαλλοντικού

αποτυπώματος για την παραγωγή 1 MWh ηλεκτρικής ενέργειας από τις διάφορες πηγές ενέργειας με την πάροδο του χρόνου, το ποσοστό του χρόνου που λειτουργεί η μονάδα (CF), ο χρόνος ζωής του ηλεκτρολύτη και οι μάζες των υλικών κατασκευής και συντήρησης της μονάδας.

Η παραγωγή ενέργειας από τις διάφορες πηγές θα έχει χαμηλότερο περιβαλλοντικό αντίκτυπο με την πάροδο των χρόνων. Αυτό θα οφείλεται σε καλύτερη απόδοση των μονάδων και στην χρήση πιο βιώσιμων υλικών. Λόγω αυτού γίνονται κάποιες παραδοχές ώστε να συνυπολογιστεί η μείωση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος ανά παραγόμενη MWh. Αρχικά εργοστάσια παραγωγής ενέργειας που λειτουργούν με λιγνίτη, φυσικό αέριο και βιομάζα καθώς και υδροηλεκτρικοί σταθμοί θεωρείται ότι θα έχουν μικρή βελτίωση στον βαθμό απόδοσης καθώς είναι ώριμες τεχνολογίες. Ωστόσο Φ/Β πάνελ και Α/Γ επιδέχονται σημαντική βελτίωση στον βαθμό απόδοσης. Για το έτος 2030 θεωρείται ότι η απόδοση των Φ/Β από 23 % (έτος 2023) θα είναι 28 % [95]. Επίσης οι Α/Γ θεωρείται ότι θα έχουν βελτίωση της απόδοσης και μεγαλύτερο μέγεθος, μειώνοντας τον αντίκτυπό τους ωστόσο δεν υπάρχουν επαρκή ακριβή δεδομένα. Τα υλικά επίσης μπορεί να διαφέρουν ωστόσο μία τέτοια ανάλυση είναι εκτός των ορίων της μελέτης αυτής και επομένως δεν εξετάζεται. Επιλέγεται και η εξέταση της περίπτωσης αύξησης του αντικτύπου των πηγών ενέργειας, αν και αυτό φαίνεται να είναι σχετικά απίθανο.

Το ποσοστό μεταβολής των επιλεγμένων παραμέτρων, έγινε κάθε φορά συμμετρικά ως προς την αρχική τιμή, εκτός από την παράμετρο της βελτίωσης του αντικτύπου ανά παραγόμενη MWh για την οποία θεωρήθηκε ότι η μεταβολή είναι σχεδόν βέβαιο πως θα είναι μόνο θετική λόγω βελτίωσης της απόδοσης αλλά και χρήσης φιλικότερων προς το περιβάλλον υλικών μελλοντικά και για αυτό το λόγο το ποσοστό βελτίωσης είναι υψηλότερο από αυτό της μείωσης του αντικτύπου. Ο Πίνακας 6-4 περιέχει τα ποσοστά μεταβολής των παραμέτρων και ο Πίνακας 6-5 και η Εικόνα 6-1 τα αποτελέσματα της ανάλυσης ευαισθησίας. Ποσοστά μεγαλύτερα του μηδενός δηλώνουν βελτίωση του αντικτύπου (μείωση του συνολικού αποτυπώματος), ενώ ποσοστά μικρότερα του μηδενός το αντίθετο. Επίσης τα αποτελέσματα αφορούν το δυναμικό θέρμανσης του πλανήτη.

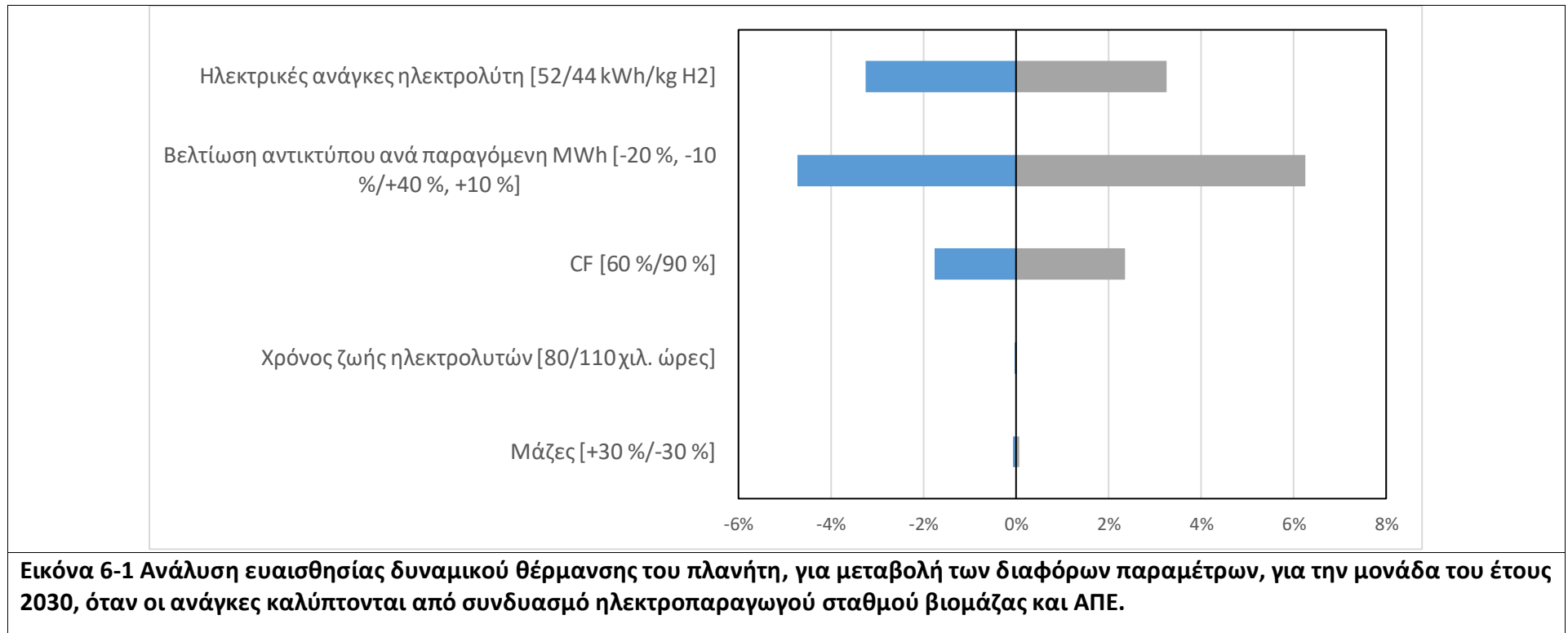
Παρατηρείται πως την σημαντικότερη επίδραση στον αντίκτυπο την έχει η μεταβολή του αντικτύπου της παραγόμενης ενέργειας. Αυτό είναι λογικό καθώς το υψηλότερο μερίδιο στο GWP ύστερα από την χρήση CO₂ το έχει η ηλεκτρική κατανάλωση των ηλεκτρολυτών, η οποία φέρει το αποτύπωμα της διαδικασίας παραγωγής της ηλεκτρικής αυτής ενέργειας. Στην συνέχεια σημαντική επίδραση έχουν οι ηλεκτρικές ανάγκες του ηλεκτρολύτη για τον ίδιο λόγο. Έπειτα όταν ο συντελεστής CF γίνεται μεγαλύτερος του 0.7 η επιπλέον ενέργεια που απαιτείται θεωρείται ότι καλύπτεται από ΑΠΕ και με τις ΑΠΕ να έχουν χαμηλότερο GWP από τον ηλεκτροπαραγωγό σταθμό βιομάζας μειώνεται αισθητά ο αντίκτυπος, ενώ το αντίθετο συμβαίνει με την μείωση του CF. Επίσης αυξάνεται και η παραγωγή μεθανόλης, μειώνοντας τον αντίκτυπο του σταδίου της κατασκευής και συντήρησης. Όσον αφορά τον χρόνο ζωής των ηλεκτρολυτών η επίδραση στον συνολικό αντίκτυπο φαίνεται να είναι ελάχιστη ενώ λίγο υψηλότερη είναι για την συνολική μάζα των υλικών κατασκευής και συντήρησης, το οποίο είναι αναμενόμενο καθώς αντίκτυπος του σταδίου αυτού είναι ελάχιστος σε σχέση με όλο το κύκλο ζωής της μονάδας.

Πίνακας 6-4 Μεταβολή παραμέτρων στην ανάλυση ευαισθησίας

| Παράμετρος | Μονάδα | Μεταβολή |
|--|-----------------------|---|
| Ηλεκτρικές ανάγκες ηλεκτρολύτη | kWh/kg H ₂ | 48±4 |
| Βελτίωση αντικτύπου ανά παραγόμενη MWh | % | -20 έως +40 % (Φ/Β, Α/Γ) -10 έως +10 %) (υπόλοιπα) |
| CF | % | 60-90 |
| Χρόνος ζωής ηλεκτρολυτών | χιλ. h | 80±30 |
| Μάζες υλικών κατασκευής και συντήρησης | % | ± 30 |

Πίνακας 6-5 Ποσοστά βελτίωσης του αντικτύπου στο δυναμικό θέρμανσης του πλανήτη για μεταβολή των διαφόρων παραμέτρων, για την μονάδα του έτους 2030, όταν οι ανάγκες καλύπτονται από συνδυασμό ηλεκτροπαραγωγού σταθμού βιομάζας και ΑΠΕ.

| | | |
|--|-------|-------|
| Ηλεκτρικές ανάγκες ηλεκτρολύτη [52/44 kWh/kg H ₂] | -3.3% | 3.3% |
| Βελτίωση αντικτύπου ανά παραγόμενη MWh [-20 %, -10 %/+40 %, +10 %] | -4.7% | 6.2% |
| CF [60 %/90 %] | -1.8% | 2.4% |
| Χρόνος ζωής ηλεκτρολυτών [80/110 χιλ. ώρες] | 0.02% | 0.01% |
| Μάζες [+30 %/-30 %] | -0.1% | 0.1% |



7. Συμπεράσματα

7.1 Συζήτηση Αποτελεσμάτων

Σε όλα τα σενάρια μεγέθους παρατηρήθηκε πως την σημαντικότερη επίδραση στις επιπτώσεις την είχε η φάση λειτουργίας της μονάδας. Όσον αφορά την λειτουργία της εγκατάστασης, για το δυναμικό θέρμανσης του πλανήτη, η δέσμευση και κατ' επέκταση αποφυγή εκπομπών CO₂ (-1516 kg CO₂ -eq/ t MeOH) είχε καθοριστικό ρόλο, ωστόσο ακόμα σημαντικότερο είχε η επιλογή της πηγής ενέργειας για την κάλυψη των αναγκών. Συγκεκριμένα παρατηρήθηκε πως το δυναμικό θέρμανσης του πλανήτη αυξανόταν περισσότερο όταν η κάλυψη των αναγκών πραγματοποιούταν με ηλεκτροπαραγωγό σταθμό λιγνίτη (1301 kg CO₂ -eq/MWh) και δευτερευόντως με ηλεκτροπαραγωγό σταθμό φυσικού αερίου (956 kg CO₂ -eq/MWh). Τον μικρότερο αντίκτυπο εμφάνιζε η κάλυψη των αναγκών με το μείγμα ΑΠΕ (50 % αιολική ενέργεια, 25 % ηλιακή, 25 % υδροηλεκτρική) (31 kg CO₂ -eq/MWh), ύστερα με ηλεκτροπαραγωγό σταθμό βιομάζας (46 kg CO₂ -eq/ MWh), ενώ με ενέργεια δικτύου (800 kg CO₂ -eq/MWh) ο αντίκτυπος βρισκόταν στην τρίτη θέση.

