



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**  
ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ  
**«ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΥΤΟΜΑΤΙΣΜΟΥ»**  
ΤΟΜΕΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

**Συγκριτική μελέτη αποθήκευσης ηλεκτρικής  
ενέργειας μέσω παραγωγής Υποκατάστατου Φυσικού  
Αερίου (ΥΦΑ)**

**ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ**

της

**Τσιμέκη Βασιλικής**

Επιβλέπων: **Μ. Φούντη**

**Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.**

Αθήνα, Οκτώβριος 2018





## Ευχαριστίες

Η διπλωματική αυτή εργασία εκπονήθηκε κατά το ακαδημαϊκό έτος 2017-2018 υπό την επίβλεψη της κ. Μαρίας Φούντη, καθηγήτριας του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου (Ε.Μ.Π.) της σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών, στην οποία και οφείλω ιδιαίτερες ευχαριστίες.

Στη συνέχεια, θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τον κ. Δημήτρη Γιαννόπουλο για την πολύτιμη βοήθεια που μου προσέφερε, για την άριστη καθοδήγηση κατά την εκπόνηση της παρούσας εργασίας αλλά και για την ευκαιρία που μου έδωσε να ασχοληθώ με ένα τόσο ενδιαφέρον θέμα.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου για την υποστήριξη που μου παρέχει και τους φίλους μου για τη βοήθεια που μου προσέφεραν σε όλη τη διάρκεια των σπουδών.



## Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει ως αντικείμενο την εφαρμογή Ανάλυσης Κύκλου Ζωής στην παραγωγή Υποκατάστατου Φυσικού Αερίου (ΥΦΑ) (Substitute Natural Gas – SNG) για το Διασυνδεδεμένο Σύστημα της Ελλάδας. Αποσκοπεί στην εκτίμηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων (ως προς τις εκπομπές CO<sub>2</sub>) της συνολικής διεργασίας αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας σε ΥΦΑ, που περιλαμβάνει τα στάδια της ηλεκτρόλυσης, του διαχωρισμού CO<sub>2</sub> από μια τυπική ροή καυσαερίων και της μεθανοποίησης).

Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, όπως η αιολική και η ηλιακή, έχουν τεράστιες δυνατότητες να μειώσουν την εξάρτηση από τα ορυκτά καύσιμα και τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου στον ηλεκτρικό τομέα, παρόλα αυτά είναι δύσκολη η διαχείριση της παραγόμενης αυτής ενέργειας σύμφωνα με το απαιτούμενο φορτίο ενώ η αποθήκευση μεγάλων ποσοτήτων της καθίσταται δύσκολη και αντιοικονομική.

Η παραγωγή υποκατάστατου φυσικού αερίου συγκεντρώνει έντονο ερευνητικό ενδιαφέρον, καθώς παρέχει την δυνατότητα παραγωγής υποκατάστατου καυσίμου ικανού να αντικαταστήσει την υφιστάμενη αγορά φυσικού αερίου από τις χώρες παραγωγής, το οποίο χρησιμοποιείται για θέρμανση, παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, για μεταφορές κ.α. Ενδεχόμενη διείσδυση αυτής της τεχνολογίας προωθεί την ενεργειακή και οικονομική ανεξαρτητοποίηση, ενώ παρέχει και δυνατότητα αποθήκευσης της απορριπτόμενης ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές. Επιπρόσθετο αναμενόμενο αποτέλεσμα της παραγωγής ΥΦΑ θα ήταν η μείωση των απαιτούμενων ποσοτήτων φυσικού αερίου για την κάλυψη των εσωτερικών αναγκών για ενέργεια από τις χώρες εξόρυξής του, καλύπτοντας ένα ικανό ποσό ενέργειας το εγχώρια παραγόμενο υποκατάστατο φυσικό αέριο.

Αρχικά περιγράφονται οι βασικές αρχές λειτουργίας της παραγωγής υποκατάστατου φυσικού αερίου που είναι η μεθανοποίηση, η ηλεκτρόλυση και η δέσμευση και ο διαχωρισμός εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα από τα καυσαέρια και στη συνέχεια διατυπώνεται η μεθοδολογία της Ανάλυσης Κύκλου Ζωής (ΑΚΖ).

Μέσω του λογισμικού Simapro υπολογίζονται οι εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα για τρία διαφορετικά σενάρια. Εξετάστηκαν δύο σενάρια για δύο διαφορετικούς βαθμούς απόδοσης της διαδικασίας παραγωγής υποκατάστατου Φυσικού Αερίου και ένα σενάριο όπου κατά τη διεργασία του διαχωρισμού του διοξειδίου ένας μέρος της απαιτούμενης θερμότητας (500 MJ) προέρχεται από καύση Φυσικού Αερίου. Για την εξαγωγή των αποτελεσμάτων χρησιμοποιήθηκαν ως δεδομένα εισόδου το ενεργειακό μίγμα της Ηπειρωτικής Ελλάδας για το 2017, για το 2050, σύμφωνα με τον Εθνικό Ενεργειακό Σχεδιασμό (Οδικός χάρτης για το 2050) που

εκδόθηκε τον Μάρτιο του 2012 από το ΥΠΕΚΑ αλλά και το ενδεχόμενο η ενέργεια να προέρχεται μόνο από την αιολική παραγωγή.

Στη συνέχεια μέσω του λογισμικού Simapro υπολογίστηκαν οι εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα για την τεχνολογία των αναστρέψιμων υδροηλεκτρικών καθώς αποτελεί τεχνολογία αποθήκευσης μεγάλης κλίμακας όπως και η τεχνολογία παραγωγής υποκατάστατου Φυσικού Αερίου. Με ίδια δεδομένα εισόδου εξετάστηκαν τρία σενάρια για τρεις διαφορετικούς βαθμούς απόδοσης της τεχνολογίας αυτής.

Συνοψίζοντας, οι εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα της τεχνολογίας PHS, όπως προκύπτει από τα αποτελέσματα του SimaPro, κυμαίνονται σχεδόν στα ίδια επίπεδα με τις εκπομπές της τεχνολογίας PtG. Η περιβαλλοντική συμπεριφορά ως προς τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα μπορεί να κυμανθεί σε μεγάλα εύρη και για τα δύο συστήματα. Κάτι που σημαίνει ότι δεν υπάρχει μονοσήμαντη απάντηση στο ποιο από τα δύο αποθηκεύει με λιγότερες εκπομπές.

## Abstract

The present thesis aims to implement a Life Cycle Analysis model in the production of Substitute Natural Gas (SNG) for the Interconnected System of Greece. Renewable energy sources, such as wind and solar energy, have enormous potential to reduce the reliance on fossil fuels and greenhouse gas emissions in the energy sector; nevertheless, it is difficult to estimate control loads with accuracy, while the storage of large quantities becomes difficult and uneconomical.

Many studies have focused on the production of a substitute natural gas (SNG), as it provides the possibility to produce a substitute fuel, capable of replacing the existing gas market from the gas producing countries, which is used for heating, electricity production, transport, etc. Possible implementation of this technology creates energy and economic independence, and also provides the ability to store discarded energy from renewable sources. This technology has the effect of reducing the required quantities of natural gas to meet the domestic energy needs of its gas producing countries, thus covering a sufficient amount of energy, the domestically produced substitute natural gas.

This thesis will attempt to describe the basic principles for the production of substitute natural gas, namely methanisation, electrolysis, carbon dioxide capture and separation from the exhaust gases and then, formulate the LCA (Life Cycle Analysis) methodology used for exporting results through Simapro software.

Simapro software calculates carbon dioxide emissions for three different scenarios. Two of them were examined for two different degrees of performance of the substitute natural gas substitution process and a scenario where, in the dioxin separation process, part of the required heat (500 MJ) comes from combustion of natural gas. For the export of the results, the energy mix of Continental Greece for 2017 and 2050 was used as input data.

Simapro software then calculates carbon dioxide emissions for pumped hydroelectric energy storage as it is a large scale storage technology as well as substitute natural gas technology. Three scenarios for three different grades of this technology were examined using the same input data.

To sum up, PHS's carbon dioxide emissions, as shown by the results of SimaPro, are almost at the same level as PtG emissions. Environmental behavior in terms of carbon dioxide emissions may vary widely across both systems. Something that means there is no specific answer in which of the two store technologies has less emissions.





## Περιεχόμενα

Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή	13
Κεφάλαιο 2: Τεχνολογίες αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας	15
2.1. Οφέλη αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας από ΑΠΕ	15
2.2. Αποθήκευση ηλεκτρισμού με δυναμική ενέργεια	17
2.2.1. Αντλησιοταμίευση (pumped hydroelectric energy storage)	17
2.2.2. Αποθήκευση μέσω συμπιεσμένου αέρα (CAES)	20
2.2.3. Τεχνολογία Liquid-Piston	24
2.3. Αποθήκευση ηλεκτρισμού με κινητική ενέργεια	25
2.3.1. Σφόνδυλοι	25
2.4. Αποθήκευση ηλεκτρισμού με χημική ενέργεια	26
2.4.1. Συσσωρευτές	26
2.4.2. Το υδρογόνο ως δευτερογενές καύσιμο	27
2.4.2.1. Το υδρογόνο σε υγρή μορφή	28
2.4.2.2. Το υδρογόνο σε αέρια μορφή	28
2.5. Αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας με υπερ-πυκνωτές και υπεραγώγιμα πηνία	29
2.6. Σύγκριση μεθόδων	29
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	31
Κεφάλαιο 3: Παραγωγή Υποκατάστατου Φυσικού Αερίου-Substitute Natural Gas (SNG)	33
3.1. Ηλεκτρόλυση	34
3.1.1. Αρχές λειτουργίας	35
3.1.2. Ηλεκτρόδια	37
3.1.3. Ηλεκτρολύτης	40
3.1.4. Μέθοδοι παραγωγής υδρογόνου μέσω ηλεκτρόλυσης νερού	41
3.1.4.1. Αλκαλική ηλεκτρόλυση	41
3.1.4.2. PEM ηλεκτρόλυση	43
3.1.4.3. Ηλεκτρόλυση ατμού	44
3.1.4.4. Το υδρογόνο ως παραπροϊόν από την παραγωγή χλωριούχων αλκαλίων	45
3.2. Μεθανοποίηση	47
3.2.1. Βασικές αρχές	47
3.2.2. Σχεδίαση αντιδραστήρα μεθανοποίησης	50
3.2.3. Πρόσφατες ερευνητικές δραστηριότητες	52
3.3. Δέσμευση και διαχωρισμός διοξειδίου του άνθρακα	52

3.3.1. Διαχωρισμός μέσω προσρόφησης	52
3.3.2. Τεχνολογίες προσρόφησης	54
3.3.2.1. Προσρόφηση με εναλλαγή πίεσης-PSA	54
3.3.2.2. Προσρόφηση με εναλλαγή θερμοκρασίας-TSA	55
<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ</b>	57
<b>Κεφάλαιο 4: Μεθοδολογία ανάλυσης κύκλου ζωής (AKZ)</b>	59
4.1. Μεθοδολογία	60
4.2. Σκοπός ανάλυσης κύκλου ζωής	62
4.2.1. Λειτουργική μονάδα	62
4.2.2. Όρια συστήματος	62
4.2.3. Ποιότητα δεδομένων	62
4.2.4. Συλλογή δεδομένων και καταγραφή κύκλου ζωής	62
4.3. Χρήσεις της AKZ	63
4.3.1. Η AKZ στη δημιουργία δεικτών	64
4.3.2. Η AKZ στη βιομηχανία	64
4.3.3. AKZ και οικολογικός σχεδιασμός (Eco-Desing/Ecomaterials)	64
4.3.4. Η AKZ ως εργαλείο περιβαλλοντικής διαχείρισης	65
4.3.5. Η AKZ ως εργαλείο εκτίμησης κόστους	65
4.4. Δυνατότητες διαφορετικών προσεγγίσεων AKZ	66
4.5. Εκτίμηση επιπτώσεων	66
4.6. Εκτίμηση βελτιώσεων	67
<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ</b>	68
<b>Κεφάλαιο 5: Εφαρμογή Ανάλυσης Κύκλου Ζωής (AKZ)</b>	69
5.1. Σκοπός-Αντικείμενο	70
5.2. Λειτουργική Μονάδα	70
5.3. Μοντελοποίηση	70
5.3.1. Ευαισθησία	71
5.4. Ανάλυση αποθέματος	72
5.4.1 Παραγωγή H <sub>2</sub> στην ηλεκτρόλυση του νερού	72
5.4.2 Παραγωγή CH <sub>4</sub> (μεθάνιο) μέσω της αντίδρασης Sabatier	73
5.4.3 Διαχωρισμός CO <sub>2</sub> από τα καυσαέρια σε μονάδες ηλεκτροπαραγωγής με καύση άνθρακα μέσω καθαρισμού αμινών	75
5.4.4 Διαδικασίες αναφοράς	76
5.5 Εθνικός ενεργειακός σχεδιασμός	76

5.5.1 Η ηλεκτροπαραγωγή στην Ηπειρωτική Ελλάδα το 2017	78
5.5.2 Εξέλιξη της ηλεκτροπαραγωγής στην Ηπειρωτική Ελλάδα έως το 2050	78
5.6 Υπολογισμός εκπομπών CO <sub>2</sub> στην τεχνολογία αναστρέψιμων υδροηλεκτρικών (PHS)	83
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	85
Κεφάλαιο 6: Συμπεράσματα	85
Παράρτημα Ι	89
Παράρτημα ΙΙ	94



## Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή

Ο κυμαινόμενος χαρακτήρας των ΑΠΕ δυσκολεύει την αξιοποίησή τους κατά βέλτιστο τρόπο, με αποτέλεσμα η ενσωμάτωσή τους στο δίκτυο ηλεκτροπαραγωγής να είναι ως ένα βαθμό προβληματική. Η εισαγωγή συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας μπορεί να μειώσει αντίστοιχα ζητήματα, αποθηκεύοντας περισσευούμενη ισχύ σε περιόδους χαμηλής ζήτησης και επαναποδίδοντάς την σε περιόδους υψηλής.

Μία μέθοδος αποθήκευσης ενέργειας είναι μέσω της παραγωγής υδρογόνου, το οποίο αποτελεί καύσιμο και συνάμα φορέα ενέργειας. Τα συστήματα αυτά παρουσιάζουν πολλά πλεονεκτήματα, όπως η υψηλή ενεργειακή πυκνότητα του υδρογόνου κατά μάζα, η δυνατότητα χρήσης του σε συσκευές υψηλής απόδοσης όπως οι κυψέλες καυσίμου και οι τεράστιες δυνατότητες αποθήκευσης, χωρίς να εμφανίζονται φαινόμενα αυτοαπωλειών (αυτοεκφόρτισης) που συνοδεύουν άλλες τεχνολογίες αποθήκευσης.

Εντούτοις, με το υδρογόνο προκύπτουν άλλα ζητήματα, όπως η χαμηλή κατ' όγκο του ενεργειακή πυκνότητα και άρα η απαίτηση για μετέπειτα συμπίεση, η δυσκολία αποθήκευσης λόγω του μεγέθους των μορίων του κ.α. Ως εκ τούτου, έχει προταθεί η περαιτέρω μετατροπή του σε μεθάνιο, μέσω μιας διαδικασίας γνωστής ως μεθανοποίηση. Πράγματι, το μεθάνιο αποτελεί ένα εμπορικό καύσιμο, που μπορεί τόσο να χρησιμοποιηθεί σε μοντέρνα συστήματα για καύση ή ηλεκτροπαραγωγή με πολύ υψηλή απόδοση όσο και να αποθηκευτεί και μεταφερθεί μέσω της τεράστιας υποδομής των δικτύων φυσικού αερίου.

Τα βασικά στάδια παραγωγής του ανανεώσιμου αυτού μεθανίου, υπό τη μορφή μίγματος αερίων πλούσιων σε αυτό, καθώς και της αναβάθμισής του σε φυσικό αέριο προδιαγραφών δικτύου, γίνεται με τα εξής βήματα:

1. Ηλεκτρόλυση νερού με ρεύμα από ΑΠΕ, προς παραγωγή υδρογόνου.
2. Μεθανοποίηση μέσω του υδρογόνου αυτού και δεσμευμένου διοξειδίου του άνθρακα, προς παραγωγή μεθανίου και νερού (ατμού).
3. Καθαρισμός του αερίου μίγματος που προκύπτει από υδρογόνο, ατμό και διοξείδιο του άνθρακα ως τα επίπεδα των προδιαγραφών.

Στη παρούσα διπλωματική εργασία θα θεμελιωθεί το θεωρητικό υπόβαθρο αυτών των βημάτων και κατόπιν θα παρουσιαστεί μια μελέτη Ανάλυσης Κύκλου Ζωής της τεχνολογίας αυτής.

Η AKZ που παρουσιάζεται εδώ έχει στόχο την εκτίμηση της περιβαλλοντικής απόδοσης του συνολικού συστήματος παραγωγής υποκατάστατου Φυσικού Αερίου, ως προς τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα και την αξιολόγηση των παραμέτρων που επηρεάζουν όπως το μείγμα της ηλεκτρικής ενέργειας προς αποθήκευση, η αποδοτικότητα της διεργασίας παραγωγής υποκατάστατου φυσικού αερίου και η

πηγή του διοξειδίου του άνθρακα. Καθώς η παραγωγή υποκατάστατου Φυσικού Αερίου έχει πολλαπλές εφαρμογές, υπάρχουν διάφορες διαδικασίες αναφοράς. Επομένως, η AKZ περιορίζεται στην παραγωγή υδρογόνου και μεθανίου και δεν αφορά τη μεταφορά και τη μετατροπή τους στην τελική ενέργεια λεπτομερώς.