Το δυναμικό θέρμανσης του πλανήτη για τον κύκλο ζωής των μονάδων, όταν η κάλυψη των αναγκών έγινε με το πράσινο ενεργειακό μείγμα (50 % αιολική, 25 % ηλιακή και 25 % υδροηλεκτρική ενέργεια) υπολογίστηκε αρνητικό και για τα τρία σενάρια, 2023 (-1148 kg CO₂ -eq/t MeOH), 2030 (-1188 kg CO₂ -eq/t MeOH) και 2050 (-1216 kg CO₂ -eq/t MeOH). Η μείωση του δυναμικού θέρμανσης του πλανήτη με την πάροδο των ετών, αιτιολογείται κυρίως με την μείωση των ηλεκτρικών αναγκών της ηλεκτρόλυσης, αλλά και με την μείωση των απαιτούμενων υλικών ανά τόνο παραγόμενης μεθανόλης για την συντήρηση και κατασκευή της εγκατάστασης, λόγω της κλιμάκωσης του μεγέθους. Για το σενάριο βάσης, για την μονάδα του έτους 2050, με κάλυψη των αναγκών από ηλεκτροπαραγωγό σταθμό βιομάζας και ΑΠΕ το δυναμικό θέρμανσης του πλανήτη υπολογίστηκε ελάχιστα υψηλότερο (-1190 kg CO₂ -eq/t MeOH). Όσον αφορά το στάδιο της κατασκευής και συντήρησης, για τις μονάδες των ετών 2023 (10.34 kg CO₂ -eq/t MeOH), 2030 (2.7 kg CO₂ -eq/t MeOH) και 2050 (2.27 kg CO₂ -eq/t MeOH) η συμμετοχή του στο δυναμικό θέρμανσης του πλανήτη, υπολογίζεται χαμηλότερη του 1 % του αντικτύπου όλου του κύκλου ζωής. Από τα εξεταζόμενα σενάρια το υψηλότερο δυναμικό θέρμανσης του πλανήτη (13218 kg CO₂ -eq/t MeOH) υπολογίστηκε για το σενάριο της κάλυψης των αναγκών από λιγνιτικό σταθμό για την μονάδα του έτους 2030. Όσον αφορά την χρήση ΑΠΕ, στις τελικές κατηγορίες επιπτώσεων ο υψηλότερος αντίκτυπος εμφανίστηκε στην ανθρώπινη υγεία, ενώ η επίδραση στους φυσικούς πόρους υπολογίστηκε αρκετά χαμηλή, τέλος παρατηρήθηκε θετικός αντίκτυπος για τα οικοσυστήματα, λόγω δέσμευσης του CO₂. Όπως ήταν αναμενόμενο το αποτύπωμα ήταν και πάλι υψηλότερο για την μονάδα του έτους 2023 και χαμηλότερο για αυτή του έτους 2050.

Επίσης πολύ σημαντική επίδραση στο δυναμικό θέρμανσης του πλανήτη, υπολογίστηκε ότι έχει ο τρόπος με τον οποίο λαμβάνεται υπόψη η δέσμευση βιογενούς προελεύσεως CO₂. Μόνο σε ένα σενάριο για την μονάδα του έτους 2030, θεωρήθηκε πως η δέσμευση βιογενούς CO₂ φέρει μόνο το περιβαλλοντικό αποτύπωμα της διεργασίας της δέσμευσης και κανένα όφελος από την μείωση των εκπομπών, καθώς αυτοί οι ρύποι ούτως ή άλλως δεν φέρουν κανένα βάρος όντας βιογενούς προελεύσεως. Σε αυτό το σενάριο το δυναμικό θέρμανσης

του πλανήτη αυξήθηκε κατά 1516 kg CO₂ -eq/t MeOH. Στα υπόλοιπα σενάρια συνυπολογίστηκε το όφελος της μη εκπομπής καθώς, ανεξαρτήτως προελεύσεως με την δέσμευση μειώνεται ουσιαστικά το συνολικό CO₂ από την ατμόσφαιρα.

Σημαντική διαφορά στις επιπτώσεις παρουσιάστηκε στο σενάριο της μονάδας του έτους 2030, στο οποίο θεωρήθηκε πως το παραγόμενο από την ηλεκτρόλυση οξυγόνο δεν απελευθερώνεται στο περιβάλλον αλλά χρησιμοποιείται. Συγκεκριμένα το δυναμικό θέρμανσης του πλανήτη μειώθηκε κατά 919 kg CO₂ -eq/t MeOH. Αυτό συνέβη λόγω της αποφυγής παραγωγής του οξυγόνου με την κυρίαρχη μέθοδο, αυτή του κρυογονικού διαχωρισμού του αέρα. Επίσης να σημειωθεί πως δεν μοντελοποιήθηκαν τα στάδια συμπίεσης, ψύξης και αποθήκευσης του παραγόμενου οξυγόνου, τα οποία ενώ θεωρήθηκε ότι έχουν μικρό αντίκτυπο, σίγουρα αν είχαν προστεθεί στην διαδικασία θα επηρέαζαν σε ένα βαθμό το δυναμικό θέρμανσης του πλανήτη.

Οι τιμές για το δυναμικό θέρμανσης του πλανήτη συνάδουν με αυτές της βιβλιογραφίας όσον αφορά την παραγωγή μεθανόλης με χρήση ΑΠΕ και δέσμευση CO₂ (-1216 έως -1148 kg CO₂ -eq/ton MeOH), καθώς όπως αναφέρει το Ινστιτούτο Μεθανόλης, είναι δυνατόν να λάβουν αρνητικές τιμές της τάξεως των -1210 kg CO₂ -eq/ton MeOH [75]. Σχετικά με την χρήση ορυκτών καυσίμων για την παραγωγή της μεθανόλης, η κύρια μέθοδος είναι αυτή της παραγωγής συνθετικού αερίου (το οποίο περιέχει CO και H₂), μέσω αεριοποίησης, το οποίο στην συνέχεια αντιδρά σε ειδικό αντιδραστήρα, παράγοντας μεθανόλη. Ο αντίκτυπος αυτής της μεθόδου στο δυναμικό θέρμανσης του πλανήτη σύμφωνα με το Ινστιτούτο Μεθανόλης είναι περίπου στα 6600 kg CO₂ -eq/ton MeOH με χρήση άνθρακα και από 462 έως 2024 kg CO₂ -eq/ton MeOH για φυσικό αέριο [75],[78],[76]. Μελέτες που εξετάζουν το σενάριο κάλυψης των αναγκών ηλεκτρολύτη από φυσικό αέριο, λιγνίτη ή βιομάζα με σκοπό την παραγωγή υδρογόνου και στην συνέχεια σύνθεση μεθανόλης δεν βρέθηκαν. Ωστόσο τα αποτελέσματα της παρούσας μελέτης βρέθηκαν υψηλά όσον αφορά τον λιγνίτη (13218 kg CO₂ -eq/ton MeOH) για την μονάδα του έτους 2023, καθώς και για το φυσικό αέριο για την μονάδα του έτους 2050 (7473 kg CO₂ -eq/ton MeOH). Αυτό πιθανά οφείλεται στην χαμηλότερη συνολική απόδοση της διαδικασίας σε σχέση με αυτή της αεριοποίησης καθώς ενέργεια δαπανάται για την μετατροπή της θερμικής σε ηλεκτρική ενέργεια. Όσον αφορά την παραγωγή μεθανόλης με κάλυψη των αναγκών από βιομάζα και πάλι οι μελέτες εξετάζουν την περίπτωση της δημιουργίας συνθετικού αερίου, το δυναμικό θέρμανσης του πλανήτη από μία τέτοια μελέτη είχε υπολογιστεί στα -914 kg CO₂ -eq/ton MeOH [78], το οποίο είναι πολύ κοντά στα αποτελέσματα της παρούσας μελέτης (-982 kg CO₂ -eq/ton MeOH). Τέλος από την ανάλυση ευαισθησίας προέκυψε πως από τις εξεταζόμενες παραμέτρους την σημαντικότερη επίδραση στον τελικό αντίκτυπο της μονάδας την είχε η μεταβολή του περιβαλλοντικού αποτυπώματος της παραγωγής ενέργειας με την πάροδο του χρόνου καθώς και η μεταβολή των ηλεκτρικών αναγκών του ηλεκτρολύτη.

7.2 Προτάσεις για Μελλοντική Εργασία

Τα δεδομένα για την μοντελοποίηση του συστήματος καθορίζουν την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων. Όσον αφορά την μοντελοποίηση του σταδίου της κατασκευής και της συντήρησης των μονάδων, τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν θεωρούνται σχετικά αξιόπιστα, ωστόσο ιδανικά θα αυτά τα δεδομένα θα έπρεπε να ληφθούν από καταλόγους

υλικών πραγματικών συσκευών. Παρ' όλα αυτά το περιβαλλοντικό αποτύπωμα της φάσης της κατασκευής και συντήρησης υπολογίστηκε αμελητέο σε σύγκριση με την φάση της λειτουργίας και επομένως, αλλαγές στα υλικά κατασκευής προβλέπεται να έχουν ελάχιστη επίδραση στον αντίκτυπο του κύκλου ζωής των μονάδων. Σε μελλοντική εργασία επίσης προτείνεται, εφόσον υπάρχουν επαρκή δεδομένα να μοντελοποιηθεί η μετατροπή του λιγνιτικού σταθμού σε σταθμό βιομάζας.

Οι θερμικές ανάγκες του συστήματος όντας χαμηλές, θεωρήθηκε ότι καλύπτονται εσωτερικά από το σύστημα. Πλεονάζουσα θερμική ενέργεια παράγει ο ηλεκτρολύτης καθώς υψηλά ποσά ηλεκτρικής ενέργειας μετατρέπονται σε θερμική, η οποία πρέπει να απαχθεί και δύναται να αξιοποιηθεί, όπως και η θερμική ενέργεια που προκύπτει από την εξώθερμη αντίδραση της παραγωγής μεθανόλης. Σε μελλοντική εργασία η απαιτούμενη και παραγόμενη θερμική ενέργεια, προτείνεται να μοντελοποιηθεί επακριβώς, συμπεριλαμβάνοντας και όλο το σύστημα ψύξης και θέρμανσης. Επίσης προτείνεται η μοντελοποίηση του συστήματος αποθήκευσης του παραγόμενου οξυγόνου για το σενάριο στο οποίο αυτό αξιοποιείται.

Τέλος για τις μελλοντικές μονάδες όσον αφορά τον περιβαλλοντικό αντίκτυπο της παραγωγής ενέργειας από τις διάφορες πηγές ενέργειας, ο οποίος θα έχει μειωθεί, στην παρούσα εργασία πραγματοποιήθηκε ανάλυση ευαισθησίας καθώς ακριβέστερη ποσοτικοποίηση του αντικτύπου ήταν εκτός των ορίων της εργασίας. Σε μελλοντική εργασία προτείνεται να υπολογιστεί με περισσότερη ακρίβεια ο μελλοντικός αντίκτυπος των πηγών και να ενσωματωθεί στην μοντελοποίηση του συστήματος.