Μέσω του λογισμικού Simapro υπολογίζονται οι εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα της διαδικασίας παραγωγής Φυσικού αερίου για τρία διαφορετικά σενάρια.

Στο πρώτο σενάριο θεωρήθηκε ότι ο συνολικός βαθμός απόδοσης της διαδικασίας είναι περίπου 50% και το ποσό θερμότητας που απαιτείται για τον διαχωρισμό του διοξειδίου του άνθρακα προέρχεται εξολοκλήρου από την απώλεια θερμότητας της διαδικασίας σύνθεσης του μεθανίου.

Στο δεύτερο σενάριο θεωρήθηκε ο ίδιος συνολικός βαθμός απόδοσης, αλλά ένα ποσοστό της θερμότητας (55 MJ) αυτής προήρθε από την καύση φυσικού αερίου.

Τέλος, στο τρίτο σενάριο θεωρήθηκε ο μέγιστος θεωρητικός βαθμός απόδοσης της συγκεκριμένης διεργασίας (85%).

Και στα τρία σενάρια χρησιμοποιήθηκαν ως δεδομένα εισόδου το ενεργειακό μίγμα της Ηπειρωτικής Ελλάδας για το 2017, για το 2050, σύμφωνα με τον Εθνικό Ενεργειακό Σχεδιασμό (Οδικός χάρτης για το 2050) που εκδόθηκε τον Μάρτιο του 2012 από το ΥΠΕΚΑ αλλά και το ενδεχόμενο η ενέργεια να προέρχεται μόνο από την αιολική παραγωγή.

Στη συνέχεια μέσω του λογισμικού Simapro υπολογίστηκαν οι εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα για τρία σενάρια της τεχνολογίας των αναστρέψιμων υδροηλεκτρικών. Η τεχνολογία αυτή αποτελεί τεχνολογία αποθήκευσης μεγάλης κλίμακας κάτι που την καθιστά άμεσα συγκρίσιμη με την τεχνολογία παραγωγής υποκατάστατου Φυσικού Αερίου.

Τα σενάρια που επιλέχθηκαν αφορούσαν τρεις διαφορετικούς βαθμούς απόδοσης 70%, 65% και 77%.

Ως δεδομένα εισόδου χρησιμοποιήθηκαν τα ίδια με αυτά της τεχνολογίας παραγωγής υποκατάστατου Φυσικού Αερίου.

## Κεφάλαιο 2: Τεχνολογίες αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας

Ένα μεγάλης σημασίας πρόβλημα που παρουσιάζει η ηλεκτρική ενέργεια, είναι ότι η αποθήκευση μεγάλων ποσοτήτων της καθίσταται δύσκολη και αντιοικονομική. Η ενέργεια που παράγεται κάθε στιγμή στους ηλεκτρικούς σταθμούς είναι όση και η εκάστοτε ζήτηση φορτίου, ενώ η επιπλέον παραγωγή της είναι ανώφελη εφόσον δεν πρόκειται να χρησιμοποιηθεί ή να αποθηκευτεί. Και επειδή η ηλεκτρική ενέργεια γενικά σε ένα ΣΗΕ δεν μπορεί να αποθηκευτεί ηλεκτρικά, γεννιάται η ανάγκη ανάπτυξης συστημάτων μετατροπής της σε μορφές που μπορούν να αποθηκευτούν ευκολότερα. Ένα σημαντικό πλεονέκτημα της ηλεκτρικής ενέργειας, είναι ότι μπορεί να μετατραπεί αποδοτικά σε κάποια άλλη μορφή, η οποία μπορεί με τη σειρά της να αποθηκευτεί πιο εύκολα. Έτσι, η ηλεκτρική ενέργεια μπορεί βασικά να αποθηκευτεί ηλεκτρομαγνητικά, ηλεκτροχημικά και υπό μορφή κινητικής ή δυναμικής ενέργειας [1,15].

### 2.1. Οφέλη αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας από ΑΠΕ

Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, όπως η αιολική και η ηλιακή, έχουν τεράστιες δυνατότητες να μειώσουν την εξάρτηση από τα ορυκτά καύσιμα και τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου στον ηλεκτρικό τομέα. Για να προσδιοριστεί ο δυναμικός ρόλος της αποθήκευσης της ηλεκτρικής ενέργειας στο μέλλον, είναι σημαντικό να εξεταστούν οι τεχνικές και οικονομικές επιπτώσεις. Είναι επίσης σημαντικό να εξεταστούν τα οικονομικά μιας ποικιλίας δυνητικών ανταγωνιστικών τεχνολογιών, όπως η απόκριση της ζήτησης, της μετάδοσης, της ευέλικτης παραγωγής και οι βελτιωμένες επιχειρησιακές πρακτικές. Επιπλέον, ενώ υπάρχουν σαφή οφέλη από την αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας είναι σημαντικό να εξεταστεί σε σχέση με τις ανάγκες του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας στο σύνολο του [2].

Σε κάθε ενεργειακό σύστημα το μεγαλύτερο πρόβλημα που αντιμετωπίζεται είναι αυτό της διαχείρισης της παραγόμενης ενέργειας σύμφωνα με το απαιτούμενο φορτίο.

Στα διάφορα ενεργειακά συστήματα είναι δυνατόν να παρατηρηθούν: α)εποχική διακύμανση των ενεργειακών απαιτήσεων, β)διακύμανση κατά την παραγωγή ενέργειας γ) διαφορά στην ποσότητα παραγωγής και ζήτησης της ενέργειας.

Η ανάγκη αντιμετώπισης αυτών των θεμάτων είναι αυξημένη και σε αυτό το σημείο έρχεται να παίξει το ρόλο του ρυθμιστή η αποθήκευση της ενέργειας ώστε να εξομαλύνει τα προαναφερθέντα ζητήματα.

Μια μονάδα αποθήκευσης της ενέργειας σε ένα οποιοδήποτε σύστημα παραγωγής ενέργειας είναι μια εγκατάσταση, συνήθως υποκείμενη σε ανεξάρτητο έλεγχο, η οποία αποθηκεύει την ενέργεια που παράγεται στο σύστημα παραγωγής και μπορεί να τη διατηρεί και να την αποδίδει όταν είναι απαραίτητο.



Ένας κύκλος αποθήκευσης ενέργειας περιλαμβάνει τη φόρτιση της ενεργειακής αποθήκης, τη διατήρηση της αποθηκευμένης ενέργειας και την αποφόρτιση της. Οι απώλειες τοποθετούνται στο σύστημα διατήρησης της αποθηκευμένης ενέργειας αλλά μπορούν να υπεισέρχονται σε οποιοδήποτε στάδιο.

Τα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας έχουν ορισμένα πλεονεκτήματα από την εφαρμογή τους:

- Αυξάνουν την παραγωγική ικανότητα του συστήματος, αφού η ενέργεια που παράγεται σε περιόδους απαίτησης χαμηλού φορτίου μπορεί να αποθηκευτεί και να χρησιμοποιηθεί σε περιόδους ενεργειακής αιχμής χωρίς το σύστημα να λειτουργεί σε μόνιμη κατάσταση με υψηλά φορτία.
- Ενδυναμώνουν την καλύτερη λειτουργία των συστημάτων συμπαραγωγής θερμότητας και ηλεκτρισμού αφού με την αποθήκευση της ενέργειας τα συστήματα δε χρειάζεται να ενεργοποιούνται σύμφωνα με τις μεταβαλλόμενες ανάγκες του φορτίου.
- Αυξάνουν την αξιοπιστία του παραγωγικού συστήματος, αφού επιτρέπουν τη σταθερή παραγωγή χωρίς επικίνδυνες διακυμάνσεις.
- Μεταφέρουν την παραγωγή ενέργειας από τις περιόδους υψηλής ζήτησης σε περιόδους χαμηλής όπου το κόστος παραγωγής είναι μικρότερο με αποτέλεσμα το μειωμένο κόστος της ενέργειας.
- Αυξάνουν την προσαρμοστικότητα ενός συστήματος στις εκάστοτε ανάγκες.
- Μειώνουν το αρχικό κόστος και το κόστος συντήρησης του παραγωγικού συστήματος ενέργειας καθώς μειώνεται ο απαιτούμενος εξοπλισμός και η δυναμικότητα του.
- Μειώνουν την κατανάλωση των καυσίμων με αποτέλεσμα την εξοικονόμηση κόστους και την μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων

Οι εφαρμογές των συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας είναι πολλές και οι σημαντικότερες σήμερα είναι:

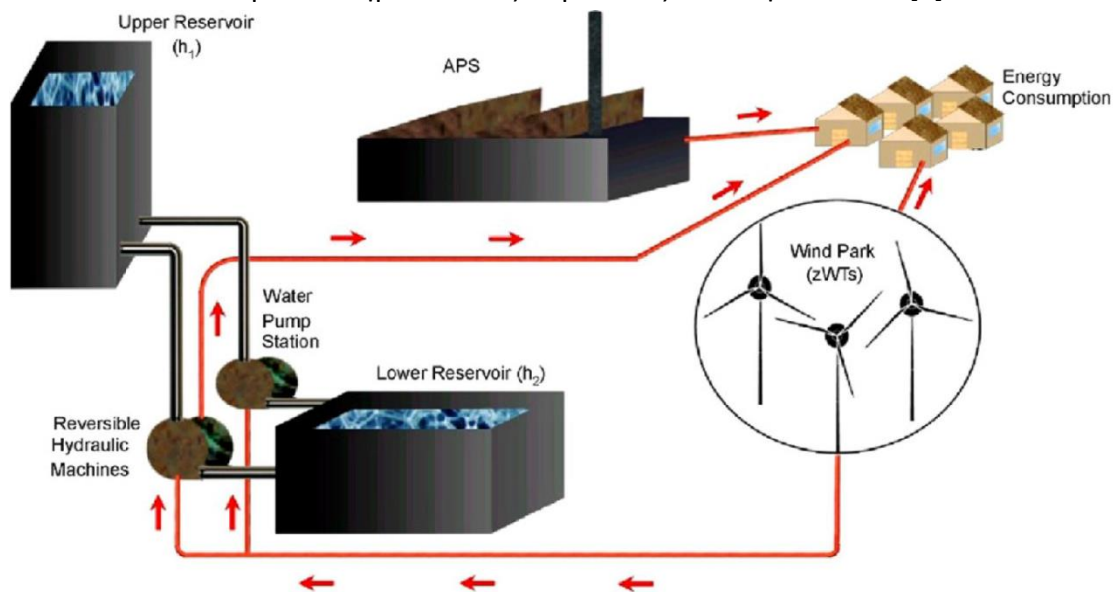
- Σε εταιρίες κοινής ωφέλειας, είναι δυνατή η αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας σε περιόδους χαμηλού κοστολογίου με σκοπό την χρησιμοποίησή της σε περιόδους αιχμής, μειώνοντας την εξάρτηση από τα ορυκτά καύσιμα (λιγνίτης, φυσικό αέριο, πετρέλαιο) και περιορίζοντας τη χρήση επιπλέον μονάδων παραγωγής για την κάλυψη των φορτίων.
- Στη βιομηχανία, απορροές υψηλής θερμότητας μπορούν να αποθηκευτούν και να χρησιμοποιηθούν σε στάδια προθέρμανσης και απόδοσης ενέργειας σε άλλες διεργασίες.
- Στην παραγωγή ενέργειας μέσω ΑΠΕ είναι δυνατή η αποθήκευση της ενέργειας σε περιόδους χαμηλού φορτίου ώστε να καλύψουν της ανάγκες αιχμών ή περιπτώσεων όπου η ανανεώσιμη ενέργεια δεν είναι διαθέσιμη λόγω περιοδικότητας (ηλιακά συστήματα, αιολικά συστήματα).

- Στον κτιριακό τομέα (οικιακό και εμπορικό) είναι δυνατή η αποθήκευση θερμικής ενέργειας και ηλεκτρικής ενέργειας σε εκτός αιχμής περιόδους, επιτρέποντας έτσι την εγκατάσταση μικρότερων μονάδων παραγωγής θερμικής ενέργειας για την κάλυψη των θερμικών και ψυκτικών φορτίων, την εξοικονόμηση ηλεκτρικής ενέργειας και την μείωση των τιμολογίων της[2,3,8,14].

## 2.2. Αποθήκευση ηλεκτρισμού με δυναμική ενέργεια

### 2.2.1. Αντλησιοταμίευση (pumped hydroelectric energy storage)

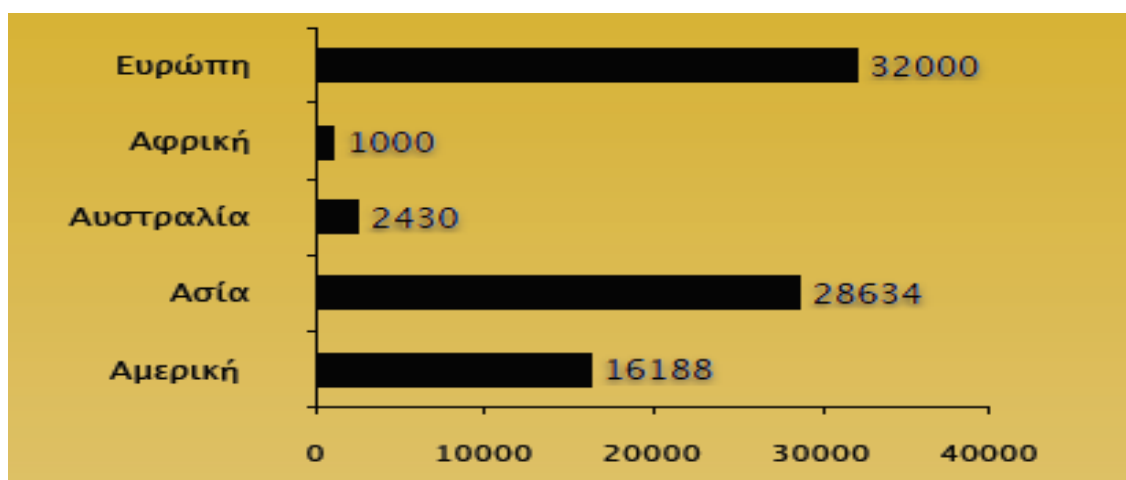
Η αποθήκευση με άντληση υδάτων αποτελεί την παλιότερη από τις τεχνολογίες αποθήκευσης κεντρικού σταθμού, ξεκίνησε να εφαρμόζεται το 1929 και ουσιαστικά μέχρι το 1970 ήταν η μόνη εμπορικά διαθέσιμη επιλογή για εφαρμογές ηλεκτροπαραγωγής. Σήμερα η αντλησιοταμίευση αποτελεί την πιο ελκυστική μέθοδο αποθήκευσης μεγάλης κλίμακας (100MW – 5000 MW) και μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε συνδυασμό με αιολικά πάρκα τόσο ως διεσπαρμένη παραγωγή, όσο και σε αυτόνομα συστήματα όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 1[4].



Εικόνα 1: Σχηματικό διάγραμμα συστήματος αντλησιοταμίευσης με αιολικό πάρκο που σε συνδυασμό με θερμικό σταθμό τροφοδοτεί ένα αυτόνομο σύστημα. [4]

Η αντλησιοταμίευση προκύπτει από την ανάγκη της αποθήκευσης μεγάλων ποσοτήτων ενέργειας, όταν αυτά διατίθενται με κάποιο τρόπο μία δεδομένη χρονική στιγμή, κατά την οποία δεν μπορούν να απορροφηθούν. Τα αποθηκευμένα ποσά ενέργειας μπορούν να χρησιμοποιηθούν μία άλλη χρονική στιγμή, όταν προκύψει σχετική ανάγκη για παροχή ενέργειας. Η αντλησιοταμίευση αποτελεί την μεγαλύτερη σε χρήση μέθοδο αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας παγκοσμίως, με την Αμερική να αποθηκεύει με αντλησιοταμίευση συνολικά 19GW ισχύος (το οποίο αποτελεί το 2,7% της παγκόσμιας αποθηκευόμενης με αντλησιοταμίευση ισχύ) και την Ιαπωνία να αποθηκεύει 24GW ισχύος. Υπάρχουν μικρές μονάδες από 30 έως

350MW και εργοστάσια παραγωγής από 300 έως 1800MW. Η απόδοσή τους φτάνει το 60% για τις παλιές μονάδες και το 78% για τις νέες. Στην παρακάτω εικόνα παρουσιάζεται η εγκατεστημένη ισχύς ανά Ήπειρό [5].