8. Βιβλιογραφία

- [1] D. B. Doris Klingelhöfer, M. B. Markus Braun, and David A. Groneberg, “Climate change: Does international research fulfill global demands and necessities?,” 2020, [Online]. Available: <https://en.europe.springeropen.com/articles/10.1186/s12302-020-00419-1>
- [2] Oliver Bothe, “What even is ‘Climate’?,” 2018, [Online]. Available: <https://gc.copernicus.org/preprints/gc-2018-11/gc-2018-11.pdf>
- [3] A. Konstantinidis, “A multi-organization high-level compilation of the most recent science related to climate change, impacts and responses,” p. 40, 2022.
- [4] D. S. Kaufman and N. P. McKay, “Technical Note: Past and future warming – direct comparison on multi-century timescales,” *Clim. Past*, vol. 18, no. 4, pp. 911–917, Apr. 2022, doi: 10.5194/cp-18-911-2022.
- [5] Martin Beniston, *Climate change and its impacts: growing stress factors for human societies*. 2010. [Online]. Available: <https://international-review.icrc.org/sites/default/files/irrc-879-beniston.pdf>
- [6] T. F. Bill Brath, C. J.-B. Yves Guérard, K. L. Caterina Lindman, and B.-J. W. Shriram Mulgund, “Research Paper: Climate Change and Resource Sustainability - An Overview for Actuaries,” p. 57, 2015.
- [7] I. F. Eric Wolff, J. F. B. M. Brian Hoskins, B. S. Tim Palmer, K. S. John Shepherd, K. T. Susan Solomon, and D. W. John Walsh, “Climate Change: Evidence & Causes 2020,” p. 36, 2020.
- [8] Rebecca Linsdey, “Climate Change: Atmospheric Carbon Dioxide.” 2023. [Online]. Available: <https://origin-east-01-drupal-climate.woc.noaa.gov/news-features/understanding-climate/climate-change-atmospheric-carbon-dioxide>
- [9] “Global Time Series.” National Centers for Environmental Information, 2023. [Online]. Available: <https://www.ncei.noaa.gov/access/monitoring/climate-at-a-glance/global/time-series>
- [10] W. M. C. Thomas C. Peterson and John Fleck, “THE MYTH OF THE 1970S GLOBAL COOLING SCIENTIFIC CONSENSUS,” 2008, [Online]. Available: https://journals.ametsoc.org/view/journals/bams/89/9/2008bams2370_1.xml?tab_body=pdf
- [11] C. B. Pierre-Louis Choquet and Benjamin Franta, “Early warnings and emerging accountability: Total’s responses to global warming, 1971–2021,” 2021, [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959378021001655>
- [12] “Fact sheet: The Kyoto Protocol,” 2011. [Online]. Available: https://unfccc.int/files/press/backgrounders/application/pdf/fact_sheet_the_kyoto_protocol.pdf

- [13] C. Ervine, “Directive 2004/39/Ec of the European Parliament and of the Council of 21 April 2004,” in *Core Statutes on Company Law*, London: Macmillan Education UK, 2015, pp. 757–759. doi: 10.1007/978-1-137-54507-7_21.
- [14] Y. Qu, Y. Liu, S. Jevrejeva, and L. P. Jackson, “Future sea level rise along the coast of China and adjacent region under 1.5 °C and 2.0 °C global warming,” *Advances in Climate Change Research*, vol. 11, no. 3, pp. 227–238, Sep. 2020, doi: 10.1016/j.accre.2020.09.001.
- [15] “A 2030 framework for climate and energy policies.” 2013. [Online]. Available: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52013DC0169>
- [16] EUROPEAN COMMISSION, “Delivering the European Green Deal.” 2021. [Online]. Available: https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal_en
- [17] U.S. Energy Information Administration, “EIA projects that renewables will provide nearly half of world electricity by 2050.” 2019. [Online]. Available: <https://www.eia.gov/todayinenergy/detail.php?id=41533>
- [18] E. Hossain, H. Faruque, Md. Sunny, N. Mohammad, and N. Nawar, “A Comprehensive Review on Energy Storage Systems: Types, Comparison, Current Scenario, Applications, Barriers, and Potential Solutions, Policies, and Future Prospects,” *Energies*, vol. 13, no. 14, p. 3651, Jul. 2020, doi: 10.3390/en13143651.
- [19] J. T. Matt Pevarnik, D. M. Scott Flake, ; Rick Miller Michael Manwaring, K. H. Preston Pierce, and Nancy Craig, “2021 PUMPED STORAGE REPORT,” 2021. [Online]. Available: <https://www.hydro.org/wp-content/uploads/2021/09/2021-Pumped-Storage-Report-NHA.pdf>
- [20] S. Rehman, L. M. Al-Hadhrami, and Md. M. Alam, “Pumped hydro energy storage system: A technological review,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 44, pp. 586–598, Apr. 2015, doi: 10.1016/j.rser.2014.12.040.
- [21] EUROPEAN COMMISSION, “Energy storage – the role of electricity.” 2017. [Online]. Available: https://energy.ec.europa.eu/system/files/2017-02/swd2017_61_document_travail_service_part1_v6_0.pdf
- [22] D. P. Anirudh Bhanu Teja Nelabhotla and Carlos Dinamarca, *Emerging Technologies and Biological Systems for Biogas Upgrading*. 2021. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128228081000088>
- [23] M. Götz *et al.*, “Renewable Power-to-Gas: A technological and economic review,” *Renewable Energy*, vol. 85, pp. 1371–1390, Jan. 2016, doi: 10.1016/j.renene.2015.07.066.
- [24] Jakob Kibsgaard, “Power-to-X - from green energy to green fuel”.
- [25] D. Gielen, F. Boshell, D. Saygin, M. D. Bazilian, N. Wagner, and R. Gorini, “The role of renewable energy in the global energy transformation,” *Energy Strategy Reviews*, vol. 24, pp. 38–50, Apr. 2019, doi: 10.1016/j.esr.2019.01.006.

- [26] E. Kötter, L. Schneider, F. Sehnke, K. Ohnmeiss, and R. Schröer, “The future electric power system: Impact of Power-to-Gas by interacting with other renewable energy components,” *Journal of Energy Storage*, vol. 5, pp. 113–119, Feb. 2016, doi: 10.1016/j.est.2015.11.012.
- [27] P. Parthasarathy and K. S. Narayanan, “Hydrogen production from steam gasification of biomass: Influence of process parameters on hydrogen yield – A review,” *Renewable Energy*, vol. 66, pp. 570–579, Jun. 2014, doi: 10.1016/j.renene.2013.12.025.
- [28] M. A. Rosen and S. Koohi-Fayegh, “The prospects for hydrogen as an energy carrier: an overview of hydrogen energy and hydrogen energy systems,” *Energ. Ecol. Environ.*, vol. 1, no. 1, pp. 10–29, Feb. 2016, doi: 10.1007/s40974-016-0005-z.
- [29] M. A. Qyyum *et al.*, “Availability, versatility, and viability of feedstocks for hydrogen production: Product space perspective,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 145, p. 110843, Jul. 2021, doi: 10.1016/j.rser.2021.110843.
- [30] E. F. H. Trygve Riis and Ø. U. Preben J. S. Vie, “Global Hydrogen Review 2022,” p. 284, 2022.
- [31] G. Thomas, “Overview of Storage Development DOE Hydrogen Program,” *Natural Gas.*, p. 14, 2000.
- [32] M. G. Rasul, M. A. Hazrat, M. A. Sattar, M. I. Jahirul, and M. J. Shearer, “The future of hydrogen: Challenges on production, storage and applications,” *Energy Conversion and Management*, vol. 272, p. 116326, Nov. 2022, doi: 10.1016/j.enconman.2022.116326.
- [33] K. T. Møller, T. R. Jensen, E. Akiba, and H. Li, “Hydrogen - A sustainable energy carrier,” *Progress in Natural Science: Materials International*, vol. 27, no. 1, pp. 34–40, Feb. 2017, doi: 10.1016/j.pnsc.2016.12.014.
- [34] F. Dawood, M. Anda, and G. M. Shafiullah, “Hydrogen production for energy: An overview,” *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 45, no. 7, pp. 3847–3869, Feb. 2020, doi: 10.1016/j.ijhydene.2019.12.059.
- [35] Dolf Gielen, Raul Miranda, and Emanuele Taibi, “Hydrogen: A renewable energy perspective,” p. 52, 2019.
- [36] Florida Solar Energy Center, “Hydrogen Basic - Production”, [Online]. Available: <http://www.fsec.ucf.edu/en/consumer/hydrogen/basics/production.htm>
- [37] S. Stagakis, “Background Paper on Possible Regulation of Hydrogen Networks,” p. 18, 2021.
- [38] C. Acar and I. Dincer, “Comparative assessment of hydrogen production methods from renewable and non-renewable sources,” *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 39, no. 1, pp. 1–12, Jan. 2014, doi: 10.1016/j.ijhydene.2013.10.060.
- [39] A. saleh bahri A.G. Olabi, A. B. Aasim Ahmed Abdelghafar, A. H. A. Enas Taha Sayed, and M. A. A. Hegazy Rezk, *Large-scale hydrogen production and storage technologies: current*

status and future directions. 2021. [Online]. Available: https://wlv.openrepository.com/bitstream/handle/2436/623788/Olabi_et_al_Large_vsacle_hydrogen_production_2020.pdf;jsessionid=2A80877267C13E49478A63683A491A45?sequence=3

[40] T. I. Korányi, M. Németh, A. Beck, and A. Horváth, “Recent Advances in Methane Pyrolysis: Turquoise Hydrogen with Solid Carbon Production,” *Energies*, vol. 15, no. 17, p. 6342, Aug. 2022, doi: 10.3390/en15176342.

[41] D. J. Jovan and G. Dolanc, “Can Green Hydrogen Production Be Economically Viable under Current Market Conditions,” *Energies*, vol. 13, no. 24, p. 6599, Dec. 2020, doi: 10.3390/en13246599.

[42] A. P. Pavlos Nikolaidis, *A comparative overview of hydrogen production processes.* 2016.

[43] P. M. LeeAnn Baronett, “The Truth About Hydrogen.,” 2019. <https://www.emc2.gr/el/news/truth-about-hydrogen>

[44] Office of ENERGY EFFICIENCY & RENEWABLE ENERGY, “Hydrogen Production: Electrolysis Hydrogen and Fuel Cell Technologies Office.” [Online]. Available: <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-production-electrolysis>

[45] E. Moiola, R. Mutschler, and A. Züttel, “Renewable energy storage via CO₂ and H₂ conversion to methane and methanol: Assessment for small scale applications,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 107, pp. 497–506, Jun. 2019, doi: 10.1016/j.rser.2019.03.022.

[46] I. Vincent and D. Bessarabov, “Low cost hydrogen production by anion exchange membrane electrolysis: A review,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 81, pp. 1690–1704, Jan. 2018, doi: 10.1016/j.rser.2017.05.258.

[47] I. Vincent, A. Kruger, and D. Bessarabov, “Development of efficient membrane electrode assembly for low cost hydrogen production by anion exchange membrane electrolysis,” *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 42, no. 16, pp. 10752–10761, Apr. 2017, doi: 10.1016/j.ijhydene.2017.03.069.

[48] G. Min, S. Choi, and J. Hong, “A review of solid oxide steam-electrolysis cell systems: Thermodynamics and thermal integration,” *Applied Energy*, vol. 328, p. 120145, Dec. 2022, doi: 10.1016/j.apenergy.2022.120145.

[49] M. Chatenet *et al.*, “Water electrolysis: from textbook knowledge to the latest scientific strategies and industrial developments,” *Chem. Soc. Rev.*, vol. 51, no. 11, pp. 4583–4762, 2022, doi: 10.1039/D0CS01079K.

[50] J. Andersson and S. Grönkvist, “Large-scale storage of hydrogen,” *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 44, no. 23, pp. 11901–11919, May 2019, doi: 10.1016/j.ijhydene.2019.03.063.

- [51] H. T. Hwang and A. Varma, “Hydrogen storage for fuel cell vehicles,” *Current Opinion in Chemical Engineering*, vol. 5, pp. 42–48, Aug. 2014, doi: 10.1016/j.coche.2014.04.004.
- [52] Priyadarshi R. Shukla, “Climate Change 2022 Mitigation of Climate Change.” 2022. [Online]. Available: https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/downloads/report/IPCC_AR6_WGIII_SPM.pdf
- [53] M. Kanniche, R. Gros-Bonnivard, P. Jaud, J. Valle-Marcos, J.-M. Amann, and C. Bouallou, “Pre-combustion, post-combustion and oxy-combustion in thermal power plant for CO₂ capture,” *Applied Thermal Engineering*, vol. 30, no. 1, pp. 53–62, Jan. 2010, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2009.05.005.
- [54] GLOBAL CCS INSTITUTE, “CAPTURING CO₂.” [Online]. Available: https://www.globalccsinstitute.com/wp-content/uploads/2018/12/Global-CCS-Institute-Fact-Sheet_Capturing-CO2.pdf
- [55] O. D. Metz, B., H. C. de Coninck, and M. Loos, “CARBON DIOXIDE CAPTURE AND STORAGE.” Cambridge University Press, New York, 2005.
- [56] M. R. Vaseghi, A. Amiri, and A. Pesaran, “A review of energy efficiency and CO₂ emissions in the US cement industry,” in *2012 IEEE-IAS/PCA 54th Cement Industry Technical Conference*, San Antonio, TX, USA: IEEE, May 2012, pp. 1–9. doi: 10.1109/CITCON.2012.6215686.
- [57] George Andrew Olah, “Methanol Economy.” 2011. [Online]. Available: <http://www.starch.dk/methanol/energy/img/tm01-02e.pdf>
- [58] A. Kowalewicz, “Methanol as a Fuel for Spark Ignition Engines: A Review and Analysis,” *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, vol. 207, no. 1, pp. 43–52, Jan. 1993, doi: 10.1243/PIME_PROC_1993_207_158_02.
- [59] IRENA AND METHANOL INSTITUTE, “Innovation Outlook : Renewable Methanol, International Renewable Energy Agency.” 2021. [Online]. Available: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2021/Jan/IRENA_Innovation_Renewable_Methanol_2021.pdf
- [60] CARBON RECYCLING INTERNATIONAL, “GEORGE OLAH RENEWABLE METHANOL PLANT: FIRST PRODUCTION OF FUEL FROM CO₂ AT INDUSTRIAL SCALE.” [Online]. Available: <https://www.carbonrecycling.is/project-goplant>
- [61] METHANOL INSTITUTE, “RENEWABLE METHANOL.” 2023. [Online]. Available: <https://www.methanol.org/renewable/>
- [62] RENEWABLE CARBON NEWS, “World’s largest CO₂-to-methanol plant starts production.” 2022. [Online]. Available: <https://renewable-carbon.eu/news/worlds-largest-co2-to-methanol-plant-starts-production/>
- [63] S. S. Tabibian and M. Sharifzadeh, “Statistical and analytical investigation of methanol applications, production technologies, value-chain and economy with a special focus on

renewable methanol,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 179, p. 113281, Jun. 2023, doi: 10.1016/j.rser.2023.113281.

[64] T. Sartori, R. Drogemuller, S. Omrani, and F. Lamari, “A schematic framework for Life Cycle Assessment (LCA) and Green Building Rating System (GBRS),” *Journal of Building Engineering*, vol. 38, p. 102180, Jun. 2021, doi: 10.1016/j.job.2021.102180.

[65] A. I. Kun-Mo Lee, “Life Cycle Assessment Best Practices of ISO 14040 Series,” 2004, [Online]. Available: https://www.apec.org/docs/default-source/Publications/2004/2/Life-Cycle-Assessment-Best-Practices-of-International-Organization-for-Standardization-ISO-14040-Ser/04_cti_scsc_lca_rev.pdf

[66] European Commission. Joint Research Centre. Institute for Environment and Sustainability., *International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook :general guide for life cycle assessment : detailed guidance*. LU: Publications Office, 2010. Accessed: Dec. 17, 2022. [Online]. Available: <https://data.europa.eu/doi/10.2788/38479>

[67] European Platform on LCA | EPLCA, “Life Cycle Assessment (LCA).” [Online]. Available: <https://eplca.jrc.ec.europa.eu/lifecycleassessment.html>

[68] Database & Support team at PRé Sustainability, “SimaPro database manual Methods library.” Jun. 2022. [Online]. Available: <https://simapro.com/wp-content/uploads/2022/07/DatabaseManualMethods.pdf>

[69] European Commission. Joint Research Centre., *Guide for interpreting life cycle assessment result*. LU: Publications Office, 2016. Accessed: Dec. 21, 2022. [Online]. Available: <https://data.europa.eu/doi/10.2788/171315>

[70] W. B. Laurent A, L. X. Bare J, P. M. e Souza DM, S. H. Sala S, and V. F. Thonemann N, *Methodological review and detailed guidance for the life cycle interpretation phase*. 2020.

[71] B. P. Weidema, “Consistency check for life cycle assessments,” *Int J Life Cycle Assess*, vol. 24, no. 5, pp. 926–934, May 2019, doi: 10.1007/s11367-018-1542-9.

[72] G. Wernet, C. Bauer, B. Steubing, J. Reinhard, E. Moreno-Ruiz, and B. Weidema, “The ecoinvent database version 3 (part I): overview and methodology,” *Int J Life Cycle Assess*, vol. 21, no. 9, pp. 1218–1230, Sep. 2016, doi: 10.1007/s11367-016-1087-8.

[73] Clean Hydrogen Partnership, “Clean Hydrogen JOINT UNDERTAKING.” 2022. [Online]. Available: https://www.clean-hydrogen.europa.eu/system/files/2022-02/Clean%20Hydrogen%20JU%20AWP%202022_0.pdf

[74] Baringa, “Commercial Power Purchase Agreements.” 2022. [Online]. Available: <https://advisory.eib.org/publications/attachments/commercial-power-purchase-agreements.pdf>

[75] METHANOL INSTITUTE, “CARBON FOOTPRINT OF METHANOL.” 2022. [Online]. Available: https://www.methanol.org/wp-content/uploads/2022/01/CARBON-FOOTPRINT-OF-METHANOL-PAPER_1-31-22.pdf

- [76] G. Z. Michael Wang and A. E. Pingping Sun, “Technoeconomic and Life Cycle Analysis of Synthetic Methanol Production from Hydrogen and Industrial Byproduct CO₂,” 2021, [Online]. Available: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.est.0c08237>
- [77] W. H. Stefan Bringezu and Nils Thonemann, “Life Cycle Assessment of Carbon Dioxide–Based Production of Methane and Methanol and Derived Polymers,” 2017, [Online]. Available: <https://doi.org/10.1111/jiec.12583>
- [78] R. K. Pekka Oinas and Markku Hurme, “Methanol-Managing greenhouse gas emissions in the production chain by optimizing the resource base,” 2018, [Online]. Available: <https://www.aimspress.com/article/doi/10.3934/energy.2018.6.1074>
- [79] C. Li, H. Bai, Y. Lu, J. Bian, Y. Dong, and H. Xu, “Life-cycle assessment for coal-based methanol production in China,” *Journal of Cleaner Production*, vol. 188, pp. 1004–1017, Jul. 2018, doi: 10.1016/j.jclepro.2018.04.051.
- [80] M. S. P. Ronald E. West and Klaus D. Timmerhaus, *ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΕΩΝ ΓΙΑ ΜΗΧΑΝΙΚΟΥΣ*. 2002.
- [81] E. SIEMENS ENERGY, “PEM electrolyser technology Flexible, efficient and scalable,” 2021, [Online]. Available: https://www.energyforum.in/fileadmin/user_upload/india/media_elements/Presentations/20210714_h2_large/Siemens_Energy.pdf
- [82] K. Bareiß, C. De La Rua, M. Möckl, and T. Hamacher, “Life cycle assessment of hydrogen from proton exchange membrane water electrolysis in future energy systems,” *Applied Energy*, vol. 237, pp. 862–872, Mar. 2019, doi: 10.1016/j.apenergy.2019.01.001.
- [83] IRENA, “Green hydrogen cost reduction: Scaling up electrolyzers to meet the 1.5C climate goal,” 2020, [Online]. Available: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2020/Dec/IRENA_Green_hydrogen_cost_2020.pdf
- [84] D. Allam, S. Cheknoun, and S. Hocine, “Operating Conditions and Composition Effect on the Hydrogenation of Carbon Dioxide Performed over CuO/ZnO/Al₂O₃ Catalysts,” *Bull. Chem. React. Eng. Catal.*, vol. 14, no. 3, p. 604, Dec. 2019, doi: 10.9767/bcrec.14.3.3451.604-613.
- [85] E. Van Der Roest, R. Bol, T. Fens, and A. Van Wijk, “Utilisation of waste heat from PEM electrolyzers – Unlocking local optimisation,” *International Journal of Hydrogen Energy*, p. S0360319923015410, Apr. 2023, doi: 10.1016/j.ijhydene.2023.03.374.
- [86] PAEE, “Upgrading the energy efficiency of the national building stock.” 2014. [Online]. Available: https://energy.ec.europa.eu/system/files/2018-02/it_building_renov_2017_annex_1_neeap_en_0.pdf
- [87] E. Bellos and C. Tzivanidis, “Solar concentrating systems and applications in Greece – A critical review,” *Journal of Cleaner Production*, vol. 272, p. 122855, Nov. 2020, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.122855.

- [88] IRENA, “Green Hydrogen Cost Reduction: Scaling up Electrolysers to Meet the 1.5°C Climate Goal.” 2020. [Online]. Available: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2020/Dec/IRENA_Green_hydrogen_cost_2020.pdf
- [89] P. Farràs, P. Strasser, and A. J. Cowan, “Water electrolysis: Direct from the sea or not to be?,” *Joule*, vol. 5, no. 8, pp. 1921–1923, Aug. 2021, doi: 10.1016/j.joule.2021.07.014.
- [90] J. J. Schulthess, “RECIPROCATING COMPRESSOR LUBRICATION – LUBRICANT DILUTION WITH NATURAL GAS SPECIES AND THE IMPACT ON LUBRICATION RATES AT VARIOUS OPERATING CONDITIONS,” 2021, [Online]. Available: https://mountainscholar.org/bitstream/handle/10217/232503/Schulthess_colostate_0053N_16496.pdf?sequence=1
- [91] M. Rosental, T. Fröhlich, and A. Liebich, “Life Cycle Assessment of Carbon Capture and Utilization for the Production of Large Volume Organic Chemicals,” *Front. Clim.*, vol. 2, p. 586199, Oct. 2020, doi: 10.3389/fclim.2020.586199.
- [92] P. Luis, “Use of monoethanolamine (MEA) for CO₂ capture in a global scenario: Consequences and alternatives,” *Desalination*, vol. 380, pp. 93–99, Feb. 2016, doi: 10.1016/j.desal.2015.08.004.
- [93] D. Ener, “Guidelines for Life Cycle Assessment of Carbon Capture and Utilisation,” 2020.
- [94] M. Variny, D. Jediná, M. Rimár, J. Kizek, and M. Kšiňanová, “Cutting Oxygen Production-Related Greenhouse Gas Emissions by Improved Compression Heat Management in a Cryogenic Air Separation Unit,” *IJERPH*, vol. 18, no. 19, p. 10370, Oct. 2021, doi: 10.3390/ijerph181910370.
- [95] G. Kiss, H. Jansen, V. L. Castaldo, and L. Orsi, “The 2050 City,” *Procedia Engineering*, vol. 118, pp. 326–355, 2015, doi: 10.1016/j.proeng.2015.08.434.

9. Κατάλογος πινάκων

| | |
|--|----|
| Πίνακας 2-1 Κατηγορίες επιπτώσεων επιπέδου “midpoint” [68]..... | 37 |
| Πίνακας 3-1 Βασικά χαρακτηριστικά των μονάδων των ετών 2023, 2030 και 2050. | 45 |
| Πίνακας 3-2 Σενάρια ανάλογα με την πηγή ενέργειας..... | 47 |
| Πίνακας 4-1 Σύγκριση αποτελεσμάτων άλλων μελετών σε συστήματα παραγωγής μεθανόλης..... | 50 |
| Πίνακας 4-3 Κατάλογος πρώτων υλών για ηλεκτρολύτη 1000MW. | 53 |
| Πίνακας 4-4 Κατάλογος πρώτων υλών για ηλεκτρολύτη 500MW..... | 53 |
| Πίνακας 4-5 Κατάλογος πρώτων υλών για ηλεκτρολύτη 20MW..... | 54 |
| Πίνακας 4-6 Χρόνος ζωής ηλεκτρολυτών ανά έτος παραγωγής..... | 55 |
| Πίνακας 4-7 Κατάλογος πρώτων υλών για συντήρηση ηλεκτρολύτη 1000MW ανά φορά συντήρησης..... | 55 |
| Πίνακας 4-8 Κατάλογος πρώτων υλών για συντήρηση ηλεκτρολύτη 500MW ανά φορά συντήρησης..... | 55 |
| Πίνακας 4-9 Κατάλογος πρώτων υλών για συντήρηση ηλεκτρολύτη 1000MW ανά φορά συντήρησης..... | 56 |
| Πίνακας 4-10 Κατάλογος απογραφής υλικών εγκατάστασης..... | 57 |
| Πίνακας 4-11 Κατάλογος ηλεκτρικών καταναλώσεων συμπιεστών. | 61 |
| Πίνακας 4-12 Υποπροϊόντα και εκπομπές από την σύνθεση της μεθανόλης. | 62 |
| Πίνακας 5-1 Τιμή GWP για την παραγωγή 1 MWh από τις υπό εξέταση πηγές ενέργειας. .. | 66 |
| Πίνακας 5-2 Τιμή GWP για το περιβαλλοντικό φορτίο που φέρει το βιογενές CO ₂ , η εκπομπή CO ₂ και η δέσμευση CO ₂ | 68 |
| Πίνακας 5-3 Τιμή GWP για την λειτουργία του ηλεκτρολύτη της μονάδας του έτους 2030 με κάλυψη των αναγκών από ΑΠΕ για απελευθέρωση και χρήση του οξυγόνου ανά τόνο παραγόμενης μεθανόλης..... | 70 |
| Πίνακας 5-4 Τιμή GWP για την κατασκευή και συντήρηση των δύο ηλεκτρολυτών ισχύος 1 GW ανά τόνο παραγόμενης μεθανόλης για την εγκατάσταση του έτους 2050. | 78 |
| Πίνακας 5-5 Τιμή GWP για την κατασκευή και συντήρηση του σταδίου της συμπίεσης ανά τόνο παραγόμενης μεθανόλης για την εγκατάσταση του έτους 2050. | 78 |
| Πίνακας 5-6 Τιμή GWP για την κατασκευή και συντήρηση του σταδίου της αντίδρασης ανά τόνο παραγόμενης μεθανόλης για την εγκατάσταση του έτους 2050. | 78 |
| Πίνακας 5-7 Τιμή GWP για την κατασκευή και συντήρηση του σταδίου του καθαρισμού ανά τόνο παραγόμενης μεθανόλης για την εγκατάσταση του έτους 2050. | 78 |
| Πίνακας 5-8 Τιμή GWP για την κατασκευή και συντήρηση των υπολοίπων μερών της εγκατάστασης ανά τόνο παραγόμενης μεθανόλης για την εγκατάσταση του έτους 2050.... | 79 |
| Πίνακας 5-9 Τιμή GWP για την κατασκευή και συντήρηση των διαφόρων μερών της εγκατάστασης ανά τόνο παραγόμενης μεθανόλης για την εγκατάσταση του έτους 2050.... | 79 |
| Πίνακας 5-10 Τιμή GWP για τον αντίκτυπο του σταδίου της ηλεκτρόλυσης ανά τόνο παραγόμενης μεθανόλης με κάλυψη των ηλεκτρικών αναγκών από ΑΠΕ για την εγκατάσταση του έτους 2050. | 85 |
| Πίνακας 5-11 Τιμή GWP για τον αντίκτυπο του σταδίου της συμπίεσης ανά τόνο παραγόμενης μεθανόλης με κάλυψη των ηλεκτρικών αναγκών από ΑΠΕ για την εγκατάσταση του έτους 2050. | 85 |