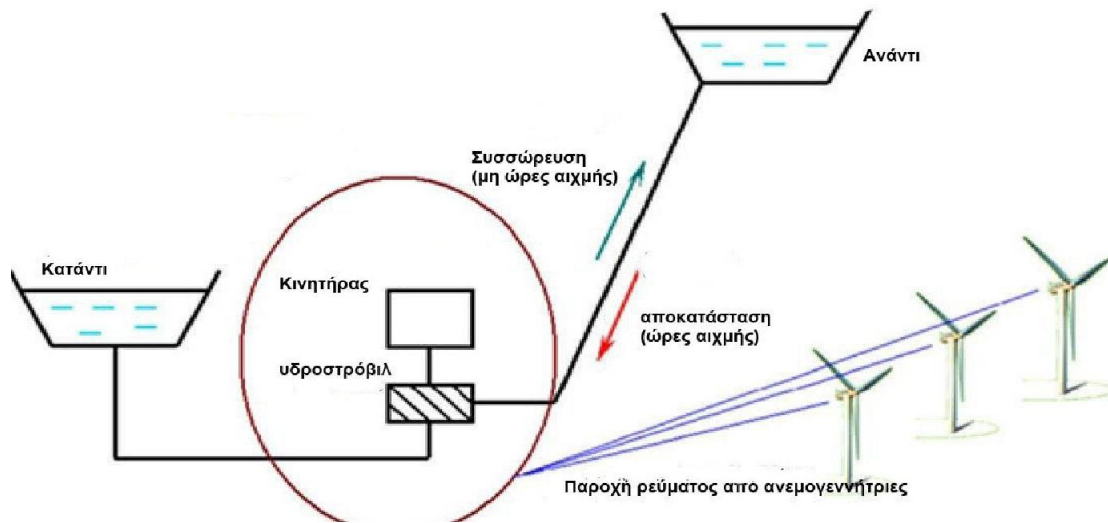
Εικόνα 2: Εγκατεστημένη ανά Ήπειρο ισχύς (MW). [5]

Ένα σύστημα αντλιοσταμίου αποτελείται από τα παρακάτω μέρη όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 3:

- Μία αντλία ή ένα σύνολο παράλληλα συνδεδεμένων αντλιών.
- Έναν υδροστροβίλο ή ένα σύνολο παράλληλα συνδεδεμένων υδροστροβίλων.
- Δύο δεξαμενές νερού οι οποίες βρίσκονται σε ικανή υψομετρική διαφορά μεταξύ τους.
- Ένα σύνολο σωληνώσεων για την άντληση του νερού από την κάτω δεξαμενή προς την άνω.
- Ένα σύνολο σωληνώσεων για την προσαγωγή του νερού από την άνω δεξαμενή προς την κάτω μέσω του υδροστροβίλου για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

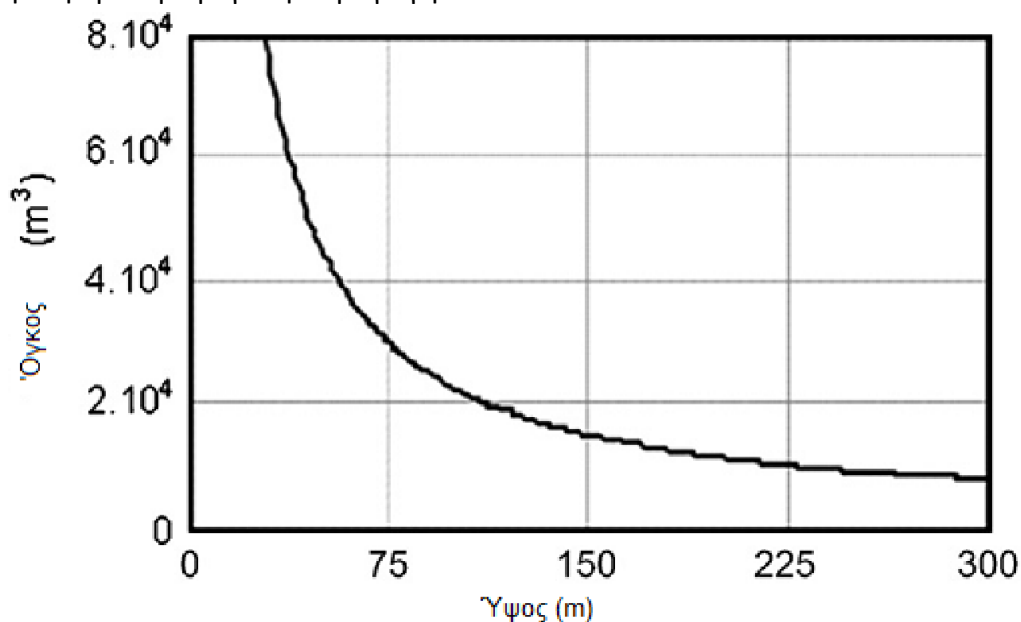
Η φιλοσοφία λειτουργίας του συστήματος αντλιοσταμίου είναι απλή. Η περίσσεια ενέργειας τροφοδοτεί τις αντλίες, μέσω των οποίων το εργαζόμενο μέσο(νερό) ανυψώνεται δια των σωληνώσεων ανόδου από την κάτω δεξαμενή στην άνω, δίνοντάς μας έτσι τη δυνατότητα αποθήκευσης της περίσσειας ενέργειας με τη μορφή δυναμικής ενέργειας. Όταν κάποια άλλη χρονική στιγμή χρειαζόμαστε ενέργεια, το νερό από την πάνω δεξαμενή αφήνεται να οδεύσει μέσω των σωληνώσεων καθόδου προς την κάτω δεξαμενή, το οποίο διερχόμενο μέσω των υδροστροβίλων παράγει την επιθυμητή ενέργεια. Οι διαστασιολογήσεις των δύο δεξαμενών είναι τέτοιες που να εξασφαλίζουν ότι μόνο ένα μικρό ποσοστό από τον όγκο του αποθηκευμένου νερού θα χρησιμοποιηθεί και θα είναι ικανό για τις μετατροπές τις διατιθέμενης ενέργειας σε δυναμική και αντίστροφα, αποκλείοντας το ενδεχόμενο κάποια από τις δύο δεξαμενές να αδειάσει εντελώς. Τα συστήματα αντλιοσταμίου μπορούν να λειτουργήσουν εξαιρετικά, συνδυαζόμενα με

αιολικά πάρκα ή θερμικά συστήματα, αποθηκεύοντας πάντα περίσσεια παραγόμενης ενέργειας ή ενέργειας που δεν μπορεί να απορροφηθεί [5].



Εικόνα 3: Σύστημα Αντλησιοταμίευσης. [5]

Ο διπλός αγωγός πτώσης υπερτερεί έναντι του μονού γιατί παρέχει τη δυνατότητα ταυτόχρονης παραγωγής ενέργειας από τους υδροστροβίλους και κατανάλωσης ενέργειας από τις αντλίες. Η κατάσταση αυτή έχει σαν αποτέλεσμα τη συνεχή κυκλοφορία του νερού στο σύστημα και πλεονεκτεί ιδιαίτερα όταν συμπίπτει υψηλό φορτίο με μεγάλη παραγωγή ΑΠΕ.



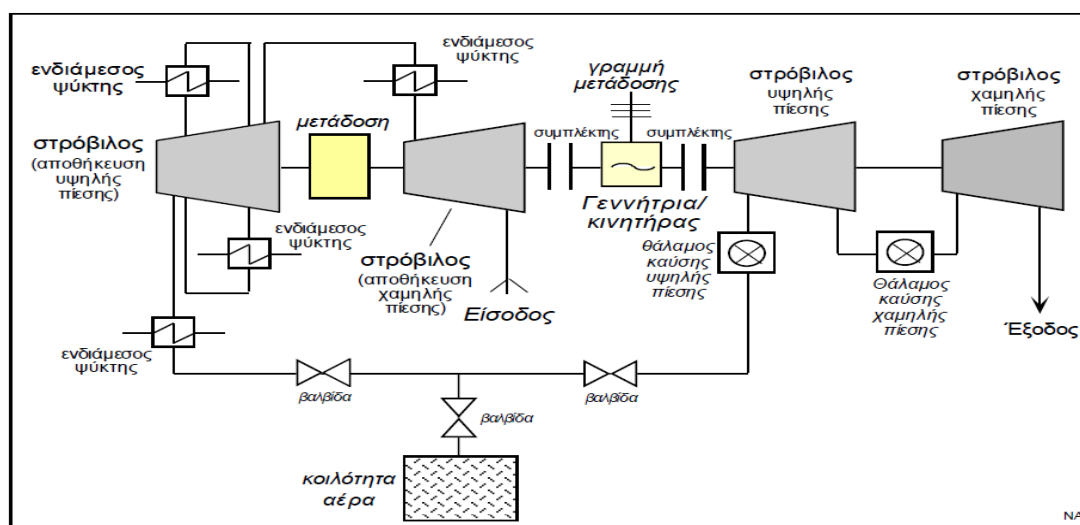
Εικόνα 4: Απαιτούμενος όγκος νερού για αποθήκευση ενέργειας 6kWh. [6]

Τα συστήματα αντλησιοταμίευσης μπορούν να αναλάβουν φορτίο σε λίγα δευτερόλεπτα και το μέγιστο βάθος εκφόρτισης τους είναι έως 95% χωρίς να επηρεάζεται η διάρκεια ζωής της εγκατάστασης. Το βασικότερο πλεονέκτημα της αντλησιοταμίευσης είναι ότι παρέχει εγγυημένη ισχύ, γεγονός που παρέχει δυνατότητα υποκατάστασης της συμβατικής ισχύος (capacity credit), δυνατότητα

που δεν έχουν οι ΑΠΕ λόγω της μεταβλητής φύσης τους. Έτσι, δίνεται η δυνατότητα αύξησης της αιολικής διείσδυσης και της διείσδυσης ΑΠΕ γενικότερα σε νησιωτικά συστήματα, που διαφορετικά περιορίζεται από τα όρια τεχνικού ελαχίστου και δυναμικής απόκρισης. Από την άλλη μεριά, τα σημαντικότερα μειονεκτήματα της αντλησιοταμίευσης είναι οι γεωγραφικοί, γεωλογικοί και περιβαλλοντικοί περιορισμοί που σχετίζονται με τη σχεδίαση των ταμιευτήρων, το υψηλό κόστος επένδυσης και οι μακροί χρόνοι υλοποίησης [6].

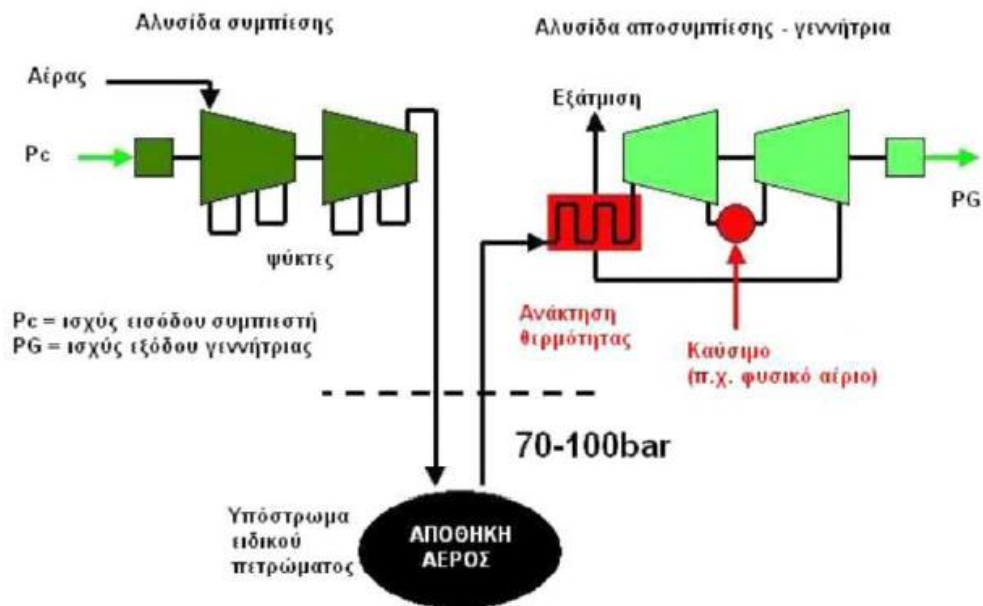
### 2.2.2. Αποθήκευση μέσω συμπιεσμένου αέρα (CAES)

Η τεχνολογία Compressed Air Energy Storage CAES αποτελεί μαζί με την αντλησιοταμίευση την μόνη εμπορικά διαθέσιμη τεχνολογία που έχει δυνατότητα αποθήκευσης πολύ μεγάλων ποσοτήτων ενέργειας. Η βασική ιδέα της μεθόδου είναι ότι αέρας μπορεί να συμπιεστεί στα 800 ως 1600psi σε ειδικές γεωλογικές δομές και αφού αποσυμπιεστεί, μπορεί να παράγει ηλεκτρισμό κινώντας έναν αεριοστρόβιλο. Συμπύεση του αέρα μπορεί να γίνει π.χ. κατά τη διάρκεια κοιλάδων φορτίου και αποσυμπιέσει κατά τη διάρκεια των αιχμών του φορτίου. Λόγω της ειδικής γεωλογικής δομής που απαιτείται υπόστρωμα ορυκτού άλατος, μόνο δύο τέτοιες εγκαταστάσεις υπάρχουν παγκοσμίως, η μία στο McIntosh, Alabama της Η.Π.Α (110MW) και η άλλη στη Γερμανία στο Huntorf (290MW) [3].



Εικόνα 5: Σχηματικό διάγραμμα της μονάδας αποθήκευσης αέρα με συμπιεσμένο αέρα στο Huntorf της Γερμανίας. [3]

Η αρχή λειτουργίας του συστήματος παρουσιάζεται σε γενικές γραμμές στην παρακάτω εικόνα. Πρόσφατη είναι και η προσπάθεια μείωσης της απαιτούμενης ισχύος και της πιο ευέλικτης εφαρμογής τέτοιων διατάξεων με τη μορφή Transportable-CAES ή micro-CAES για την εκμετάλλευση αιολικής παραγωγής, ενώ νέες εγκαταστάσεις αυτής της μορφής εγκαθίστανται στις Η.Π.Α [8].



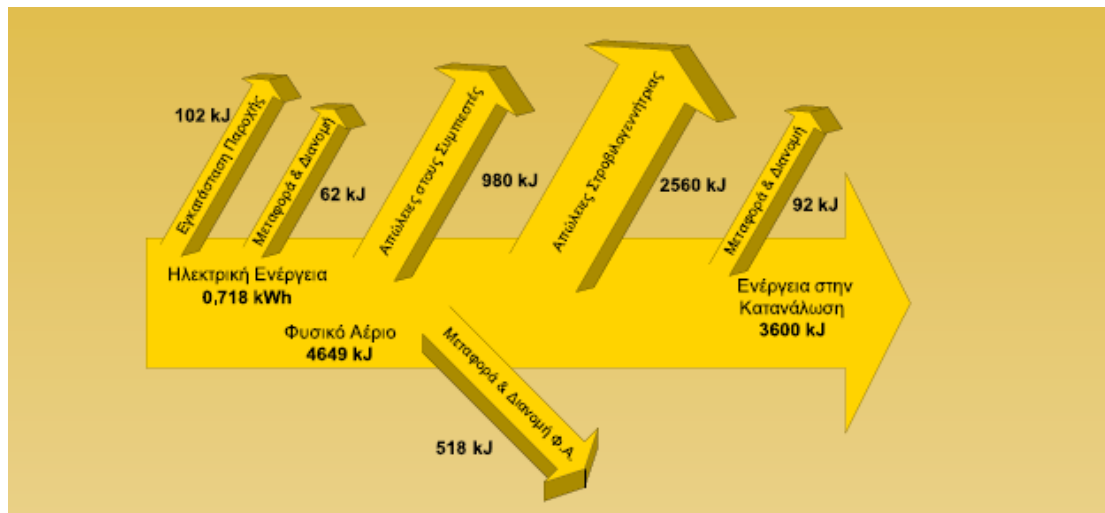
Εικόνα 6: Αρχή λειτουργίας μονάδας αποθήκευσης αέρα με συμπιεσμένο αέρα. [8]

Η αποθήκευση ενέργειας με συμπιεσμένο αέρα (Compressed Air Energy Storage, CAES) αποτελεί μια εμπορική, γενικής χρήσης τεχνολογία, κατάλληλη να παρέχει μακροπρόθεσμη αποθήκευση μεγάλων ποσοτήτων ενέργειας. Η ηλεκτρική ενέργεια αποθηκεύεται υπό μορφή συμπιεσμένου αέρα σε κατάλληλες δεξαμενές-αποθήκες. Στα συστήματα CAES, η ηλεκτρική ενέργεια παράγεται οδηγώντας σε αεριοστρόβιλους τα παράγωγα της καύσης του συμπιεσμένου αέρα που ανακτούμε από πηγές στο υπέδαφος, με μικρή ποσότητα φυσικού αερίου.

Η τεχνολογία αυτή βρίσκει εφαρμογή στην υποστήριξη φορτίου, με τις μονάδες CAES να είναι της τάξης των εκατοντάδων έως χιλιάδων MW, σε αντίθεση με τα συστήματα flywheels και υπέρ-πυκνωτών που λόγω της μικρής διάρκειας αποθήκευσης περιορίζονται σε εφαρμογές σταθεροποίησης τάσης κυρίως.

Βασικός σκοπός των συστημάτων CAES είναι να αξιοποιούν λίγη χαμηλού κόστους, εκτός αιχμής ηλεκτρική ενέργεια από τις μονάδες βάσης, για την παραγωγή και συμπίεση του αέρα, τον οποίο και θα αποθηκεύουν στη συνέχεια τη νύχτα μέσα σε ειδικές υπόγειες υπόγειες δεξαμενές.