| | |
|---|-----|
| Πίνακας 5-12 Τιμή GWP για τον αντίκτυπο του σταδίου της αντίδρασης ανά τόνο παραγόμενης μεθανόλης με κάλυψη των ηλεκτρικών αναγκών από ΑΠΕ για την εγκατάσταση του έτους 2050. | 85 |
| Πίνακας 5-13 Τιμή GWP για τον αντίκτυπο του σταδίου του καθαρισμού ανά τόνο παραγόμενης μεθανόλης με κάλυψη των ηλεκτρικών αναγκών από ΑΠΕ για την εγκατάσταση του έτους 2050. | 85 |
| Πίνακας 5-14 Τιμή GWP για τον αντίκτυπο ολόκληρου του κύκλου ζωής της εγκατάστασης ανά τόνο παραγόμενης μεθανόλης με κάλυψη των αναγκών από ηλεκτροπαραγωγό σταθμό βιομάζας και ΑΠΕ για την εγκατάσταση του έτους 2050. | 88 |
| Πίνακας 5-15 Τιμή GWP για τον αντίκτυπο ολόκληρου του κύκλου ζωής της εγκατάστασης ανά τόνο παραγόμενης μεθανόλης με κάλυψη των ηλεκτρικών αναγκών από διαφορετικές πηγές ενέργειας για την εγκατάσταση του έτους 2050. | 90 |
| Πίνακας 5-16 Τιμή GWP για την κατασκευή και συντήρηση των διαφόρων μερών της εγκατάστασης ανά τόνο παραγόμενης μεθανόλης για την εγκατάσταση του έτους 2030.... | 92 |
| Πίνακας 5-17 Τιμή GWP για τον αντίκτυπο ολόκληρου του κύκλου ζωής της εγκατάστασης ανά τόνο παραγόμενης μεθανόλης με κάλυψη των αναγκών από ηλεκτροπαραγωγό σταθμό βιομάζας και ΑΠΕ για την εγκατάσταση του έτους 2030. | 94 |
| Πίνακας 5-18 Τιμή GWP για τον αντίκτυπο ολόκληρου του κύκλου ζωής της εγκατάστασης ανά τόνο παραγόμενης μεθανόλης με κάλυψη των ηλεκτρικών αναγκών από διαφορετικές πηγές ενέργειας για την εγκατάσταση του έτους 2030. | 96 |
| Πίνακας 5-19 Τιμή GWP μεταξύ υπόθεσης ουδέτερου και θετικού αντικτύπου της δέσμευσης βιογενούς CO ₂ , με κάλυψη των ηλεκτρικών αναγκών από διαφορετικές πηγές για την μονάδα του έτους 2030. | 98 |
| Πίνακας 5-20 Τιμή GWP για απελευθέρωση και χρησιμοποίηση του παραγόμενου οξυγόνου, με κάλυψη των ηλεκτρικών αναγκών από διάφορες για την μονάδα του έτους 2030. | 100 |
| Πίνακας 5-21 Τιμή GWP για την κατασκευή και συντήρηση του σταδίου της συμπίεσης ανά τόνο παραγόμενης μεθανόλης για την εγκατάσταση του έτους 2023. | 104 |
| Πίνακας 5-22 Τιμή GWP για την κατασκευή και συντήρηση των διαφόρων μερών της εγκατάστασης ανά τόνο παραγόμενης μεθανόλης για την εγκατάσταση του έτους 2023.. | 104 |
| Πίνακας 5-23 Τιμή GWP για τον αντίκτυπο του κύκλου ζωής των διαφόρων σταδίων της μονάδας, ανά τόνο παραγόμενης μεθανόλης με κάλυψη των ηλεκτρικών αναγκών από ηλεκτροπαραγωγό σταθμό βιομάζας για την εγκατάσταση του έτους 2023..... | 107 |
| Πίνακας 5-24 Τιμή GWP για τον αντίκτυπο ολόκληρου του κύκλου ζωής της εγκατάστασης ανά τόνο παραγόμενης μεθανόλης με κάλυψη των ηλεκτρικών αναγκών από διαφορετικές πηγές ενέργειας για την εγκατάσταση του έτους 2023. | 107 |
| Πίνακας 5-25 Τιμή GWP για την κατασκευή και συντήρηση των μονάδων ανά τόνο παραγόμενης μεθανόλης για τις εγκαταστάσεις των ετών 2023, 2030 και 2050. | 110 |
| Πίνακας 5-26 Τιμή GWP για τον αντίκτυπο του σταδίου της ηλεκτρόλυσης ανά τόνο παραγόμενης μεθανόλης με κάλυψη των ηλεκτρικών αναγκών από ΑΠΕ για τις εγκαταστάσεις των ετών 2023, 2030 και 2050. | 113 |
| Πίνακας 5-27 Τιμή GWP για τον αντίκτυπο των μονάδων ανά τόνο παραγόμενης μεθανόλης με κάλυψη των ηλεκτρικών αναγκών από ΑΠΕ για τα έτη 2023, 2030 και 2050. | 116 |
| Πίνακας 5-28 Τιμές δεικτών τελικών κατηγοριών επιπτώσεων με κανονικοποίηση, για τα διάφορα στάδια της μονάδας ανά τόνο παραγόμενης μεθανόλης με κάλυψη των ηλεκτρικών αναγκών από βιομάζα και ΑΠΕ για την μονάδα του έτους 2030. | 118 |

| | |
|--|-----|
| Πίνακας 5-29 Τιμές δεικτών τελικών κατηγοριών επιπτώσεων με κανονικοποίηση για τον κύκλο ζωής της μονάδας ανά τόνο παραγόμενης μεθανόλης με κάλυψη των ηλεκτρικών αναγκών από διαφορετικές πηγές για την μονάδα του έτους 2030. | 120 |
| Πίνακας 6-1 Ανάλυση αβεβαιότητας δυναμικού θέρμανσης του πλανήτη, για χρήση ενέργειας από ηλεκτροπαραγωγό σταθμό βιομάζας και ΑΠΕ για το σενάριο αναφοράς. .. | 126 |
| Πίνακας 6-2 Ανάλυση αβεβαιότητας δυναμικού θέρμανσης του πλανήτη, για χρήση ενέργειας από ηλεκτροπαραγωγό σταθμό βιομάζας και ΑΠΕ για το σενάριο του έτους 2030. | 126 |
| Πίνακας 6-3 Ανάλυση αβεβαιότητας δυναμικού θέρμανσης του πλανήτη, για χρήση ενέργειας από ηλεκτροπαραγωγό σταθμό βιομάζας για το σενάριο του έτους 2023..... | 126 |
| Πίνακας 6-4 Μεταβολή παραμέτρων στην ανάλυση ευαισθησίας..... | 128 |
| Πίνακας 6-5 Ποσοστά βελτίωσης του αντικτύπου στο δυναμικό θέρμανσης του πλανήτη για μεταβολή των διαφόρων παραμέτρων, για την μονάδα του έτους 2030, όταν οι ανάγκες καλύπτονται από συνδυασμό ηλεκτροπαραγωγού σταθμού βιομάζας και ΑΠΕ. | 128 |

10. Κατάλογος εικόνων

| | |
|---|-----|
| Εικόνα 1-1 Ατμοσφαιρικά επίπεδα διοξειδίου του άνθρακα (μπλε γραμμή) και ετήσιες εκπομπές (γκρι γραμμή) [8]. | 12 |
| Εικόνα 1-2 Ετήσια θερμοκρασία επιφάνειας συγκρινόμενη με το μέσο όρο του 20ού αιώνα από το 1880 έως το 2022 [9]. | 12 |
| Εικόνα 1-3 Παγκόσμια παραγωγή ηλεκτρισμού (1990-2050) [17]. | 14 |
| Εικόνα 1-4 Μεμονωμένα μέρη της τεχνολογίας Power-to-X [24]. | 16 |
| Εικόνα 1-5 Μέθοδοι παραγωγής υδρογόνου [36]. | 18 |
| Εικόνα 1-6 Ποσοστά συνεισφοράς στην παραγωγή υδρογόνου [43]. | 20 |
| Εικόνα 1-7 Σχηματική αναπαράσταση ηλεκτρολύτη με πολυμερικές μεμβράνες [44]. | 21 |
| Εικόνα 1-8 Σχηματική αναπαράσταση των πέντε βασικών τύπων ηλεκτρόλυσης [48]. | 23 |
| Εικόνα 1-9 Μέθοδοι αποθήκευσης υδρογόνου [51]. | 24 |
| Εικόνα 1-10 Σχηματική αναπαράσταση των μεθόδων δέσμευσης CO ₂ [56]. | 26 |
| Εικόνα 1-11 Παραγωγή μεθανόλης [59]. | 29 |
| Εικόνα 1-12 Ποσοστά χρήσης της μεθανόλης ως καυσίμου και ως χημικής ουσίας [63]. | 30 |
| Εικόνα 2-1 Συμπεριλαμβανόμενα τμήματα ανάλογα του εύρους της AKZ [64]. | 32 |
| Εικόνα 2-2 Σχηματική αναπαράσταση των φάσεων της AKZ. | 33 |
| Εικόνα 2-3 Επισκόπηση κατηγοριών επιπτώσεων που καλύπτονται στη μεθοδολογία ReCiPe2016 και της σχέσης τους με τις περιοχές προστασίας [68]. | 41 |
| Εικόνα 3-1 Διάταξη της μονάδας του έτους 2023. | 45 |
| Εικόνα 6-1 Ανάλυση ευαισθησίας δυναμικού θέρμανσης του πλανήτη, για μεταβολή των διαφόρων παραμέτρων, για την μονάδα του έτους 2030, όταν οι ανάγκες καλύπτονται από συνδυασμό ηλεκτροπαραγωγού σταθμού βιομάζας και ΑΠΕ. | 129 |

11. Κατάλογος διαγραμμάτων

| | |
|---|----|
| Διάγραμμα 5-1 Συγκριτικά αποτελέσματα για την παραγωγή 1 MWh από τις υπό εξέταση πηγές ενέργειας. | 65 |
| Διάγραμμα 5-2 Συγκριτικά αποτελέσματα για το περιβαλλοντικό φορτίο που φέρει το βιογενές CO ₂ , η εκπομπή CO ₂ και η δέσμευση CO ₂ | 67 |
| Διάγραμμα 5-3 Συγκριτικά αποτελέσματα για την λειτουργία του ηλεκτρολύτη της μονάδας του έτους 2030 με κάλυψη των αναγκών από ΑΠΕ για απελευθέρωση και χρήση του οξυγόνου ανά τόνο παραγόμενης μεθανόλης. | 69 |
| Διάγραμμα 5-4 Συγκριτικά αποτελέσματα για την κατασκευή και συντήρηση των δύο ηλεκτρολυτών ανά τόνο παραγόμενης μεθανόλης για την εγκατάσταση του έτους 2050. | 72 |
| Διάγραμμα 5-5 Συγκριτικά αποτελέσματα για την κατασκευή και συντήρηση του σταδίου της συμπίεσης ανά τόνο παραγόμενης μεθανόλης για την εγκατάσταση του έτους 2050. | 73 |
| Διάγραμμα 5-6 Συγκριτικά αποτελέσματα για την κατασκευή και συντήρηση του σταδίου της αντίδρασης ανά τόνο παραγόμενης μεθανόλης για την εγκατάσταση του έτους 2050. | 74 |
| Διάγραμμα 5-7 Συγκριτικά αποτελέσματα για την κατασκευή και συντήρηση του σταδίου του καθαρισμού ανά τόνο παραγόμενης μεθανόλης για την εγκατάσταση του έτους 2050. | 75 |
| Διάγραμμα 5-8 Συγκριτικά αποτελέσματα για την κατασκευή και συντήρηση των υπολοίπων μερών της εγκατάστασης ανά τόνο παραγόμενης μεθανόλης για την εγκατάσταση του έτους 2050. | 76 |
| Διάγραμμα 5-9 Συγκριτικά αποτελέσματα για το στάδιο της κατασκευής και συντήρησης μεταξύ διαφόρων μερών της εγκατάστασης ανά τόνο παραγόμενης μεθανόλης για την εγκατάσταση του έτους 2050. | 77 |
| Διάγραμμα 5-10 Συγκριτικά αποτελέσματα για τον αντίκτυπο του σταδίου της ηλεκτρόλυσης ανά τόνο παραγόμενης μεθανόλης με κάλυψη των ηλεκτρικών αναγκών από ΑΠΕ για την εγκατάσταση του έτους 2050. | 81 |
| Διάγραμμα 5-11 Συγκριτικά αποτελέσματα για τον αντίκτυπο του σταδίου της συμπίεσης ανά τόνο παραγόμενης μεθανόλης με κάλυψη των ηλεκτρικών αναγκών από ΑΠΕ για την εγκατάσταση του έτους 2050. | 82 |
| Διάγραμμα 5-12 Συγκριτικά αποτελέσματα για τον αντίκτυπο του σταδίου της αντίδρασης ανά τόνο παραγόμενης μεθανόλης με κάλυψη των ηλεκτρικών αναγκών από ΑΠΕ για την εγκατάσταση του έτους 2050. | 83 |
| Διάγραμμα 5-13 Συγκριτικά αποτελέσματα για τον αντίκτυπο του σταδίου του καθαρισμού ανά τόνο παραγόμενης μεθανόλης με κάλυψη των ηλεκτρικών αναγκών ΑΠΕ για την εγκατάσταση του έτους 2050. | 84 |
| Διάγραμμα 5-14 Συγκριτικά αποτελέσματα για τον αντίκτυπο ολόκληρου του κύκλου ζωής της εγκατάστασης ανά τόνο παραγόμενης μεθανόλης με κάλυψη των αναγκών από ηλεκτροπαραγωγό σταθμό βιομάζας και ΑΠΕ για την εγκατάσταση του έτους 2050. | 87 |

| | |
|---|-----|
| Διάγραμμα 5-15 Συγκριτικά αποτελέσματα για τον αντίκτυπο ολόκληρου του κύκλου ζωής της εγκατάστασης ανά τόνο παραγόμενης μεθανόλης με κάλυψη των ηλεκτρικών αναγκών από διαφορετικές πηγές ενέργειας για την εγκατάσταση του έτους 2050. | 89 |
| Διάγραμμα 5-16 Συγκριτικά αποτελέσματα για το στάδιο της κατασκευής και συντήρησης μεταξύ διαφόρων μερών της εγκατάστασης ανά τόνο παραγόμενης μεθανόλης για την εγκατάσταση του έτους 2030. | 91 |
| Διάγραμμα 5-17 Συγκριτικά αποτελέσματα για τον αντίκτυπο ολόκληρου του κύκλου ζωής της εγκατάστασης ανά τόνο παραγόμενης μεθανόλης με κάλυψη των αναγκών από ηλεκτροπαραγωγό σταθμό βιομάζας και ΑΠΕ για την εγκατάσταση του έτους 2030. | 93 |
| Διάγραμμα 5-18 Συγκριτικά αποτελέσματα για τον αντίκτυπο ολόκληρου του κύκλου ζωής της εγκατάστασης ανά τόνο παραγόμενης μεθανόλης με κάλυψη των ηλεκτρικών αναγκών από διαφορετικές πηγές ενέργειας για την εγκατάσταση του έτους 2030. | 95 |
| Διάγραμμα 5-19 Συγκριτικά αποτελέσματα για τον αντίκτυπο ολόκληρου του κύκλου ζωής της εγκατάστασης ανά τόνο παραγόμενης μεθανόλης με κάλυψη των ηλεκτρικών αναγκών από διαφορετικές πηγές ενέργειας για την εγκατάσταση του έτους 2030. | 97 |
| Διάγραμμα 5-20 Συγκριτικά αποτελέσματα μεταξύ απελευθέρωσης και χρησιμοποίησης του παραγόμενου οξυγόνου, με κάλυψη των ηλεκτρικών αναγκών από διαφορετικές πηγές για την μονάδα του έτους 2030. | 99 |
| Διάγραμμα 5-21 Συγκριτικά αποτελέσματα για την κατασκευή και συντήρηση του σταδίου της συμπίεσης ανά τόνο παραγόμενης μεθανόλης για την εγκατάσταση του έτους 2023. | 102 |
| Διάγραμμα 5-22 Συγκριτικά αποτελέσματα για την κατασκευή και συντήρηση μεταξύ διαφόρων μερών της εγκατάστασης ανά τόνο παραγόμενης μεθανόλης για την εγκατάσταση του έτους 2023. | 103 |
| Διάγραμμα 5-23 Συγκριτικά αποτελέσματα για τον αντίκτυπο του κύκλου ζωής των διαφόρων σταδίων της μονάδας, ανά τόνο παραγόμενης μεθανόλης με κάλυψη των ηλεκτρικών αναγκών από ηλεκτροπαραγωγό σταθμό βιομάζας για την εγκατάσταση του έτους 2023. | 105 |
| Διάγραμμα 5-24 Συγκριτικά αποτελέσματα για τον αντίκτυπο του κύκλου ζωής της εγκατάστασης ανά τόνο παραγόμενης μεθανόλης με κάλυψη των ηλεκτρικών αναγκών από διαφορετικές πηγές ενέργειας για την εγκατάσταση του έτους 2023. | 106 |
| Διάγραμμα 5-25 Συγκριτικά αποτελέσματα για την κατασκευή και συντήρηση των μονάδων ανά τόνο παραγόμενης μεθανόλης για τις εγκαταστάσεις των ετών 2023, 2030 και 2050. | 108 |
| Διάγραμμα 5-26 Συγκριτικά αποτελέσματα δυναμικού θέρμανσης του πλανήτη για την κατασκευή και συντήρηση των διαφόρων σταδίων των μονάδων ανά τόνο παραγόμενης μεθανόλης για τις εγκαταστάσεις των ετών 2023, 2030 και 2050. | 109 |
| Διάγραμμα 5-27 Συγκριτικά αποτελέσματα για τον αντίκτυπο του σταδίου της ηλεκτρόλυσης ανά τόνο παραγόμενης μεθανόλης με κάλυψη των ηλεκτρικών αναγκών από ΑΠΕ για τις εγκαταστάσεις των ετών 2023, 2030 και 2050. | 111 |
| Διάγραμμα 5-28 Συγκριτικά αποτελέσματα για το δυναμικό θέρμανσης του πλανήτη, για τις επιμέρους συνιστώσες του σταδίου της ηλεκτρόλυσης για τις εγκαταστάσεις των ετών 2023, 2030 και 2050. | 112 |

| | |
|--|-----|
| Διάγραμμα 5-29 Συγκριτικά αποτελέσματα για τον αντίκτυπο των μονάδων ανά τόνο παραγόμενης μεθανόλης με κάλυψη των ηλεκτρικών αναγκών από ΑΠΕ για τα έτη 2023, 2030 και 2050..... | 114 |
| Διάγραμμα 5-30 Συγκριτικά αποτελέσματα για το δυναμικό υπερθέρμανσης του πλανήτη, των σταδίων της μονάδας ανά τόνο παραγόμενης μεθανόλης με κάλυψη των ηλεκτρικών αναγκών από ΑΠΕ για τις εγκαταστάσεις των ετών 2023, 2030 και 2050. | 115 |
| Διάγραμμα 5-31 Συγκριτικά αποτελέσματα για τον αντίκτυπο στις τελικές κατηγορίες επιπτώσεων με κανονικοποίηση, για τα στάδια της μονάδας ανά τόνο παραγόμενης μεθανόλης με κάλυψη των ηλεκτρικών αναγκών από ΑΠΕ για την μονάδα του έτους 2030. | 117 |
| Διάγραμμα 5-32 Συγκριτικά αποτελέσματα για τον αντίκτυπο στις τελικές κατηγορίες επιπτώσεων με κανονικοποίηση, για τον κύκλο ζωής της μονάδας ανά τόνο παραγόμενης μεθανόλης με κάλυψη των ηλεκτρικών αναγκών από διαφορετικές πηγές ενέργειας για την μονάδα του έτους 2030. | 119 |
| Διάγραμμα 5-33 Συγκριτικά αποτελέσματα για τον αντίκτυπο στις τελικές κατηγορίες επιπτώσεων με κανονικοποίηση, για τον κύκλο ζωής των μονάδων των ετών 2023, 2030 και 2050 ανά τόνο παραγόμενης μεθανόλης με κάλυψη των ηλεκτρικών αναγκών από ΑΠΕ. | 121 |
| Διάγραμμα 6-1 Ανάλυση αβεβαιότητας δυναμικού θέρμανσης του πλανήτη, για χρήση ενέργειας από ηλεκτροπαραγωγό σταθμό βιομάζας και ΑΠΕ για το σενάριο αναφοράς. | 123 |
| Διάγραμμα 6-2 Ανάλυση αβεβαιότητας δυναμικού θέρμανσης του πλανήτη, για χρήση ενέργειας από ηλεκτροπαραγωγό σταθμό βιομάζας και ΑΠΕ για το σενάριο του έτους 2030. | 124 |
| Διάγραμμα 6-3 Ανάλυση αβεβαιότητας δυναμικού θέρμανσης του πλανήτη, για χρήση ενέργειας από ηλεκτροπαραγωγό σταθμό βιομάζας για το σενάριο του έτους 2023. | 125 |

Παράρτημα Ι Πίνακες Τιμών Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων

Πίνακας Ι-1 Τιμές δεικτών περιβαλλοντικών επιπτώσεων για την παραγωγή 1 MWh ηλεκτρικής ενέργειας από διαφορετικές πηγές.