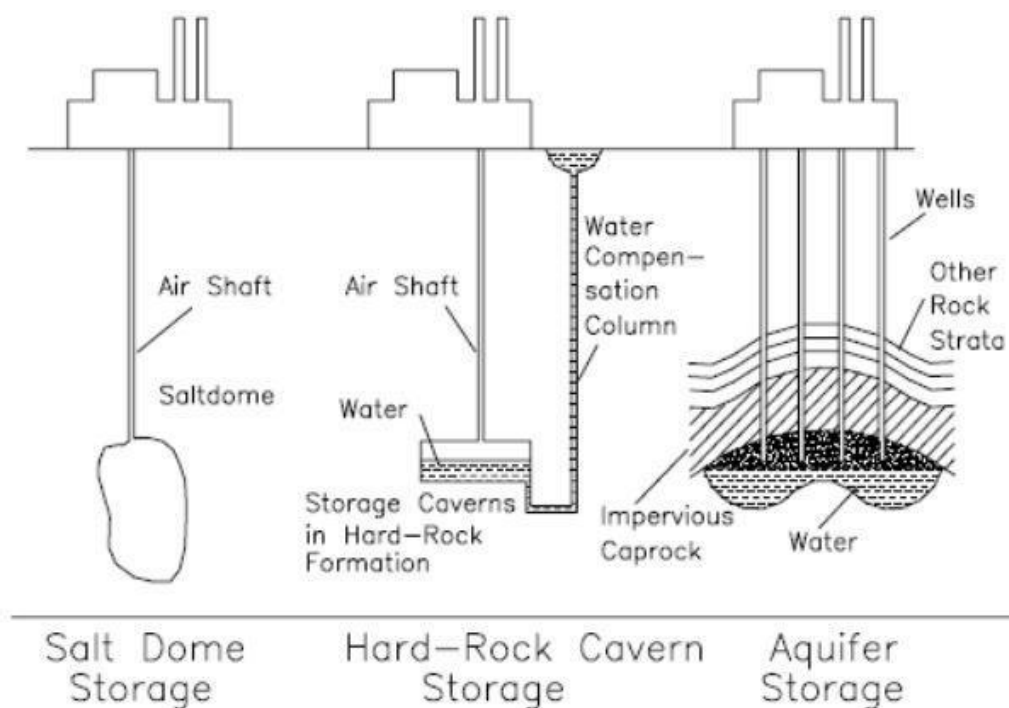
Κατά τη διάρκεια της ημέρας και όταν οι απαιτήσεις σε ενέργεια αυξηθούν, η μονάδα θα αντλεί τον συμπιεσμένο αέρα από τη δεξαμενή και αφού τον αναμίξει με φυσικό αέριο θα τροφοδοτεί τους αεριοστρόβιλους με τα παράγωγα της καύσης [7,9].



Εικόνα 7: Ροή ισχύος στα συστήματα CAES. [7]

Οι γεωλογικές τοποθεσίες που μπορούν να χρησιμοποιηθούν σαν αποθήκες συμπιεσμένο αέρα στα συστήματα CAES παρουσιάζονται στην παρακάτω εικόνα και είναι οι εξής κατηγορίες [10]:

- α) κοιλάτητες άλατος
- β) εδάφη πορώδων βράχων
- γ) εδάφη σκληρών βράχων



Εικόνα 8: Αποθήκες συμπιεσμένου αέρα. [10]

Μια μονάδα αποθήκευσης ενέργειας με συμπιεσμένο αέρα λειτουργεί σχεδόν με τον ίδιο τρόπο όπως και μια μονάδα με αεριοστρόβιλους μόνο που οι φάσεις συμπίεσης και εκτόνωσης συμβαίνουν ανεξάρτητα και σε διαφορετικές χρονικές στιγμές. Σε αντίθεση με τους συμβατικούς αεριοστρόβιλους που χρησιμοποιούν τα



δυο τρίτα της παραγόμενης ισχύς για την κίνηση του συμπιεστή, στις μονάδες CAES όλη η παραγόμενη ισχύς διατίθεται για παραγωγή ηλεκτρισμού.

Κατά τη λειτουργία συμπίεσης του αέρα (φάση αποθήκευσης), χρησιμοποιείται ηλεκτρική ενέργεια (Pc) για να κινήσει μια σειρά συμπιεστών οι οποίοι εγχέουν αέρα σε μια υπόγεια δεξαμενή αποθήκευσης. Κατά τη φάση της συμπίεσης, ειδικοί ψύκτες ελαττώνουν την θερμοκρασία του εγχεόμενου αέρα με αποτέλεσμα να αυξάνουν την απόδοση της συμπίεσης, μειώνοντας τον απαιτούμενο όγκο της δεξαμενής αποθήκευσης. Κατά τη λειτουργία εκτόνωσης (παραγωγή ενέργειας) τα παραγόμενα αέρια της καύσης του συμπιεσμένου αέρα με φυσικό αέριο, οδηγούνται στους αεριοστρόβιλους (συνήθως δυο βαθμίδων) για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Η χρησιμοποίηση φυσικού αερίου κατά τη φάση της εκτόνωσης γίνεται για αύξηση της απόδοσης των στρόβιλων. Η εκτόνωση του αέρα από τη δεξαμενή αποθήκευσης απευθείας στο στρόβιλο χωρίς καύση, θα απαιτούσε περισσότερη ροή αέρα για την παραγωγή της ίδιας ποσότητας ενέργειας.

Ως μέσα αποθήκευσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν διάφοροι γεωλογικοί σχηματισμοί όπως πετρώδη σπήλαια, σπήλαια άλατος (salt caverns), εξαντλημένα κοιτάσματα αερίων και αλατούχοι υδροφόροι ορίζοντες, με τους τελευταίους να αποτελούν την πιο οικονομική και συνηθισμένη λύση.

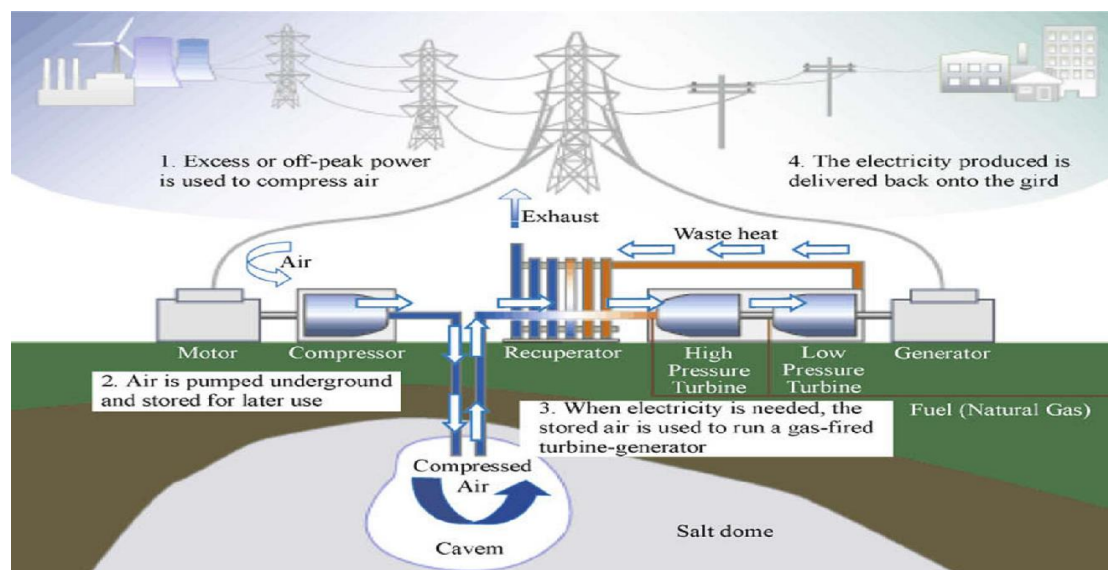
Το διάγραμμα ενός συστήματος CAES παρουσιάζεται στην Εικόνα 9 και όπως φαίνεται περιλαμβάνει τα εξής στοιχεία:

- Έναν κινητήρα σε σύμπλεξη με τον συμπιεστή και μία γεννήτρια συνδεδεμένη με τους αεριοστρόβιλους υψηλής και χαμηλής πίεσης.
- Έναν συμπιεστή που ίσως περιλαμβάνει δύο ή περισσότερα στάδια, ενδιάμεσους ψύκτες (intercoolers) και συμπληρωματικούς ψυκτήρες (after-coolers), ώστε να επιτυγχάνεται οικονομία στην συμπίεση και να μειώνεται το ποσοστό υγρασίας.
- Έναν προθερμαντήρα, έναν αεριοστρόβιλο υψηλής και έναν χαμηλής πίεσης.
- Εξοπλισμό για τον έλεγχο των στοιχείων του συστήματος καθώς και για τη μετάβαση από λειτουργία παραγωγής σε λειτουργία αποθήκευσης.
- Σύστημα αποθήκευσης του καυσίμου και διάφοροι εναλλάκτες θερμότητας.

Ο κύριος περιοριστικός παράγοντας αυτής της τεχνολογίας είναι ότι μπορεί να χρησιμοποιηθεί μόνο σε εφαρμογές μεγάλης κλίμακας, ενώ επιπλέον απαραίτητη προϋπόθεση είναι η ύπαρξη εγκατάστασης αεριοστρόβιλου. Σημαντικό μειονέκτημα συνιστούν και οι διάφοροι γεωλογικοί περιορισμοί. Από την άλλη μεριά, οι τυπικές τιμές ονομαστικής ισχύος των συστημάτων CAES κυμαίνονται μεταξύ 50 –300 MW, ενώ επιπλέον υπάρχει η δυνατότητα μακράς αποθήκευσης, ίσως και πάνω από ένα έτος, λόγω των χαμηλών απωλειών. Επιπλέον πλεονέκτημα συνιστά ο γρήγορος χρόνος απόκρισης, δεδομένου ότι σε κανονικές συνθήκες λειτουργίας ένα σύστημα CAES μπορεί να αναλάβει φορτίο μέσα σε 12 λεπτά, τη στιγμή που ο ίδιος χρόνος για συμβατικό αεριοστρόβιλο κυμαίνεται μεταξύ 20 –30 λεπτών [25, 3]. Μη λαμβάνοντας υπόψη το ρόλο του αερίου και με βάση μόνο την απόδοση της εκτόνωσης και της συμπίεσης, ο ολικός ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης,



που μπορεί ευθέως να συγκριθεί με τις άλλες τεχνολογίες αποθήκευσης, είναι περίπου 70% .



Εικόνα 9: Σχηματικό διάγραμμα ενός συστήματος αποθήκευσης CAES. [10]

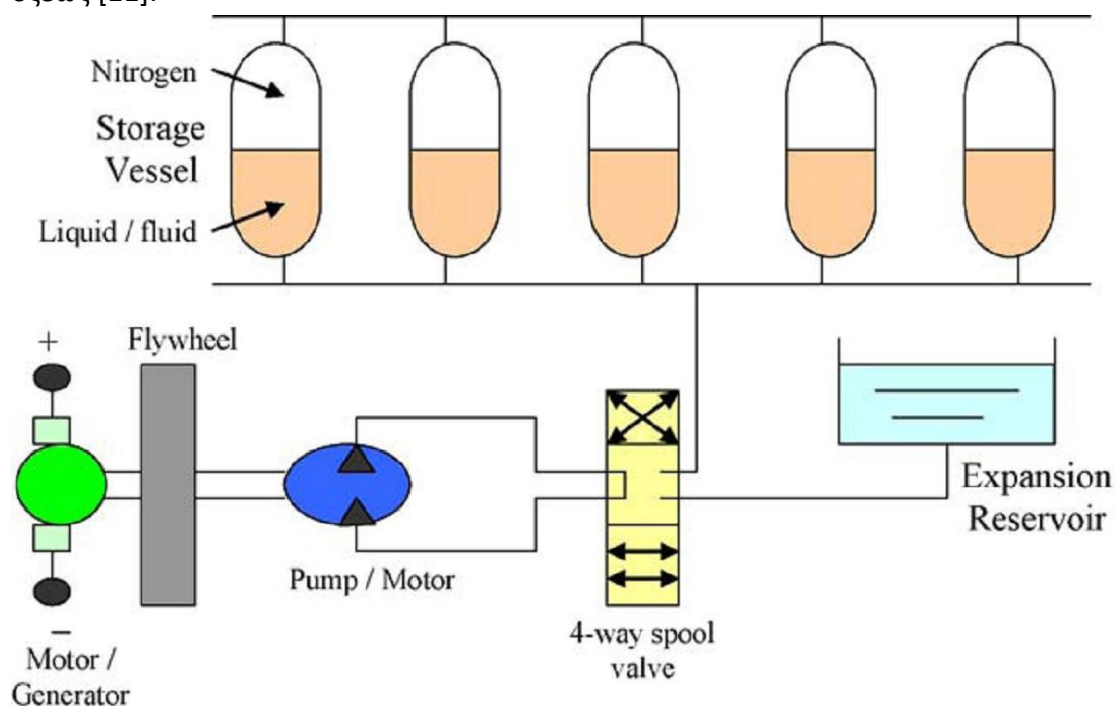
Η τεχνολογία CAES δεν είναι «πράσινη», αφού κατά τη διάρκεια ενός κύκλου φόρτισης-εκφόρτισης 1 kWh παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας απαιτεί περίπου 0,75 kWh ενέργειας συμπίεσης και 1,25 kWh καυσίμου. Αυτή η απαιτούμενη ποσότητα καυσίμου αποτελεί το κυριότερο θέμα αντιπαράθεσης σχετικά με την ανεπιθύλακτη αποδοχή τέτοιων συστημάτων. Το κόστος των συστημάτων CAES εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τη γεωλογία του υπεδάφους και τυπικά κυμαίνεται μεταξύ \$400 - \$800/kW.

Πρέπει να σημειωθεί ότι βρίσκεται υπό ανάπτυξη και η τεχνολογία CAES μικρής κλίμακας (small scale CAES), στην οποία ο πεπιεσμένος αέρας αποθηκεύεται σε ειδικές δεξαμενές, αλλά το σημερινό της κόστος την καθιστά μη βιώσιμη[10].

### 2.2.3. Τεχνολογία Liquid-Piston

Η βασική αρχή λειτουργίας αυτής της τεχνολογίας είναι η συμπίεση και η εκτόνωση ενός παγιδευμένου όγκου αερίου, το οποίο συνήθως είναι άζωτο, στο εσωτερικό μιας δεξαμενής. Ο έλεγχος του όγκου και της πίεσής του αερίου γίνεται από την ποσότητα του υγρού μέσα στη δεξαμενή, με την πίεση να κυμαίνεται γενικά από 100 bar όταν δεν υπάρχει καθόλου υγρό, μέχρι 250 bar όταν η δεξαμενή είναι κατά το ήμισυ γεμάτη με υγρό. Η διάταξη του συστήματος παρουσιάζεται στο Σχ. 2.7. Όταν αποθηκεύεται ενέργεια, η αντλία ωθεί το υγρό προς το εσωτερικό των δεξαμενών με αποτέλεσμα να συμπιέζει το αέριο. Κατά τη φάση της εκφόρτισης, το πεπιεσμένο αέριο εκτονώνεται ωθώντας το υγρό έξω από τις δεξαμενές και προς τις αντλίες, που τώρα λειτουργούν ως στρόβιλοι περιστρέφοντας τις γεννήτριες. Η τεχνολογία δεν έχει καταστεί ακόμα εμπορικά διαθέσιμη, ωστόσο ελπίζεται ότι μελλοντικά θα μπορέσει να αντικαταστήσει τις μπαταρίες μολύβδου οξέως σε

αυτόνομα υβριδικά συστήματα τροφοδότησης ειδικών φορτίων, όπως εργαστήρια, μονάδες επεξεργασίας τροφής και παραγωγής γάλακτος, καθώς και εγκαταστάσεις UPS. Τα βασικά πλεονεκτήματα της τεχνολογίας liquid-piston έναντι των μπαταριών μολύβδου οξέως είναι η μεγαλύτερη διάρκεια ζωής που δεν εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά φόρτισης-εκφόρτισης, η λιγότερη συντήρηση, η μη υποβάθμιση της χωρητικότητας με τον καιρό, η δυνατότητα πλήρους εκφόρτισης, ο χειρισμός των υπερφορτίσεων με τη βοήθεια βαλβίδας στο υδραυλικό σύστημα, η ανεξαρτησία της ικανότητας ισχύος από τη χωρητικότητα και οι χαμηλοί ρυθμοί αυτοεκφόρτισης σε κατάσταση ανοιχτού κυκλώματος. Αντίθετα, σημαντικά μειονεκτήματα αποτελούν οι πολύ χαμηλές τιμές ειδικής ενέργειας (3,2–5,55 Wh/kg) που εξαρτάται από την πίεση του αερίου, η έντονη αυτοεκφόρτιση σε standby κατάσταση, ο κίνδυνος διαρροών στο πνευματικό και υδραυλικό σύστημα και η ελαφρά χαμηλότερη απόδοση (περίπου 73%) σχετικά με τις μπαταρίες μολύβδου οξέως [11].



Εικόνα 10 : Η βασική διάταξη ενός συστήματος αποθήκευσης liquid-piston. [11]

## 2.3. Αποθήκευση ηλεκτρισμού με κινητική ενέργεια

### 2.3.1. Σφόνδυλοι

Οι στρεφόμενες μάζες ή σφόνδυλοι (flywheels), αναμένεται να έχουν εφαρμογές παροχής ισχύος και ενέργειας για μικρά χρονικά διαστήματα και κυρίως για την παροχή εφεδρείας και όχι τόσο για την παροχή ενέργειας. Η ενέργεια που αποθηκεύεται με την περιστροφή μίας στρεφόμενης μάζας σε υψηλή ταχύτητα, μπορεί να μετατραπεί ξανά σε ηλεκτρική ενέργεια με τη σύνδεση της μάζας σε μια γεννήτρια. Η κινητική ενέργεια μιας μάζας που περιστρέφεται είναι ανάλογη της ροπής αδράνειας και του τετραγώνου της γωνιακής ταχύτητάς του:

$$E_k = \frac{1}{2} I \omega^2$$

όπου:  $E_k$ = κινητική ενέργεια,  $I$ = ροπή αδράνειας μάζας στροφέα και  $\omega$ =γωνιακή ταχύτητα του στροφέα [12].