| Κατηγορία επιπτώσεων | Μονάδες | Βιομάζα | Πράσινο ενεργειακό μείγμα | Δίκτυο | Φυσικό αέριο | Λιγνίτης |
|--|--------------|----------|---------------------------|----------|--------------|----------|
| Δυναμικό θέρμανσης του πλανήτη | kg CO2 eq | 4.58E+01 | 3.09E+01 | 8.00E+02 | 9.56E+02 | 1.30E+03 |
| Εξάντληση όζοντος | kg CFC11 eq | 1.03E-04 | 1.30E-05 | 3.30E-04 | 5.22E-04 | 6.86E-05 |
| Ιονίζουσα ακτινοβολία | kBq Co-60 eq | 0.00E+00 | 1.78E+00 | 1.88E+01 | 1.14E+00 | 9.23E+00 |
| Σχηματισμός όζοντος, ανθρώπινη υγεία | kg NOx eq | 9.53E+00 | 9.16E-02 | 9.83E-01 | 1.16E+00 | 1.47E+00 |
| Σχηματισμός σωματιδίων | kg PM2.5 eq | 1.99E-01 | 8.19E-02 | 1.74E+00 | 3.28E-01 | 2.85E+00 |
| Σχηματισμός όζοντος, χερσαία οικοσυστήματα | kg NOx eq | 1.50E+01 | 9.55E-02 | 9.96E-01 | 1.21E+00 | 1.47E+00 |
| Οξίνιση χερσαίων οικοσυστημάτων | kg SO2 eq | 7.10E-01 | 1.85E-01 | 3.61E+00 | 1.02E+00 | 6.64E+00 |
| Ευτροφισμός οικοσυστημάτων γλυκού νερού | kg P eq | 5.66E-05 | 2.62E-02 | 1.76E+00 | 1.24E-02 | 4.64E+00 |
| Ευτροφισμός θαλάσσιων οικοσυστημάτων | kg N eq | 1.83E-03 | 1.98E-03 | 1.07E-01 | 1.36E-03 | 2.81E-01 |
| Χερσαία οικοτοξικότητα | kg 1,4-DCB | 4.16E-02 | 1.07E+03 | 1.24E+03 | 7.32E+01 | 6.11E+02 |
| Οικοτοξικότητα γλυκού νερού | kg 1,4-DCB | 1.26E-02 | 2.88E+01 | 5.08E+01 | 1.16E+00 | 1.16E+02 |
| Θαλάσσια οικοτοξικότητα | kg 1,4-DCB | 1.69E-02 | 3.55E+01 | 6.94E+01 | 1.60E+00 | 1.60E+02 |
| Ανθρώπινη καρκινογενής οικοτοξικότητα | kg 1,4-DCB | 2.72E+00 | 9.76E+00 | 9.22E+01 | 6.48E+00 | 2.31E+02 |
| Ανθρώπινη μη-καρκινογενής οικοτοξικότητα | kg 1,4-DCB | 6.77E-01 | 1.53E+02 | 1.84E+03 | 2.26E+01 | 4.76E+03 |
| Χρήση γης | m2a crop eq | 0.00E+00 | 7.44E+00 | 3.92E+00 | 2.87E+00 | 2.66E+00 |
| Εξάντληση πόρων μεταλλευμάτων | kg Cu eq | 0.00E+00 | 7.69E-01 | 3.44E-01 | 2.78E-01 | 1.68E-01 |
| Εξάντληση ορυκτών πόρων | kg oil eq | 7.50E-01 | 7.72E+00 | 2.60E+02 | 3.34E+02 | 4.43E+02 |
| Χρήση νερού | m3 | 0.00E+00 | 7.33E-01 | 4.35E+00 | 1.00E+00 | 2.62E+00 |

Πίνακας I-2 Τιμές δεικτών περιβαλλοντικών επιπτώσεων για το στάδιο της κατασκευής και συντήρησης των διαφόρων μερών της μονάδας του έτους 2050, ανά τόνο παραγόμενης μεθανόλης.

| Κατηγορία επιπτώσεων | Μονάδες | Σύνολο | Βοηθητικά μέρη εγκατάστασης | ΗΛ/ση | Συμπύεση | Αντίδραση | Καθαρισμός |
|--|--------------|----------|-----------------------------|----------|----------|-----------|------------|
| Δυναμικό θέρμανσης του πλανήτη | kg CO2 eq | 2.27E+00 | 6.90E-01 | 4.56E-01 | 7.13E-02 | 8.63E-01 | 1.90E-01 |
| Εξάντληση όζοντος | kg CFC11 eq | 1.33E-06 | 3.88E-07 | 4.67E-07 | 2.38E-08 | 3.86E-07 | 6.39E-08 |
| Ιονίζουσα ακτινοβολία | kBq Co-60 eq | 1.45E-01 | 5.34E-02 | 2.19E-02 | 4.22E-03 | 5.32E-02 | 1.20E-02 |
| Σχηματισμός όζοντος, ανθρώπινη υγεία | kg NOx eq | 9.72E-03 | 2.84E-03 | 3.47E-03 | 1.70E-04 | 2.79E-03 | 4.47E-04 |
| Σχηματισμός σωματιδίων | kg PM2.5 eq | 1.20E-02 | 3.35E-03 | 3.54E-03 | 2.22E-04 | 4.34E-03 | 5.40E-04 |
| Σχηματισμός όζοντος, χερσαία οικοσυστήματα | kg NOx eq | 1.00E-02 | 2.98E-03 | 3.57E-03 | 1.75E-04 | 2.86E-03 | 4.62E-04 |
| Οξίνιση χερσαίων οικοσυστημάτων | kg SO2 eq | 2.87E-02 | 8.01E-03 | 1.09E-02 | 2.56E-04 | 8.94E-03 | 6.53E-04 |
| Ευτροφισμός οικοσυστημάτων γλυκού νερού | kg P eq | 3.01E-03 | 1.23E-03 | 4.86E-04 | 4.25E-05 | 1.13E-03 | 1.14E-04 |
| Ευτροφισμός θαλάσσιων οικοσυστημάτων | kg N eq | 1.15E-04 | 3.76E-05 | 2.11E-05 | 3.17E-06 | 4.38E-05 | 9.47E-06 |
| Χερσαία οικοτοξικότητα | kg 1,4-DCB | 1.25E+02 | 4.45E+01 | 5.16E+00 | 1.81E+00 | 6.98E+01 | 4.17E+00 |
| Οικοτοξικότητα γλυκού νερού | kg 1,4-DCB | 1.51E+00 | 7.03E-01 | 1.73E-01 | 5.72E-03 | 6.10E-01 | 1.49E-02 |
| Θαλάσσια οικοτοξικότητα | kg 1,4-DCB | 1.97E+00 | 9.24E-01 | 2.27E-01 | 8.25E-03 | 7.91E-01 | 2.14E-02 |
| Ανθρώπινη καρκινογενής οικοτοξικότητα | kg 1,4-DCB | 2.11E+00 | 4.75E-01 | 3.03E-01 | 9.23E-02 | 1.02E+00 | 2.19E-01 |
| Ανθρώπινη μη-καρκινογενής οικοτοξικότητα | kg 1,4-DCB | 2.57E+01 | 1.09E+01 | 5.21E+00 | 9.89E-02 | 9.25E+00 | 2.56E-01 |
| Χρήση γης | m2a crop eq | 1.12E-01 | 4.24E-02 | 1.73E-02 | 2.50E-03 | 4.34E-02 | 6.49E-03 |
| Εξάντληση πόρων μεταλλευμάτων | kg Cu eq | 2.00E-01 | 6.37E-02 | 4.17E-02 | 5.07E-03 | 7.77E-02 | 1.19E-02 |
| Εξάντληση ορυκτών πόρων | kg oil eq | 5.91E-01 | 1.83E-01 | 1.31E-01 | 1.74E-02 | 2.13E-01 | 4.69E-02 |
| Χρήση νερού | m3 | 2.39E-02 | 8.89E-03 | 3.47E-03 | 5.86E-04 | 9.35E-03 | 1.58E-03 |

Πίνακας Ι-3 Τιμές δεικτών περιβαλλοντικών επιπτώσεων για τον κύκλο ζωής των συνιστωσών της μονάδας του έτους 2050, ανά τόνο παραγόμενης μεθανόλης.

| Κατηγορία επιπτώσεων | Μονάδες | Σύνολο | Ηλ/της βιομάζα | Ηλ/της ΑΠΕ | Σύνθεση μεθανόλης | Μονάδα δέσμευσης CO2 | Χρήση CO2 |
|--|--------------|---------------|----------------|------------|-------------------|----------------------|-----------|
| Δυναμικό θέρμανσης του πλανήτη | kg CO2 eq | - 1.19E+03 | 7.86E+01 | 2.30E+02 | 6.73E+00 | 1.00E+01 | -1.52E+03 |
| Εξάντληση όζοντος | kg CFC11 eq | 2.79E-04 | 1.76E-04 | 9.72E-05 | 3.66E-06 | 1.85E-06 | 0.00E+00 |
| Ιονίζουσα ακτινοβολία | kBq Co-60 eq | 1.42E+01 | 2.01E-02 | 1.33E+01 | 4.28E-01 | 4.85E-01 | 0.00E+00 |
| Σχηματισμός όζοντος, ανθρώπινη υγεία | kg NOx eq | 1.77E+01 | 1.63E+01 | 6.83E-01 | 6.76E-01 | 1.77E-02 | 0.00E+00 |
| Σχηματισμός σωματιδίων | kg PM2.5 eq | 9.87E-01 | 3.42E-01 | 6.12E-01 | 2.14E-02 | 1.18E-02 | 0.00E+00 |
| Σχηματισμός όζοντος, χερσαία οικοσυστήματα | kg NOx eq | 2.74E+01 | 2.56E+01 | 7.12E-01 | 1.08E+00 | 1.85E-02 | 0.00E+00 |
| Οξίνιση χερσαίων οικοσυστημάτων | kg SO2 eq | 2.68E+00 | 1.22E+00 | 1.38E+00 | 4.76E-02 | 2.91E-02 | 0.00E+00 |
| Ευτροφισμός οικοσυστημάτων γλυκού νερού | kg P eq | 2.06E-01 | 2.73E-04 | 1.95E-01 | 7.77E-03 | 3.21E-03 | 0.00E+00 |
| Ευτροφισμός θαλάσσιων οικοσυστημάτων | kg N eq | 3.01E-02 | 3.14E-03 | 1.47E-02 | 3.76E-03 | 8.42E-03 | 0.00E+00 |
| Χερσαία οικοτοξικότητα | kg 1,4-DCB | 8.24E+03 | 2.10E+00 | 7.92E+03 | 2.81E+02 | 3.37E+01 | 0.00E+00 |
| Οικοτοξικότητα γλυκού νερού | kg 1,4-DCB | 2.20E+02 | 6.48E-02 | 2.14E+02 | 5.61E+00 | 5.83E-01 | 0.00E+00 |
| Θαλάσσια οικοτοξικότητα | kg 1,4-DCB | 2.71E+02 | 8.60E-02 | 2.63E+02 | 7.02E+00 | 7.44E-01 | 0.00E+00 |
| Ανθρώπινη καρκινογενής οικοτοξικότητα | kg 1,4-DCB | 8.13E+01 | 4.73E+00 | 7.27E+01 | 3.36E+00 | 5.01E-01 | 0.00E+00 |
| Ανθρώπινη μη-καρκινογενής οικοτοξικότητα | kg 1,4-DCB | 1.20E+03 | 2.37E+00 | 1.14E+03 | 4.70E+01 | 7.79E+00 | 0.00E+00 |
| Χρήση γης | m2a crop eq | 5.66E+01 | 7.63E-03 | 5.52E+01 | 1.21E+00 | 2.09E-01 | 0.00E+00 |
| Εξάντληση πόρων μεταλλευμάτων | kg Cu eq | 6.05E+00 | 9.05E-03 | 5.74E+00 | 2.77E-01 | 2.97E-02 | 0.00E+00 |
| Εξάντληση ορυκτών πόρων | kg oil eq | 6.51E+01 | 1.35E+00 | 5.75E+01 | 1.75E+00 | 4.48E+00 | 0.00E+00 |
| Χρήση νερού | m3 | 7.39E+00 | 4.10E-01 | 7.21E+00 | -3.85E-01 | 1.53E-01 | 0.00E+00 |

Πίνακας Ι-4 Τιμές δεικτών περιβαλλοντικών επιπτώσεων για τον κύκλο ζωής της μονάδας του έτους 2050 για κάλυψη των αναγκών από διαφορετικές πηγές ενέργειας, ανά τόνο παραγόμενης μεθανόλης.