Τα τελευταία χρόνια, στο σχεδιασμό των στρεφόμενων μαζών η έμφαση έχει μετατοπιστεί από το σχεδιασμό της γεωμετρίας της μάζας στην προσπάθεια να επιτευχθούν υψηλές περιστροφικές ταχύτητες. Ταχύτητες μέχρι 40.000 rpm έχουν ήδη επιτευχθεί, ενώ μέχρι 60.000 rpm προβλέπονται για τις μελλοντικές γενιές. Ο χρόνος εκφόρτισης αυτών των διατάξεων κυμαίνεται μεταξύ λίγων sec και μέχρι 15-30 min, βοηθώντας, περισσότερο από τις μπαταρίες, σε εφαρμογές ισχύος παρά ενέργειας. Αντίθετα από τις μπαταρίες, τα συστήματα στρεφόμενων μαζών δεν είναι ευαίσθητα στη θερμοκρασία και η απόδοσή τους μπορεί να φτάσει ως και 80-90% χωρίς ιδιαίτερη πτώση της με το χρόνο ζωής τους, ο οποίος φτάνει τα 15-20 χρόνια (για χρήση σε υψηλές ταχύτητες). Πλεονεκτούν στο ότι απαιτούν μικρό κόστος συντήρησης και εγκατάστασης [13].

## 2.4. Αποθήκευση ηλεκτρισμού με χημική ενέργεια

### 2.4.1. Συσσωρευτές

Τα συστήματα αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας με μπαταρίες (Battery Energy Storage Systems, BESS) έχουν πρόσφατα αναδυθεί σαν μια από τις πιο υποσχόμενες μεσοπρόθεσμες τεχνολογίες αποθήκευσης ενέργειας για ένα μεγάλο εύρος εφαρμογών όπως σταθεροποίηση τάσης, βελτίωση ποιότητας ισχύος μικρής και μεγάλης διάρκειας, παροχή στρεφόμενης εφεδρείας, και ρύθμιση συχνότητας. Το πλεονέκτημά τους έναντι των άλλων μεθόδων αποθήκευσης είναι ότι προσφέρουν φορητότητα και μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε περιπτώσεις όπου η χρήση άλλων μεθόδων αποθήκευσης είναι τεχνικά αδύνατη. Η ενσωμάτωση επίσης ελεγκτών ροής ισχύος στην αποθήκευση ενέργειας με μπαταρίες μπορεί να βελτιώσει τον έλεγχο και την λειτουργία του εκάστοτε συστήματος ισχύος.

Για το ένα τρίτο του πληθυσμού της γης που ακόμη δεν είναι συνδεδεμένο με ένα δίκτυο παροχής ηλεκτρικής ενέργειας, η μπαταρία παραμένει ο βασικός φορέας ενεργειακής αποθήκευσης. Οι μπαταρίες είναι μια από τις πιο οικονομικές, διαθέσιμες, αποδοτικές και ώριμες τεχνολογίες αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας, μιας και είναι η γηραιότερη όλων τους. Βασίζονται στην αποθήκευση της ενέργειας με ηλεκτροχημικό τρόπο. Ένα σύστημα με μπαταρίες αποτελείται από ένα σετ χαμηλής τάσης-ισχύος κυττάρων (μπαταρίες) τα οποία συνδέονται σε σειρά ή παράλληλα για να πετύχουν τα επιθυμητά ηλεκτρικά χαρακτηριστικά. Οι μπαταρίες "φορτίζονται" όταν υφίστανται μια εξωτερική χημική αντίδραση υπό την επίδραση μιας διαφοράς δυναμικού στους ακροδέκτες τους. Αυτές αποδίδουν πίσω την αποθηκευμένη ενέργεια, ή αλλιώς εκφορτίζονται, όταν αντιστραφεί η χημική αυτή αντίδραση. Επειδή οι μπαταρίες διατηρούν μια DC διαφορά δυναμικού στα άκρα

τους, είναι αναγκαία η μετατροπή της σε AC, προκειμένου να επιτευχθεί η επικοινωνία με το σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας.

Υπάρχει ένας μεγάλος αριθμός τεχνολογιών κατασκευής μπαταριών για αποθήκευση ενέργειας σε μεγάλη κλίμακα. Μειονέκτημα της αποθήκευσης με μπαταρίες είναι ότι δεν μπορούν να λειτουργούν από μόνες τους σε υψηλά επίπεδα ισχύος για μεγάλες χρονικές περιόδους. Επιπλέον, μια γρήγορη και βαθιά εκφόρτισή τους μπορεί να οδηγήσει σε καταστροφή και αντικατάσταση της μπαταρίας, λόγω της ελάττωσης της διάρκειας ζωής της από την μεγάλη θερμοκρασία που αναπτύσσεται από τον τρόπο αυτό λειτουργίας. Υπάρχουν από την άλλη και διάφοροι περιβαλλοντολογικοί παράγοντες που περιορίζουν την χρήση των μπαταριών για αποθήκευση ενέργειας λόγω των τοξικών αερίων που παράγονται κατά την φόρτιση-εκφόρτιση από τη μια και λόγω του προβλήματος διάθεσης τους από την άλλη, όταν αυτές αχρηστεύονται. Η πρόοδος στην τεχνολογία των μπαταριών αφορά στην επίτευξη μεγαλύτερης πυκνότητας ενέργειας, μεγαλύτερης αξιοπιστίας, μεγαλύτερης διάρκειας ζωής και μικρότερου κόστους [14, 3].

#### **2.4.2. Το υδρογόνο ως δευτερογενές καύσιμο**

Σκοπός των συστημάτων αποθήκευσης με υδρογόνο είναι η αξιοποίηση της εκτός αιχμής παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας για την παραγωγή υδρογόνου με ηλεκτρόλυση του νερού. Το υδρογόνο στη συνέχεια αποθηκεύεται σε υγρή ή αέρια μορφή, για να χρησιμοποιηθεί αργότερα ως καύσιμο από τις κυψέλες υδρογόνου. Τα συστήματα αυτά έχουν ως στόχο να συνδυαστούν με αιολικά πάρκα για την αποθήκευση ενέργειας σε περιόδους εκτός αιχμής. Τα συστήματα αυτά μειονεκτούν στη μικρή απόδοσή τους (περίπου 35-40%) και στο ότι δεν έχουν δοκιμαστεί σε εφαρμογές της τάξης των MW (όπως δηλαδή τα συστήματα PHS και CAES). Η αποθήκευση του υδρογόνου αποτελεσματικά και ακίνδυνα αποτελεί ακόμη αντικείμενο έρευνας. Το υδρογόνο μπορεί να αποθηκευτεί σαν αέριο, σαν υγρό αν ψυχθεί με κρυοστατικό τρόπο σε θερμοκρασία μικρότερη των 20°K ή, θεωρητικά, σαν στερεό σε θερμοκρασία κάτω των 4.2°K. Μπορεί επίσης να αποθηκευτεί σε συνδυασμό με άλλα υλικά ως υδρίδιο (ένωση υδρογόνου), σαν υδρογονάνθρακας από τον οποίο μπορεί να παρασκευαστεί, σαν μια άλλη χημική ουσία πλούσια σε υδρογόνο όπως η αμμωνία, ως αέριο που έχει προσροφηθεί πάνω σε ένα στερεό υλικό ή μέσα στα διάκενα ενός υλικού με μικροπόρους. Στο παρακάτω σχήμα βλέπουμε μια δοκιμαστική μονάδα ηλεκτρόλυσης, για την αποθήκευση υδρογόνου κατά τις περιόδους εκτός αιχμής και τη χρησιμοποίησή της για τον ανεφοδιασμό των οχημάτων υδρογόνου του αιολικού πάρκου του Palm Springs της Καλιφόρνιας [3,14].

#### **2.4.2.1. Το υδρογόνο σε υγρή μορφή**

Η υγρή αποθήκευση ως κρυσταλλίνες υγρές θα επέφερε υψηλές ενεργειακές πυκνότητες αλλά η διαδικασία ρευστοποίησης και το επόμενο στάδιο της επαναφοράς σε υγρή μορφή πριν από τη χρήση θα πρόσθεταν δαπάνες και θα περιλάμβαναν ενεργειακές απώλειες μέχρι και 30%. Παρόλα αυτά πρωτότυπα οχήματα-δεξαμενές υπάρχουν ήδη, ενώ μεγάλες επιχειρήσεις στο χώρο του αυτοκινήτου συνεργάζονται για να εξετάσουν το πρόβλημα του υγρού υδρογόνου. Ειδικές έρευνες στοχεύουν στο να μειώσουν το βάρος των κρυσταλλικών δεξαμενών στο ένα τρίτο και τα μέχρι τώρα ποσοστά εξάτμισης στο μισό [3,14].

#### **2.4.2.2. Το υδρογόνο σε αέρια μορφή**

Τελευταία επίσης, το ενδιαφέρον εστιάζεται στην αποθήκευση υδρογόνου με την κανονική (σε κανονικές συνθήκες) αερίωδη μορφή του, διατηρώντας το υπό πίεση μέσα στις δεξαμενές. Ένα γραμμάριο υδρογόνου καταλαμβάνει όγκο 11 λίτρων κανονικά και τόσες ατμόσφαιρες πίεσης πρέπει να χρησιμοποιηθούν ώστε να επιτευχθεί μία χρήσιμη πυκνότητα ενέργειας. Μέχρι τώρα έχουν χρησιμοποιηθεί πιέσεις μέχρι 5000psi (350 ατμόσφαιρες ή bar) και πρόσφατα οι αυτοκίνητες δεξαμενές 10000psi (700bar) έχουν πετύχει την πιστοποίηση. Λαμβάνοντας υπόψη το ζήτημα της ασφάλειας, οι δεξαμενές πρέπει να περάσουν μια αυστηρή σειρά από εκρήξεις, δοκιμές πίεσης, θερμοκρασίας, διάβρωσης κ.α. Αρκετοί είναι εκείνοι που θεωρούν την αποθήκευση υδριδίων μετάλλων πιο ελπιδοφόρα από τη ρευστοποίηση ή από τη διατήρηση του υδρογόνου υπό πίεση. Τα υδρίδια παράγονται με την επαφή του αερίου υδρογόνου με το μέταλλο και στη συνέχεια με συμπίεση του αερίου, σε τιμές πίεσης όπου το υδρογόνο συμπυκνώνεται στην στερεά του μορφή, διαμορφώνοντας ένα γνωστό υδρίδιο με το μέταλλο. Κατά τη διάρκεια αυτής της διαδικασίας 'φόρτισης' απελευθερώνεται θερμότητα και στη συνέχεια απαιτείται θερμότητα για την εξαγωγή υδρογόνου από το υδρίδιο. Οι υψηλότερες χωρητικότητες προσφέρονται από μέταλλα που διαμορφώνουν υδρίδια στις υψηλές θερμοκρασίες (250 - 350°C), αλλά παρόμοιες θερμοκρασίες απαιτούνται για να ελευθερώσουν ξανά το υδρογόνο όταν χρειαστεί. Αυτό καθιστά το σύστημα ακατάλληλο για πολλές εφαρμογές, συμπεριλαμβανομένου και του αυτοκινήτου. Γι' αυτό οι ερευνητές επιδιώκουν τη χρήση κραμάτων και άλλων υλικών που προσφέρουν αυξημένα ποσοστά απορρόφησης - απελευθέρωσης σε κανονικότερες θερμοκρασίες και πιέσεις. Άλλα επιθυμητά χαρακτηριστικά των υλικών είναι η δυνατότητα να ανακυκλώνονται πολλές φορές χωρίς υποβάθμιση, να απορροφούν μόνο το υδρογόνο χωρίς σχετικές ακαθαρσίες και να είναι ελέγχιμα τα ποσοστά απορρόφησης και απελευθέρωσης.

Ορισμένα υδρίδια, όπως αυτά που διαμορφώνονται με σίδηρο - τιτάνιο και λανθάνιο-κράματα νικελίου, προσφέρουν υψηλή ογκομετρική αποδοτικότητα αποθήκευσης αλλά είναι βαριά. Υδρίδια του μαγνησίου, μαγνήσιο - νικέλιο και μαγνήσιο - κράματα τιτανίου είναι πολύ ελαφρύτερα. Πολλά υποσχόμενα είναι η



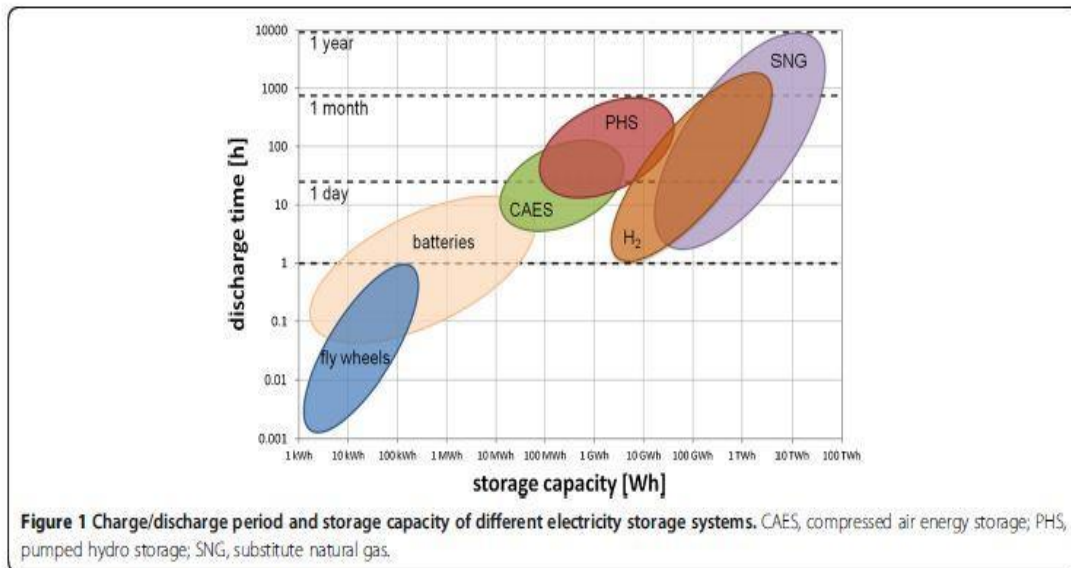
προσρόφηση αερίου υδρογόνου από στερεό άνθρακα, ένα υλικό που έχει μια πολύ λεπτή ιδιαίτερα πορώδη δομή στην οποία οι μυριάδες των μορίων υδρογόνου μπορούν να 'αποθηκευτούν'. Αν και ικανά να συναγωνιστούν την πυκνότητα αποθήκευσης του υγρού υδρογόνου, τα ενεργοποιημένα συστήματα άνθρακα που ερευνήθηκαν ως τώρα χρειάστηκαν πολύ χαμηλές θερμοκρασίες (υγρού αζώτου) για την αποθήκευση και τη διατήρηση[3,14].

## **2.5. Αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας με υπερ-πυκνωτές και υπεραγωγία πηνία**

Οι μονάδες υπέρ-πυκνωτών έχουν χωρητικότητα ισχύος και ενέργειας χιλιάδες φορές μεγαλύτερη από αυτή των συμβατικών πυκνωτών και είναι ικανοί να παρέχουν ισχύ της τάξης των 100kW, ενώ η ενέργειά τους είναι δυνατό να διοχετευτεί από κλάσματα του δευτερολέπτου έως και ένα λεπτό. Οι διατάξεις υπεραγωγίων πηνίων, στηρίζουν τη λειτουργία τους στη χρήση της τεχνολογίας των υπεραγωγίων υλικών γι' αυτό και απαιτούν σημαντικές ποσότητες ψύξης. Αυτές οι διατάξεις μπορούν να διαθέσουν έως και 2MW μέσα σε λίγους κύκλους του εναλλασσόμενου ρεύματος. Και οι δύο τύπου διατάξεις, και ειδικά αυτές των υπεραγωγίων πηνίων, αποτελούν μια αποτελεσματική λύση σε παροχή ποιότητας ισχύος στα δίκτυα διανομής. Μάλιστα, υπάρχουν εταιρίες στις Η.Π.Α. οι οποίες διαθέτουν τέτοιου είδους μεταφερόμενες μονάδες σε containers για την εφαρμογή τους σε διάφορες περιοχές του δικτύου. Τα χαρακτηριστικά της διάταξης των υπεραγωγίων πηνίων είναι τέτοια ώστε να εμφανίζουν σχεδόν μηδενική αντίσταση στις πολύ χαμηλές θερμοκρασίες και να οδηγούν τον ηλεκτρισμό, σχεδόν χωρίς απώλειες, σε συστήματα ειδικά σχεδιασμένα ώστε να 'εγκλωβίζουν' αποτελεσματικά την ηλεκτρική ενέργεια μέσα σε ένα μαγνητικό πεδίο. Πρόσφατες παρουσιάσεις εφαρμογών διανομής ενέργειας στις Η.Π.Α και στην Ευρώπη δείχνουν ότι και τα υπεραγωγία πηνία θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν για να συμπληρώσουν τις ανανεώσιμες πηγές, ειδικά όπου υπάρχει ήδη κατάλληλη υποδομή ψύξης. Τα πρώιμα υπεραγωγία υλικά για να αποδώσουν χρειάζονται κρυογόνο ψύξη η οποία έχει μεγάλο κόστος. Τελευταία εμφανίστηκαν υψηλής θερμοκρασίας υπεραγωγοί (High Temperature Superconductors, HTS) οι οποίοι μπορούν να λειτουργήσουν σε θερμοκρασίες σύμφωνες με τη βιομηχανικά τυποποιημένη ψύξη υγρού αζώτου, περισσότερο συμφέρουσα από την κρυογόνο ψύξη. Λόγω αυτού του γεγονότος αρκετές αμερικανικές επιχειρήσεις έχουν καταφέρει να κυκλοφορήσουν στο εμπόριο υπεραγωγία καλώδια και ταινίες[14].