| Κατηγορία επιπτώσεων | Μονάδες | ΑΠΕ | Βιομάζα, ΑΠΕ | Βιομάζα | Φυσικό αέριο |
|--|--------------|-----------|--------------|-----------|--------------|
| Δυναμικό θέρμανσης του πλανήτη | kg CO2 eq | -1.22E+03 | -1.19E+03 | -1.08E+03 | 7.47E+03 |
| Εξάντληση όζοντος | kg CFC11 eq | 1.25E-04 | 2.79E-04 | 9.48E-04 | 4.84E-03 |
| Ιονίζουσα ακτινοβολία | kBq Co-60 eq | 1.73E+01 | 1.42E+01 | 1.00E+00 | 1.13E+01 |
| Σχηματισμός όζοντος, ανθρώπινη υγεία | kg NOx eq | 1.53E+00 | 1.77E+01 | 8.77E+01 | 1.14E+01 |
| Σχηματισμός σωματιδίων | kg PM2.5 eq | 7.86E-01 | 9.87E-01 | 1.86E+00 | 3.07E+00 |
| Σχηματισμός όζοντος, χερσαία οικοσυστήματα | kg NOx eq | 1.97E+00 | 2.74E+01 | 1.38E+02 | 1.23E+01 |
| Οξίνιση χερσαίων οικοσυστημάτων | kg SO2 eq | 1.78E+00 | 2.68E+00 | 6.57E+00 | 9.53E+00 |
| Ευτροφισμός οικοσυστημάτων γλυκού νερού | kg P eq | 2.51E-01 | 2.06E-01 | 1.22E-02 | 1.23E-01 |
| Ευτροφισμός θαλάσσιων οικοσυστημάτων | kg N eq | 3.03E-02 | 3.01E-02 | 2.89E-02 | 2.45E-02 |
| Χερσαία οικοτοξικότητα | kg 1,4-DCB | 1.01E+04 | 8.24E+03 | 3.16E+02 | 8.47E+02 |
| Οικοτοξικότητα γλυκού νερού | kg 1,4-DCB | 2.69E+02 | 2.20E+02 | 6.25E+00 | 1.29E+01 |
| Θαλάσσια οικοτοξικότητα | kg 1,4-DCB | 3.32E+02 | 2.71E+02 | 7.87E+00 | 1.77E+01 |
| Ανθρώπινη καρκινογενής οικοτοξικότητα | kg 1,4-DCB | 9.33E+01 | 8.13E+01 | 2.90E+01 | 6.29E+01 |
| Ανθρώπινη μη-καρκινογενής οικοτοξικότητα | kg 1,4-DCB | 1.46E+03 | 1.20E+03 | 6.59E+01 | 2.48E+02 |
| Χρήση γης | m2a crop eq | 6.93E+01 | 5.66E+01 | 1.39E+00 | 2.69E+01 |
| Εξάντληση πόρων μεταλλευμάτων | kg Cu eq | 7.37E+00 | 6.05E+00 | 3.48E-01 | 2.82E+00 |
| Εξάντληση ορυκτών πόρων | kg oil eq | 7.70E+01 | 6.51E+01 | 1.34E+01 | 3.10E+03 |
| Χρήση νερού | m3 | 8.64E+00 | 7.39E+00 | 1.95E+00 | 1.11E+01 |

Πίνακας I-5 Τιμές δεικτών περιβαλλοντικών επιπτώσεων για το στάδιο της κατασκευής και συντήρησης των διαφόρων μερών της μονάδας για τα σενάρια των ετών 2023, 2030 και 2050, ανά τόνο παραγόμενης μεθανόλης.

| Κατηγορία επιπτώσεων | Μονάδες | Σενάριο 2023 | Σενάριο 2030 | Σενάριο 2050 |
|--|--------------|--------------|--------------|--------------|
| Δυναμικό θέρμανσης του πλανήτη | kg CO2 eq | 1.03E+01 | 2.70E+00 | 2.27E+00 |
| Εξάντληση όζοντος | kg CFC11 eq | 6.02E-06 | 1.65E-06 | 1.33E-06 |
| Ιονίζουσα ακτινοβολία | kBq Co-60 eq | 6.36E-01 | 1.69E-01 | 1.45E-01 |
| Σχηματισμός όζοντος, ανθρώπινη υγεία | kg NOx eq | 4.42E-02 | 1.21E-02 | 9.72E-03 |
| Σχηματισμός σωματιδίων | kg PM2.5 eq | 5.05E-02 | 1.45E-02 | 1.20E-02 |
| Σχηματισμός όζοντος, χερσαία οικοσυστήματα | kg NOx eq | 4.57E-02 | 1.25E-02 | 1.00E-02 |
| Οξίνιση χερσαίων οικοσυστημάτων | kg SO2 eq | 1.20E-01 | 3.58E-02 | 2.87E-02 |
| Ευτροφισμός οικοσυστημάτων γλυκού νερού | kg P eq | 1.19E-02 | 3.59E-03 | 3.01E-03 |
| Ευτροφισμός θαλάσσιων οικοσυστημάτων | kg N eq | 5.14E-04 | 1.39E-04 | 1.15E-04 |
| Χερσαία οικοτοξικότητα | kg 1,4-DCB | 3.97E+02 | 1.43E+02 | 1.25E+02 |
| Οικοτοξικότητα γλυκού νερού | kg 1,4-DCB | 5.21E+00 | 1.79E+00 | 1.51E+00 |
| Θαλάσσια οικοτοξικότητα | kg 1,4-DCB | 6.87E+00 | 2.34E+00 | 1.97E+00 |
| Ανθρώπινη καρκινογενής οικοτοξικότητα | kg 1,4-DCB | 9.51E+00 | 2.44E+00 | 2.11E+00 |
| Ανθρώπινη μη-καρκινογενής οικοτοξικότητα | kg 1,4-DCB | 9.46E+01 | 3.10E+01 | 2.57E+01 |
| Χρήση γης | m2a crop eq | 4.64E-01 | 1.32E-01 | 1.12E-01 |
| Εξάντληση πόρων μεταλλευμάτων | kg Cu eq | 8.50E-01 | 2.36E-01 | 2.00E-01 |
| Εξάντληση ορυκτών πόρων | kg oil eq | 2.70E+00 | 7.08E-01 | 5.91E-01 |
| Χρήση νερού | m3 | 1.00E-01 | 2.80E-02 | 2.39E-02 |

Πίνακας Ι-6 Τιμές δεικτών περιβαλλοντικών επιπτώσεων για τον κύκλο ζωής του σταδίου της ηλεκτρόλυσης, για τα σενάρια των ετών 2023, 2030 και 2050, ανά τόνο παραγόμενης μεθανόλης.

| Κατηγορία επιπτώσεων | Μονάδες | Σενάριο 2023 | Σενάριο 2030 | Σενάριο 2050 |
|--|----------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| Δυναμικό θέρμανσης του πλανήτη | kg CO2 eq | 3.43E+02 | 3.11E+02 | 2.83E+02 |
| Εξάντληση όζοντος | kg CFC11 eq | 1.45E-04 | 1.31E-04 | 1.20E-04 |
| Ιονίζουσα ακτινοβολία | kBq Co-60 eq | 1.97E+01 | 1.79E+01 | 1.64E+01 |
| Σχηματισμός όζοντος, ανθρώπινη υγεία | kg NOx eq | 1.02E+00 | 9.24E-01 | 8.41E-01 |
| Σχηματισμός σωματιδίων | kg PM2.5 eq | 9.13E-01 | 8.27E-01 | 7.53E-01 |
| Σχηματισμός όζοντος, χερσαία οικοσυστήματα | kg NOx eq | 1.06E+00 | 9.62E-01 | 8.76E-01 |
| Οξίνιση χερσαίων οικοσυστημάτων | kg SO2 eq | 2.07E+00 | 1.87E+00 | 1.70E+00 |
| Ευτροφισμός οικοσυστημάτων γλυκού νερού | kg P eq | 2.90E-01 | 2.63E-01 | 2.40E-01 |
| Ευτροφισμός θαλάσσιων οικοσυστημάτων | kg N eq | 2.19E-02 | 1.99E-02 | 1.81E-02 |
| Χερσαία οικοτοξικότητα | kg 1,4-DCB | 1.17E+04 | 1.07E+04 | 9.75E+03 |
| Οικοτοξικότητα γλυκού νερού | kg 1,4-DCB | 3.17E+02 | 2.89E+02 | 2.63E+02 |
| Θαλάσσια οικοτοξικότητα | kg 1,4-DCB | 3.91E+02 | 3.56E+02 | 3.24E+02 |
| Ανθρώπινη καρκινογενής οικοτοξικότητα | kg 1,4-DCB | 1.09E+02 | 9.83E+01 | 8.95E+01 |
| Ανθρώπινη μη-καρκινογενής οικοτοξικότητα | kg 1,4-DCB | 1.70E+03 | 1.54E+03 | 1.40E+03 |
| Χρήση γης | m2a crop eq | 8.17E+01 | 7.45E+01 | 6.79E+01 |
| Εξάντληση πόρων μεταλλευμάτων | kg Cu eq | 8.59E+00 | 7.76E+00 | 7.06E+00 |
| Εξάντληση ορυκτών πόρων | kg oil eq | 8.54E+01 | 7.76E+01 | 7.07E+01 |
| Χρήση νερού | m3 | 1.02E+01 | 9.52E+00 | 8.87E+00 |

Πίνακας Ι-7 Τιμές δεικτών περιβαλλοντικών επιπτώσεων για τον κύκλο ζωής των μονάδων, με κάλυψη των ηλεκτρικών αναγκών από ΑΠΕ, ανά τόνο παραγόμενης μεθανόλης.

| Κατηγορία επιπτώσεων | Μονάδες | Σενάριο 2023 | Σενάριο 2030 | Σενάριο 2050 |
|--|--------------|--------------|--------------|--------------|
| Δυναμικό θέρμανσης του πλανήτη | kg CO2 eq | -1.15E+03 | -1.19E+03 | -1.22E+03 |
| Εξάντληση όζοντος | kg CFC11 eq | 1.55E-04 | 1.37E-04 | 1.25E-04 |
| Ιονίζουσα ακτινοβολία | kBq Co-60 eq | 2.11E+01 | 1.89E+01 | 1.73E+01 |
| Σχηματισμός όζοντος, ανθρώπινη υγεία | kg NOx eq | 1.83E+00 | 1.62E+00 | 1.53E+00 |
| Σχηματισμός σωματιδίων | kg PM2.5 eq | 9.75E-01 | 8.61E-01 | 7.86E-01 |
| Σχηματισμός όζοντος, χερσαία οικοσυστήματα | kg NOx eq | 2.33E+00 | 2.06E+00 | 1.97E+00 |
| Οξίνιση χερσαίων οικοσυστημάτων | kg SO2 eq | 2.21E+00 | 1.95E+00 | 1.78E+00 |
| Ευτροφισμός οικοσυστημάτων γλυκού νερού | kg P eq | 3.09E-01 | 2.75E-01 | 2.51E-01 |
| Ευτροφισμός θαλάσσιων οικοσυστημάτων | kg N eq | 3.45E-02 | 3.21E-02 | 3.03E-02 |
| Χερσαία οικοτοξικότητα | kg 1,4-DCB | 1.24E+04 | 1.10E+04 | 1.01E+04 |
| Οικοτοξικότητα γλυκού νερού | kg 1,4-DCB | 3.28E+02 | 2.95E+02 | 2.69E+02 |
| Θαλάσσια οικοτοξικότητα | kg 1,4-DCB | 4.05E+02 | 3.64E+02 | 3.32E+02 |
| Ανθρώπινη καρκινογενής οικοτοξικότητα | kg 1,4-DCB | 1.19E+02 | 1.02E+02 | 9.33E+01 |
| Ανθρώπινη μη-καρκινογενής οικοτοξικότητα | kg 1,4-DCB | 1.81E+03 | 1.60E+03 | 1.46E+03 |
| Χρήση γης | m2a crop eq | 8.40E+01 | 7.59E+01 | 6.93E+01 |
| Εξάντληση πόρων μεταλλευμάτων | kg Cu eq | 9.38E+00 | 8.08E+00 | 7.37E+00 |
| Εξάντληση ορυκτών πόρων | kg oil eq | 9.37E+01 | 8.39E+01 | 7.70E+01 |
| Χρήση νερού | m3 | 1.01E+01 | 9.29E+00 | 8.64E+00 |