## **2.6. Σύγκριση μεθόδων**

Μια σύγκριση των τεχνολογιών αποθήκευσης που περιγράφηκαν παραπάνω όσον αφορά την χωρητικότητα αποθήκευσης και των χαρακτηριστικών στιγμών φόρτισης/αποφόρτισης φαίνεται στην παρακάτω Εικόνα.



Εικόνα 11: Περίοδοι φόρτισης/αποφόρτισης διάφορων συστημάτων αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας. [15]

Κρίσιμη απαίτηση για τις τεχνολογίες αποθήκευσης κατά την αποθήκευση ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές είναι η αντιμετώπιση των αυξημένων απαιτήσεων στην ικανότητα αποθήκευσης ανάλογα με τις περιόδους φόρτισης/αποφόρτισης. Μόνο οι χημικά δευτερογενείς φορείς ενέργειας όπως το υδρογόνο και καύσιμα που έχουν ως βάση τους τον άνθρακα (SNG) καλύπτουν αυτή την απαίτηση. Οι τεχνολογίες αποθήκευσης όπως μαγνητικά βολάν και μπαταρίες, από την άλλη είναι αυστηρά περιορισμένοι ως προς την χωρητικότητα και την περίοδο φόρτισης. Επιπλέον αυτές οι τεχνολογίες χρησιμοποιούνται μόνο για την αντιστάθμιση των βραχυπρόθεσμων διακυμάνσεων παρέχοντας ηλεκτρική ενέργεια για ορισμένη περίοδο μερικών λεπτών ή ωρών [15].

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] American Physical Society (APS). (2007). Challenges of Electricity Storage Technologies. Accessed December 2009.
- [2] Electric Power Research Institute/Department of Energy (EPRI/DOE). (2003). Handbook of Energy Storage for Transmission and Distribution Applications. Palo Alto, CA: 2003. 1001834.
- [3] Ibrahima, H.; Ilincaa, A.; Perron, J. (2008). “Energy storage systems—characteristics and comparisons.” Renewable and Sustainable Energy Reviews 12 (2008) 1221–1250.
- [4] J.P. Deane, B.P. O Gallachoir, E.J. McKeogh, “Techno-Economic Review of Existing and New Pumped Hydro Energy Storage Plant”, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 14, 1293–1302, 2010.
- [5] Humberto Andres Rivas Guzman, “Value of Pumped-Storage Hydro for Wind Power Integration in the British Columbia Hydroelectric System”, MScE Thesis, University of British Columbia, June 2010.
- [6] Christine Schoppe, “Wind and Pumped-Hydro Storage: Determining Optimal Commitment Policies with Knowledge Gradient Non-Parametric Estimation”, Princeton University, June 2010.
- [7] Alfred Cavallo «Controllable and affordable utility-scale electricity from intermittent wind resources and compressed air energy storage (CAES)», 2005.
- [8] Τάσσιου Ι., «Ο ρόλος των αποθηκευτικών διατάξεων σε συστήματα με Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας».
- [9] Chiruvolu M., Nakhamkin M., “Available Compressed Air Energy Storage (CAES) Plant Concepts”.
- [10] Efthimiou V., Hadjipaschalis I., Poullikkas A., “Overview of current and future energy storage technologies for electric power applications”, 2008
- [11] ΜΙΧΑΗΛ Α. ΤΣΑΚΑΝΙΚΑΣ, «Μελέτη Συσσωρευτών Τύπου AGM».
- [12] Bitterly, J. (1997). “Flywheel technology past, present, and 21st Century projections”. Energy Conversion Engineering Conference, Proceedings of the 32nd Intersociety, 4, pp. 23122315.
- [13] Post, F.R, “A High-Efficiency Electromechanical battery”, Proceedings of the IEEE, vol 81 NO. 4, March 1993



[14] D. Rastler. "Electricity Energy Storage Technology OptionsA White Paper Primer on Applications, Costs and Benefit". Electric Power Research Institute 2009.

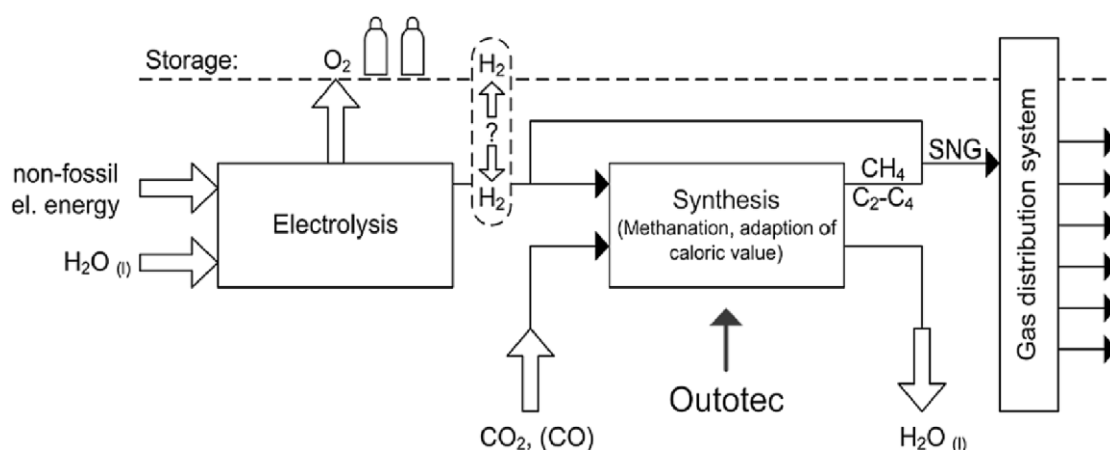
[15] Specht M, Baumgart F, Feigl B, Frick V, Störmer B, Zuberböhler U (2010) Erdöl Erdgas Kohle 10:342–346

### Κεφάλαιο 3: Παραγωγή Υποκατάστατου Φυσικού Αερίου-Substitute Natural Gas (SNG)

Το υδρογόνο, ως φορέας ενέργειας, έχει γίνει ολοένα και πιο σημαντικό, κυρίως τις τελευταίες δεκαετίες. Οφείλει τη δημοτικότητα του στην αύξηση του κόστους της ενέργειας που προκαλείται από την αβεβαιότητα της διαθεσιμότητας του πετρελαίου στο μέλλον, αλλά κυρίως από τις κλιματικές αλλαγές και την υπερθέρμανση του πλανήτη που οφείλονται στις ανθρωπογενείς εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα από τη χρήση ορυκτών καυσίμων.

Μεγάλες προσπάθειες γίνονται ώστε να αντικατασταθούν οι συμβατικές πηγές ενέργειας όπως η πυρηνική ενέργεια ή τα ορυκτά καύσιμα από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας όπως η αιολική ή ηλιακή. Όμως οι περισσότερες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας δεν δύναται να παρέχουν ηλεκτρική ενέργεια βασικού φορτίου (baseload) λόγω της διακοπτόμενης φύσης τους (π.χ. αιολική ενέργεια). Για να ξεπεραστεί αυτό το εμπόδιο, τα συστήματα αποθήκευσης πρέπει να χρησιμοποιηθούν εντός του ηλεκτρικού δικτύου.

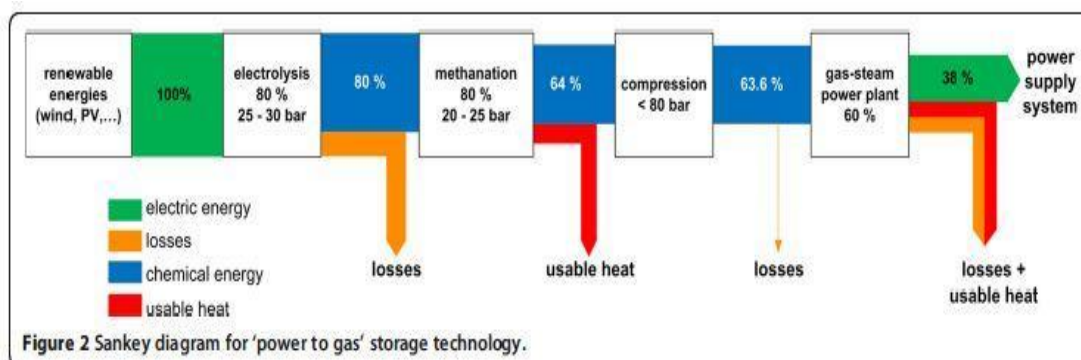
Η διάρθρωση της έρευνας κατά τη διαδικασία "παραγωγής υποκατάστατου φυσικού αερίου με αποθήκευση ηλεκτρικής ανανεώσιμης ενέργειας και διοχέτευσης της στο δίκτυο φυσικού αερίου, με ηλεκτρόλυση του νερού και εκμετάλλευση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα" στηρίζεται σε μια διαδικασία κατά την οποία η ηλεκτρική ενέργεια από ανανεώσιμες πηγές μετατρέπεται σε μεθάνιο (power to gas), όπως παρουσιάζεται στην παρακάτω Εικόνα [1,2].



Εικόνα 12: Διαδικασία παραγωγής υποκατάστατου ΦΑ. [1]

Ολοκληρωμένες μελέτες και έρευνες πάνω σε αυτό το αντικείμενο λαμβάνουν υπόψη τους τεχνικά και οικονομικά συμπεράσματα τα οποία προέρχονται από διάφορα ερευνητικά επιστημονικά ινστιτούτα και από βιομηχανικές εταιρείες.

Αυτή η ανάλυση επικεντρώνεται στην μετατροπή εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα περιλαμβάνοντας και άλλα αέρια με τη χρήση ανανεώσιμης ηλεκτρικής ενέργειας σε υποκατάστατο φυσικό αέριο (SNG). Το διοξείδιο του άνθρακα μπορεί να ληφθεί από διάφορες πηγές. Το παραγόμενο αέριο μπορεί να αναβαθμιστεί σε SNG και να τροφοδοτήσει το δίκτυο του φυσικού αερίου [3,4].



Εικόνα 13: Διάγραμμα ροής ενέργειας. [3]

Η μετατροπή ηλεκτρικής ενέργειας σε υδρογόνο (ηλεκτρόλυση) προκαλεί απώλειες αποδοτικότητας περίπου 20% λόγω της εσωτερικής αντίστασης των κελιών οι οποίες μπορούν να χαρακτηρισθούν ως απώλειες θερμότητας. Η ακόλουθη μεταφορά του υδρογόνου προς τη διαδικασία μεθανοποίησης μειώνει την αποδοτικότητα στο 64%. Για όλη τη διαδικασία μεταφοράς από ανανεώσιμη ενέργεια στο δίκτυο αποθήκευσης του φυσικού αερίου μπορεί να φτάσουμε σε αποδοτικότητα το 63,6% [3,4].

### 3.1. Ηλεκτρόλυση

Η ιστορία της ηλεκτρόλυσης του νερού ξεκίνησε ήδη από την πρώτη βιομηχανική επανάσταση, το 1800 όπου οι Nicholson και Carlisle ήταν οι πρώτοι που ανακάλυψαν την ικανότητα της ηλεκτρολυτικής διάσπασης του νερού. Από το 1902 περισσότερες από 400 βιομηχανικές μονάδες ηλεκτρόλυσης νερού τέθηκαν σε λειτουργία και το 1939 η πρώτη μεγάλη εγκατάσταση ηλεκτρόλυσης νερού με χωρητικότητα 10,000 Nm<sup>3</sup> H<sub>2</sub>/h τέθηκε σε λειτουργία. Το 1948, κατασκευάστηκε ο πρώτος βιομηχανικός υπό πίεση ηλεκτρολύτης, το 1966 το πρώτο σύστημα στέρεων πολυμερών (SPE) και το 1972 αναπτύχθηκε η πρώτη μονάδα ηλεκτρόλυσης νερού στέρεου οξειδίου. Τα πρώτα προηγμένα αλκαλικά συστήματα ξεκίνησαν το 1978. Η ιστορία καταλήγει στις μέρες μας με την ανάπτυξη μεμβρανών ανταλλαγής πρωτονίων, οι οποίες χρησιμοποιούνται στις μονάδες ηλεκτρόλυσης νερού και στις κυψέλες καυσίμου.

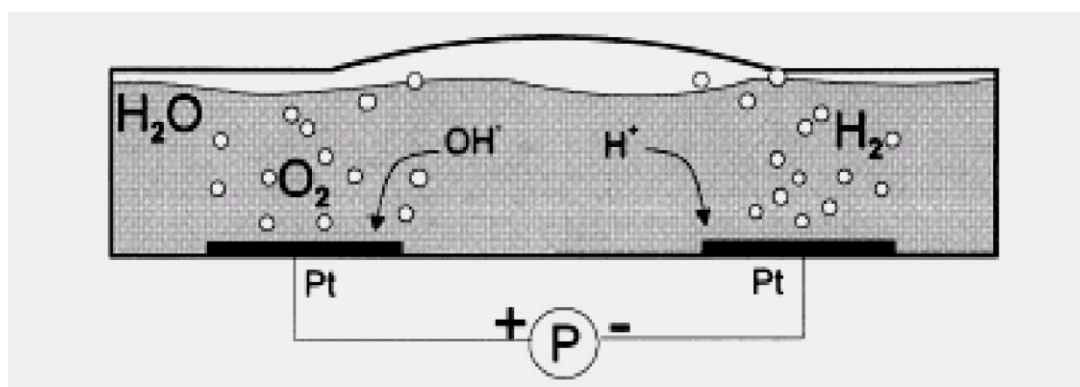
Ηλεκτρόλυση του νερού ονομάζεται η διάσπασή του σε υδρογόνο και οξυγόνο, μέσω ηλεκτρικού ρεύματος. Αν και σήμερα υπάρχουν πολλές τεχνολογικές και σχεδιαστικές παραλλαγές, εντούτοις το κάθε ηλεκτρολυτικό κελί διαθέτει τέσσερα

βασικά και αναπόσπαστα τμήματα: μια εξωτερική πηγή τροφοδοσίας ρεύματος, έναν ηλεκτρολύτη και δυο ηλεκτρόδια, την άνοδο και την κάθοδο.

Η ηλεκτρόλυση του νερού δε χρησιμοποιείται βιομηχανικά, μιας και η παραγωγή του υδρογόνου είναι οικονομικότερη από ορυκτά καύσιμα. Η εξάντληση όμως των φυσικών αποθεμάτων σε συνδυασμό με την εξέλιξη των τεχνολογιών ΑΠΕ και την ανάγκη ενσωμάτωσής τους, έστρεψε ξανά το ενδιαφέρον στην ηλεκτρόλυση κατά τις τελευταίες δεκαετίες. Επιπροσθέτως, η καθαρότητα που εξασφαλίζεται έναντι της αναμόρφωσης υδρογονανθράκων είναι πολύ υψηλότερη [21].

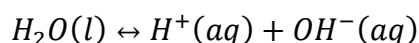
### 3.1.1. Αρχές λειτουργίας

Η ηλεκτρόλυση του νερού θεωρείται μία πολύ γνωστή αρχή για την παραγωγή οξυγόνου και αερίου υδρογόνου. Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζεται μια σχηματική απεικόνιση ενός ηλεκτροχημικού κελί. Ο πυρήνας μιας μονάδας ηλεκτρόλυσης είναι ηλεκτροχημικό κελί, το οποίο είναι γεμάτο με καθαρό νερό και έχει δύο ηλεκτρόδια συνδεδεμένα με μία εξωτερική τροφοδοσία ρεύματος.



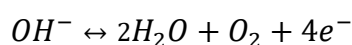
Εικόνα 14: Ηλεκτροχημικό κελί. [22]

Στην κρίσιμη τάση μεταξύ δύο ηλεκτροδίων, αρχίζουν να παράγουν αέριο υδρογόνο στα αρνητικά ηλεκτρόδια και αέριο οξυγόνο στα θετικά. Η ποσότητα των αερίων που παράγεται ανά μονάδα χρόνου σχετίζεται άμεσα με το ρεύμα που διέρχεται από το ηλεκτροχημικό κελί. Στο νερό, υπάρχει πάντα ένα ορισμένο ποσό ιόντων  $H_+$  και  $OH_-$ . Η εξίσωση ισορροπίας:

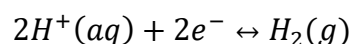


Αέριο οξυγόνο και υδρογόνο μπορούν να δημιουργηθούν σε ηλεκτρόδια ευγενούς μετάλλου με ηλεκτρόλυση νερού:

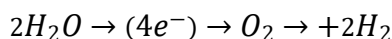
Άνοδος:



Κάθοδος:



Σε περίπτωση όξινου ή βασικού νερού, οι αντιδράσεις που συμβαίνουν στη διεπαφή των ηλεκτροδίων είναι ελαφρός διαφορετικές. Στην ηλεκτρόλυση του νερού δεν υπάρχουν παράπλευρες αντιδράσεις που θα μπορούσαν να αποδώσουν ανεπιθύμητα υποπροϊόντα, επομένως το καθαρό υπόλοιπο είναι:



Η ελάχιστη απαραίτητη τάση κυψέλης για την έναρξη της ηλεκτρόλυσης, υπό κανονικές συνθήκες δίνεται από την ακόλουθη εξίσωση:

$$E_{cell}^0 = \frac{-\Delta G^0}{nF}$$

Όπου  $\Delta G^0$  είναι η μεταβολή της ελεύθερης ενέργειας Gibbs υπό κανονικές συνθήκες, και  $n$  ο αριθμός των μεταφερόμενων ηλεκτρονίων. Στην περίπτωση ενός κλειστού ηλεκτροχημικού στοιχείου, οι συνθήκες είναι ελαφρώς αλλαγμένες, καθώς η μεταβολή της έντασης είναι μικρότερη σε σύγκριση με την πίεση. Η απαραίτητη τάση για ένα ηλεκτρόνιο δίνεται από:

$$E_{cell}^0 = \frac{-\Delta A^0}{nF}$$

$$\Delta A^0 = \Delta H^0 - TR\Delta_n - T\Delta S^0$$

Προκειμένου να ξεκινήσει η αντίδραση, είναι απαραίτητο να ξεπεραστεί ένας επιπλέον φραγμός ενέργειας, η ενέργεια ενεργοποίησης  $E_{act}$ . Ο αριθμός των μορίων που μπορούν να ξεπεράσουν αυτό το εμπόδιο, είναι ο παράγοντας ελέγχου του ρυθμού αντίδρασης  $r$ , και δίνεται από τη σχέση Maxwell . Boltzman, η οποία έχει μια εκθετική συμπεριφορά. Επομένως, η ενέργεια ενεργοποίησης εκφράζει την ταχύτητα με την οποία πραγματοποιείται η αντίδραση. Η μέγιστη δυνατή απόδοση ενός ιδανικού κλειστού ηλεκτροχημικού κελιού, ορίζεται από την ακόλουθη εξίσωση:

$$\varepsilon_{max} = \frac{\Delta H}{\Delta A} = -\frac{\Delta H}{nFE_{cell}}$$

Στην πραγματικότητα, η απόδοση ενός ηλεκτροχημικού κελιού δίνεται:

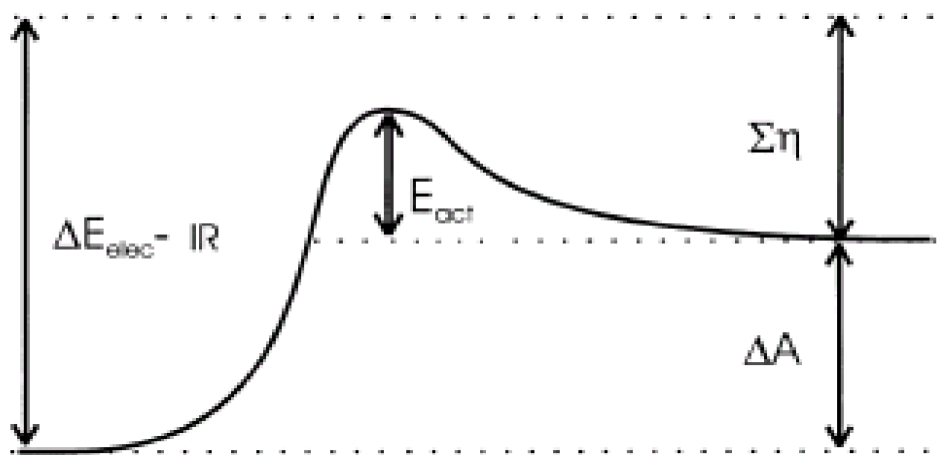
$$\varepsilon_{real} = -\frac{\Delta H}{nE_{elec}}$$

Όπου:

$$\Delta E_{elec} = \Delta A + IR + \Sigma\eta$$

Όπου  $R$ , είναι η συνολική αντίσταση σε σειρά στο κελί συμπεριλαμβανομένης της αντίστασης του εξωτερικού κυκλώματος, του ηλεκτρολύτη, των ηλεκτροδίων και του υλικού της μεμβράνης. Το  $\Sigma\eta$  αποτελεί το άθροισμα όλων των δυναμικών. Η

ενέργεια ισορροπίας ανά γραμμομόριο, κατά τη διάρκεια της ηλεκτρόλυσης νερού φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



Εικόνα 15: Οι ενέργειες που εμπλέκονται σε μία αντίδραση. [22]

Για την ηλεκτρόλυση του νερού, υπό ιδανικές αναστρέψιμες συνθήκες, η μέγιστη θεωρητική απόδοση σε σχέση με την πηγή ηλεκτρικής ενέργειας θα είναι  $\varepsilon_{max} = 120\%$ . Επομένως, η θερμότητα θα πρέπει να εισέρχεται στο κελί από το περιβάλλον. Όταν  $nFE_{cell} = 1,48nF$  τότε το κελί θα έχει απόδοση 100%. Το κελί παράγει θερμότητα στα δυναμικά άνω των 1,48V και λαμβάνει θερμότητα στα δυναμικά κάτω από την τιμή αυτή, υπό την προϋπόθεση ότι η θερμοκρασία του κελιού πρέπει να διατηρείται σταθερή [22].

### 3.1.2. Ηλεκτρόδια

Τα ηλεκτρόδια είναι καλοί ηλεκτρικοί αγωγοί (συνήθως μέταλλα), που οδηγούν το ρεύμα από το εξωτερικό κύκλωμα στον ηλεκτρολύτη και κατόπιν από αυτόν πίσω στο εξωτερικό κύκλωμα. Ονομάζονται άνοδος και κάθοδος, και η τάση που επιβάλλεται σε αυτά τους προσδίδει ετερόσημο φορτίο. Βρίσκονται σε επαφή με τον ηλεκτρολύτη (σε περίπτωση υγρού κελιού είναι βυθισμένα σε αυτόν) και συνήθως στην επιφάνειά τους ενσωματώνονται ηλεκτροκαταλύτες προς προώθηση των επιμέρους ημιαντιδράσεων, οι οποίες πραγματοποιούνται εκεί.

Σε ένα ηλεκτροχημικό κελί (γαλβανικό ή ηλεκτρολυτικό), τα ηλεκτρόνια κατευθύνονται από την άνοδο στη κάθοδο. Επίσης, ανεξαρτήτως του τύπου του κελιού, η οξειδωση και η αναγωγή γίνονται πάντα στα συγκεκριμένα ηλεκτρόδια που τους αντιστοιχούν, με τα κατιόντα να κινούνται πάντα προς την κάθοδο και τα ανιόντα να απομακρύνονται από αυτή.

Κάτι τέτοιο όμως δεν ισχύει για τη φορά του ηλεκτρικού ρεύματος, που εξαρτάται από το τύπο του κελιού αναφοράς -στην περίπτωση της ηλεκτρόλυσης, η φορά του ρεύματος είναι αντίθετη της φοράς της ροής των ηλεκτρονίων.

Αυτό οφείλεται στη σύμβαση σύμφωνα με την οποία το ρεύμα εξέρχεται από το θετικό πόλο της πηγής και εισέρχεται από τον αρνητικό της. Συνεπώς, η πολικότητα των ηλεκτροδίων αντιστρέφεται ανάλογα με τον τύπο του κελιού.

### **Κάθοδος**

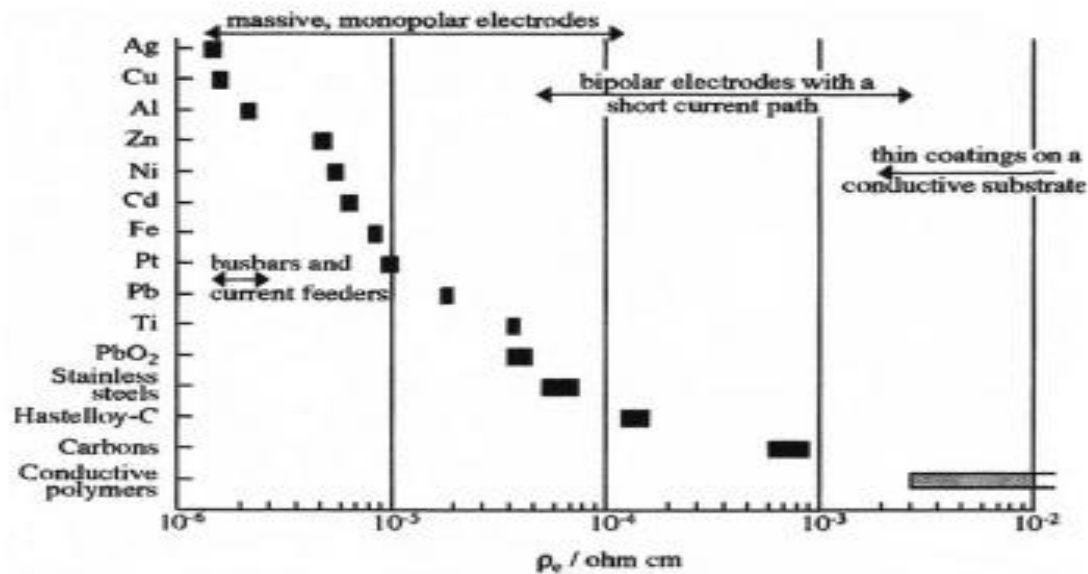
Πρόκειται για το ηλεκτρόδιο στο οποίο πραγματοποιείται η αναγωγή, και παράγεται το υδρογόνο. Το φορτίο της είναι αρνητικό(και θετικό αντίστοιχα για γαλβανικά κελιά), συνεπώς εκεί συσσωρεύονται κατιόντα ή/και μόρια, λαμβάνουν ηλεκτρόνια και μετατρέπονται σε ουδέτερα άτομα/μόρια ή/και ανιόντα. Μέσω της καθόδου, τα ηλεκτρόνια εξέρχονται από τη πηγή, δεσμεύονται, κι έτσι εισέρχονται στον ηλεκτρολύτη τον οποίο και διασχίζουν.

### **Άνοδος**

Πρόκειται για το ηλεκτρόδιο στο οποίο πραγματοποιείται η οξείδωση, και παράγεται οξυγόνο. Το φορτίο της είναι θετικό(και αρνητικό αντίστοιχα για γαλβανικά κελιά), συνεπώς εκεί συσσωρεύονται ανιόντα ή/και άτομα/μόρια, αποδίδουν ηλεκτρόνια και μετατρέπονται σε κατιόντα ή/και ουδέτερα μόρια. Μέσω της ανόδου, απελευθερώνονται τα ηλεκτρόνια, εγκαταλείπουν τον ηλεκτρολύτη και κατόπιν επανεισέρχονται στη συσκευή.

Η ηλεκτρική αντίσταση είναι βασική ιδιότητα των δομών και των υλικών των ηλεκτροδίων. Για ένα ομοιογενές υλικό με ομοιόμορφη επιφάνεια διατομής  $A$  και αντίσταση  $R$ , στο μήκος  $L$  του, η ηλεκτρική αντίσταση ορίζεται ως  $\rho_e = RA/L$  με την ηλεκτρική αγωγιμότητα να είναι αντίστροφη της  $\rho_e$  όπου ορίζεται ως  $k=CL/A$ . Όπου  $C$  είναι η αγωγιμότητα, η οποία είναι αντίστροφη της  $R$ .

Η ηλεκτρική αντίσταση καθορίζει το μέγεθος της πιθανής πτώσης μέσω του ηλεκτροδίου, το οποίο, με τη σειρά του, συμβάλλει στο κόστος της ηλεκτρικής ενέργειας, σε πιθανά προβλήματα θέρμανσης και σε μια λιγότερο ομοιόμορφη κατανομή δυναμικού. Τυπικές τιμές  $\rho_e$  για υλικά που χρησιμοποιούνται συνήθως στις δομές ηλεκτροδίων παρουσιάζονται στην παρακάτω Εικόνα:



Εικόνα 16: Τυπικές τιμές  $\rho_e$  για υλικά ηλεκτροδίων. [21]

Μόνο τα πιο αγώγιμα υλικά, όπως ο χαλκός και το αλουμίνιο, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για εκτεταμένες ηλεκτρικές συνδέσεις και αγωγούς μεταφοράς ρεύματος. Στην περίπτωση τροφοδοτών ρεύματος, η υψηλή θερμική αγωγιμότητα είναι επίσης χρήσιμη για τη διάχυση της θερμότητας στο περιβάλλον, καθώς η ηλεκτρική αντίσταση των περισσότερων στερεών αγωγών αυξάνεται με τη θερμοκρασία. Το κόστος και τα βάρη είναι επίσης σημαντικά. Η παθητική μεμβράνη που σχηματίζεται στην εξωτερική επιφάνεια αλουμινίου βοηθάει στην αποφυγή της διάβρωσης, αλλά μπορεί να οδηγήσει σε συνδέσεις υψηλής αντοχής εάν δεν ληφθούν προφυλάξεις.

Τα ηλεκτρόδια πρέπει να κατασκευάζονται από υλικά ικανά να διατηρούν τη φυσική, μηχανική και χημική τους σταθερότητα, συχνά σε ένα μεγάλο εύρος συνθηκών λειτουργίας (θερμοκρασίας, πίεσης, φορτίου κ.α.). Συχνά το ενεργό τμήμα τους μπορεί να αποτελείται από μια λεπτή λωρίδα, επιστρωμένη σε ένα ογκωδέστερο αδρανές τμήμα, ενώ συχνά μπορεί να χρησιμοποιείται κι ένας υποστηρικτής.

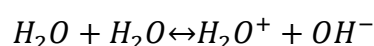
Τυπικά εμπεριέχουν κάποιον ηλεκτροκαταλύτη, ώστε να επιτυγχάνεται και να διατηρείται ο επιθυμητός ρυθμός της αντίδρασης ενώ παράλληλα να αποτρέπονται παράπλευρες ανεπιθύμητες αντιδράσεις. Η ηλεκτρική αγωγιμότητά τους θα πρέπει να είναι υψηλή, ώστε να μην χρειάζεται ν' αντισταθμίζεται με υψηλότερες τάσεις λόγω υψηλών απωλειών με τη μορφή θερμότητας. Τέλος, το κόστος τους θα πρέπει να κυμαίνεται σε βιώσιμα επίπεδα, όπως και η διάρκεια ζωής τους (μερικά χρόνια)[21].



### 3.1.3. Ηλεκτρολύτης

Η αγωγή του ηλεκτρικού ρεύματος προϋποθέτει αξιόλογη ηλεκτρική αγωγιμότητα του μέσου, κάτι που στο καθαρό νερό δεν υφίσταται. Εν γένει, η ηλεκτρική αγωγιμότητα εξαρτάται από την παρουσία ιόντων στο μέσο, τα οποία αποτελούν εκεί το φορέα του φορτίου και επιτρέπουν τη διέλευση του ρεύματος (εκτός του ηλεκτρολύτη, ο φορέας του φορτίου είναι τα ηλεκτρόνια).

Το καθαρό όμως νερό χαρακτηρίζεται από χαμηλό (αυτό)ιονισμό, συνεπώς είναι κακός ηλεκτρικός αγωγός. Αυτό οφείλεται στη χαμηλή σταθερά ισορροπίας της αντίδρασης, που αντιστοιχεί στην αντίδραση



να βρίσκεται ιδιαίτερα μετατοπισμένη προς τα αριστερά (προς τη μεριά των αντιδρώντων). Ως εκ τούτου, λίγα ανιόντα υδροξειδίου και κατιόντα οξωνίου υφίστανται στο μέσο, αδυνατώντας να επιτρέψουν αξιόλογη διέλευση ρεύματος.

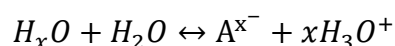
Η βελτίωση της αγωγιμότητας του νερού μπορεί να γίνει με δύο τρόπους:

- με την αύξηση της τάσης τροφοδοσίας, οπότε και βελτιώνεται ο αυτοϊονισμός του νερού.
- με την προσθήκη ενός ηλεκτρολύτη, οπότε και αυξάνονται τα ιόντα στο μέσο.

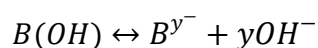
Η αύξηση της τάσης ευνοεί τον (αυτό)ιονισμό του νερού, διότι πρόκειται για περίπτωση προσθήκης επιπλέον ενέργειας σε μια ενδόθερμη αντίδραση. Επίσης, ξεπερνιούνται έτσι κινητικά φράγματα, οπότε και αυξάνεται ο ρυθμός της αντίδρασης.

Η προσθήκη ενός ηλεκτρολύτη στο νερό ευνοεί την ύπαρξη ελεύθερων ιόντων. Ως ηλεκτρολύτης εννοείται μια ουσία, η οποία συνήθως εμπεριέχει ή μπορεί ν' απελευθερώνει ιόντα, ευνοώντας έτσι τη διέλευση του ρεύματος. Τέτοιες ουσίες αποτελούν κυρίως οξέα, βάσεις και άλατα, ενώ όσο ισχυρότερο το οξύ ή η βάση, τόσο εντονότερη η επίδρασή τους. Αυτό μπορεί να εξηγηθεί από τις εξισώσεις διάλυσής τους στο νερό (με Acidγια οξύ και Baseγια βάση) :

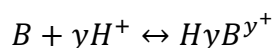
Οξύ κατά Arrhenius/Brønsted-Lowry:



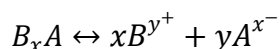
Βάση κατά Arrhenius:



Βάση κατά Brønsted- Lowry:



Άλας κατά Arrhenius/Brønsted-Lowry:



Παρουσία νερού, το οξύ ή η βάση ιονίζεται (ή διίσταται, ανάλογα τη βάση), με αποτέλεσμα να προκύπτουν κατιόντα υδρογόνου ή ανιόντα υδροξειδίου αντίστοιχα το άλας πάντα διίσταται στα ιόντα των συστατικών των οξέων και βάσεων. Όσο ισχυρότερο το οξύ ή η βάση (ή το επιμέρους οξύ ή/και η επιμέρους βάση του άλατος), τόσο λιγότερο αμφίδρομη είναι η αντίδραση, με αποτέλεσμα την παρουσία περισσότερων ιόντων και λιγότερων μορίων. Για αυτό και καλύτερες ιδιότητες επιδεικνύουν ισχυρά οξέα όπως το υδροχλωρικό (HCl) και το θειικό (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) και ισχυρές βάσεις όπως το υδροξείδιο του νατρίου (NaOH) και του καλίου (KOH), των οποίων οι αντιδράσεις ιοντισμού και διάστασης είναι πρακτικά μονόδρομες (μη αντιστρέψιμες).

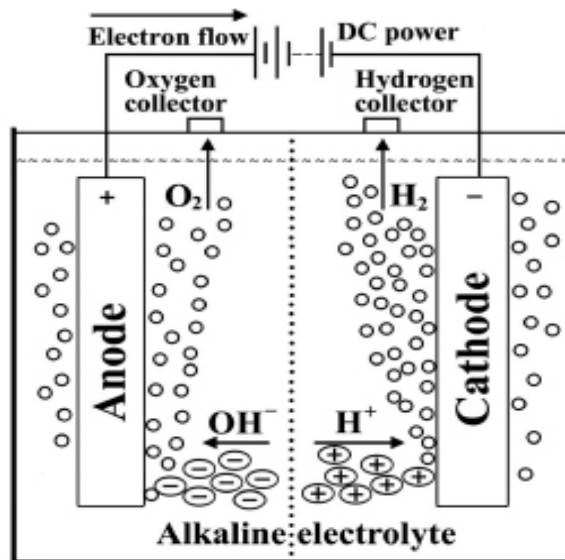
Τα επιθυμητά χαρακτηριστικά ενός ηλεκτρολύτη είναι η μεγαλύτερη πυκνότητα ρεύματος για τη μικρότερη υπέρταση. Συνεπώς, τα ηλεκτρόδια κατασκευάζονται με πορώδη μορφή, ώστε να αυξάνεται η ενεργή τους επιφάνεια. Το υλικό κατασκευής παίζει πολύ σημαντικό ρόλο, και εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τη φύση του ηλεκτρολύτη και από τις συνθήκες λειτουργίας. Η τελική τους επίδραση σχετίζεται με την ηλεκτρονιακή δομή του ηλεκτροδίου[21].

#### 3.1.4. Μέθοδοι παραγωγής υδρογόνου μέσω ηλεκτρόλυσης νερού

Παρά το γεγονός ότι η ανακάλυψη της ηλεκτρολυτικής αποσύνθεσης του νερού παρατηρήθηκε αρχικά σε όξινο νερό, σε βιομηχανικές εγκαταστάσεις προτιμάται το αλκαλικό μέσο, επειδή η διάβρωση ελέγχεται ευκολότερα και τα δομικά υλικά που χρησιμοποιούνται είναι φθηνότερη σε σύγκριση με την τεχνολογία όξινης ηλεκτρόλυσης. Άλλες μέθοδοι παραγωγής υδρογόνου, όπως η ηλεκτρόλυση μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων και η ηλεκτρόλυση ατμού έχουν αναπτυχθεί πρόσφατα. Το υδρογόνο θα μπορούσε επίσης να παραχθεί ως υποπροϊόν κατά την παραγωγή χλωροαλκαλίων.

##### 3.1.4.1. Αλκαλική ηλεκτρόλυση

Η αρχή της ηλεκτρόλυσης αλκαλικού νερού παρουσιάζεται στην παρακάτω Εικόνα.

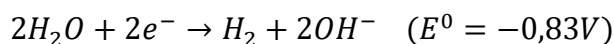


Εικόνα 17: Αλκαλική ηλεκτρόλυση. [21]

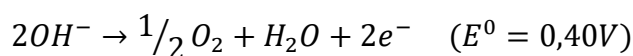
Αποτελεί την απλούστερη μονάδα ηλεκτρόλυσης νερού, η οποία αποτελείται από μια άνοδο και μία κάθοδο συνδεδεμένες μέσω ενός εξωτερικού τροφοδοτικού, βυθισμένες σε ένα αγώγιμο ηλεκτρολύτη. Ένα συνεχές ρεύμα (DC) εφαρμόζεται στη μονάδα. Τα ηλεκτρόνια ρέουν από τον αρνητικό ακροδέκτη της πηγής ισχύος συνεχούς ρεύματος στην κάθοδο, όπου δεσμεύονται από ιόντα υδρογόνου (πρωτόνια) για να σχηματίσουν άτομα υδρογόνου. Στη γενική διαδικασία της ηλεκτρόλυσης του νερού, τα ιόντα υδρογόνου κινούνται προς την κάθοδο, ενώ τα ιόντα υδροξειδίου κινούνται προς την άνοδο. Ένα διάφραγμα χρησιμοποιείται για να διαχωρίσει τα δύο διαμερίσματα. Οι αποδέκτες χρησιμοποιούνται για τη συλλογή των αερίων υδρογόνου και οξυγόνου, τα οποία σχηματίζονται στην κάθοδο και την άνοδο αντίστοιχα.

Στην περίπτωση ηλεκτρόλυσης αλκαλικού ύδατος, όπου χρησιμοποιείται ισχυρή βάση ως ηλεκτρολύτης, το νικέλιο (Ni) είναι μία δημοφιλής επιλογή λόγω του χαμηλού κόστους, της καλής δραστηριότητας και της διαθεσιμότητας του. Για να ενισχυθεί η αγωγιμότητα, ο ηλεκτρολύτης που χρησιμοποιείται στο κελί πρέπει να αποτελείται από ιόντα υψηλής κινητικότητας. Το υδροξείδιο του καλίου (KOH) χρησιμοποιείται κυρίως στην αλκαλική ηλεκτρόλυση, με αποτέλεσμα να αποφεύγονται τα προβλήματα διάβρωσης που προκαλούνται από ηλεκτρολύτες οξέος. Το KOH προτιμάται έναντι του υδροξειδίου του νατρίου (NaOH), επειδή τα προηγούμενα διαλύματα ηλεκτρολύτη έχουν υψηλότερη αγωγιμότητα. Συνεπώς, όταν η διαδικασία διεξάγεται σε αλκαλικό ηλεκτρολύτη, οι ηλεκτροχημικές αντιδράσεις που συμβαίνουν στην άνοδο και την κάθοδο δίνονται από τις παρακάτω εξισώσεις.

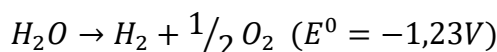
Κάθοδος:



Άνοδος:



Φυσικά το άθροισμα των δύο εξισώσεων οδηγεί στην συνολική αντίδραση:



Προκειμένου να προχωρήσουν αυτές οι αντιδράσεις, πρέπει να ξεπεραστούν πολλά εμπόδια, τα οποία εξαρτώνται από τα συστατικά στοιχεία της ηλεκτρόλυσης: τα οριακά στρώματα στην επιφάνεια των ηλεκτροδίων, η φάση των ηλεκτροδίων, η φάση του ηλεκτρολύτη και οι αντιστάσεις του κυκλώματος. Σαφώς, η διαδικασία της ηλεκτρόλυσης πρέπει να συνυπολογίζει τη σύσταση του κελιού.

Ένα παράδειγμα ενός προηγμένου αλκαλικού ηλεκτρολύτη υπό πίεση, είναι το πρωτότυπο GHW (Gesellschaft für Hochleistungselektrolyseure zur Wasserstoffherzeugung mbH). Αυτός ο ηλεκτρολύτης παρέχει υδρογόνο κάτω από πίεση 30bar, η συστοιχία διπολικών κυττάρων είναι εγκλωβισμένη σε ένα δοχείο πίεσης και η στοίβα των κελιών αποτελείται από πρόσφατα αναπτυγμένες μονάδες διαφράγματος ηλεκτροδίου, εγκατεστημένα σε ορθογώνια πολυμερικά κελιά. Η στοίβα των κελιών μέσα στο δοχείο πίεσης περιβάλλεται από την τροφοδοσία νερού για τη διαδικασία της ηλεκτρόλυσης. Το νερό τροφοδοσίας, πρώτα περνάει τον ενδιάμεσο χώρο μεταξύ της στοίβας των κελιών και της πίεσης, πριν εισέλθει στο καυστικό βρόγχο ηλεκτρολύτη. Επομένως, δεν υπάρχει διαφορά πίεσης στο εσωτερικό και στο εξωτερικό της στοίβας και ο μεγάλος αριθμός των παρεμβατικών κελιών διαχωρίζει το λάδι στο εσωτερικό, από το νερό στο εξωτερικό με διαφορά πίεσης μερικών mbar [21].

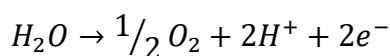
### 3.1.4.2. PEM ηλεκτρόλυση

Η αρχή της ηλεκτρόλυσης που βασίζεται στις κυψέλες τύπου PEM περιγράφεται στις παρακάτω εξισώσεις. Ο ηλεκτρολύτης είναι μια οργανική πολυμερική μεμβράνη, στην οποία τα πρωτόνια που παράγονται στην άνοδο μεταφέρονται στην κάθοδο. Οι PEM συσκευές ηλεκτρόλυσης μπορούν να σχεδιαστούν για να λειτουργούν σε πιέσεις μέχρι αρκετές εκατοντάδες bar, και είναι κατάλληλες τόσο για σταθερές όσο και για κινητές εφαρμογές [Grigoriev et al, 2006].

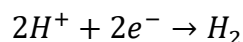
Τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα των PEM σε σχέση με τις αλκαλικές συσκευές ηλεκτρόλυσης είναι ευελιξία τους όσον αφορά την λειτουργία τους σε ένα μεγάλο εύρος δυναμικοτήτων, η ασφάλεια τους λόγω της απουσίας του ηλεκτρολύτη KOH, η συνεκτικότερη κατασκευή λόγω των υψηλότερων πυκνοτήτων ισχύος που είναι

δυνατό να επιτευχθούν και οι υψηλότερες πιέσεις λειτουργίας (καμία ανάγκη για περαιτέρω συμπίεση).

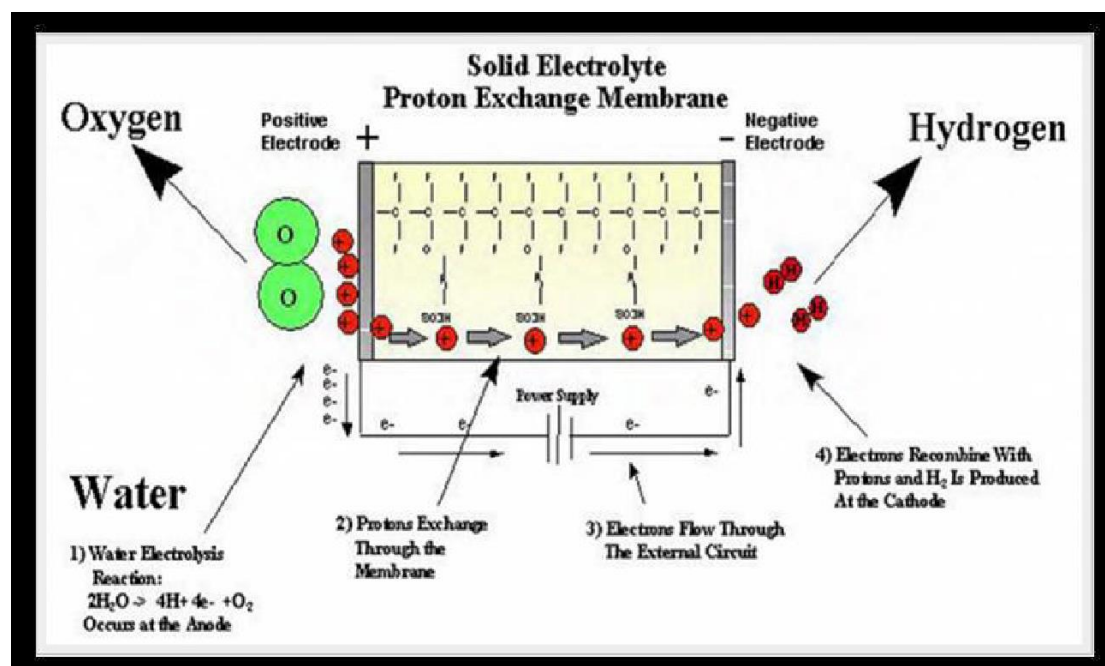
Άνοδος:



Κάθοδος:



Λόγω όμως του σχετικά υψηλού κόστους, της χαμηλής δυναμικότητας, της μικρής απόδοσης και της σύντομης διάρκειας ζωής, οι συσκευές ηλεκτρόλυσης τύπου PEM, οι οποίες είναι διαθέσιμες σήμερα, δεν είναι τόσο ώριμες εμπορικά όσο οι αλκαλικές συσκευές ηλεκτρόλυσης. Αναμένεται ότι η απόδοση των συσκευών ηλεκτρόλυσης PEM μπορεί να αυξηθεί σημαντικά εάν βελτιστοποιηθούν οι διεργασίες παρασκευής των υλικών από τα οποία αποτελείται και ο σχεδιασμός των συστοιχιών. [22].



Εικόνα 18: PEM ηλεκτρόλυση. [22]

### 3.1.4.3. Ηλεκτρόλυση ατμού

Ένα από τα σημαντικότερα προβλήματα των συμβατικών ηλεκτρολυτών είναι η υψηλή κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας. Η ηλεκτρόλυση νερού είναι μια τεχνολογία που επιτυγχάνει υψηλότερη συνολική ενεργειακή απόδοση σε σύγκριση με τις προηγούμενες δύο. Από θερμοδυναμικής άποψης της, είναι πιο επωφελής η ηλεκτρόλυση του νερού σε υψηλές θερμοκρασίες (800-1000 °C), επειδή η ενέργεια παρέρχεται σε μικτή μορφή ηλεκτρισμού και θερμότητας. Το κύριο πλεονέκτημα είναι ότι ένα σημαντικό μέρος της ενέργειας που απαιτείται για τη διαδικασία ηλεκτρόλυσης προστίθεται ως θερμότητα, που είναι πολύ φθηνότερη από την ηλεκτρική ενέργεια. Επιπλέον, η υψηλή θερμοκρασία επιταχύνει τη διαδικασία της

αντίδρασης, μειώνοντας την απώλεια ενέργειας λόγω της πόλωσης των ηλεκτροδίων, αυξάνοντας έτσι τη συνολική αποδοτικότητα του συστήματος. Τυπικά υψηλής θερμοκρασίας ηλεκτρολύτης, όπως το γερμανικό σύστημα HOT ELLY επιτυγχάνει 92% ηλεκτρική απόδοση, καθώς χαμηλής θερμοκρασίας ηλεκτρολύτες μπορούν να επιτύχουν το πολύ 85% απόδοση. Το σύστημα υψηλής θερμοκρασίας χρησιμοποιεί ιόντα οξυγόνου ωθώντας κεραμικά σαν ηλεκτρολύτες. Το υγρό που πρόκειται να διαχωριστεί είναι ατμός στους 200°C, ο οποίος αφού θερμανθεί στους 800-1000 °C εισέρχεται στην πλευρά της καθόδου. Μετά τη διάσπαση του ατμού σε αέριο υδρογόνο και ιόντα  $\text{O}^{2-}$ , τα ιόντα οξυγόνου μεταφέρονται μέσω του κεραμικού υλικού στην άνοδο όπου εκκενώνονται και σχηματίζουν αέριο οξυγόνο. Παρά την υψηλή απόδοση σε σχέση με την ηλεκτρική ενέργεια, το σύστημα υψηλής θερμοκρασίας εξακολουθεί να παράγει υδρογόνο με κόστος τέσσερις φορές του αναμορφωμένου ατμοσφαιρικού υδρογόνου. Σε συμβατικούς ηλεκτρολύτες ατμού, το αέριο που τροφοδοτείται στην πλευρά της καθόδου (όπου αποσυντίθεται το νερό) είναι συνήθως ένα μείγμα ατμού και υδρογόνου, ενώ το αέριο που τροφοδοτείται στην άνοδο είναι συνήθως αέρας. Σε μηδενικό ρεύμα, το σύστημα έχει τάση ανοιχτού κυκλώματος 0.8-0.9V, ανάλογα με τον λόγο υδρογόνου/ατμού και τις θερμοκρασίες λειτουργίας. Αυτή η τάση ανοιχτού κυκλώματος είναι ακόμα υψηλότερη για την ηλεκτρόλυση του νερού. Προκειμένου να ηλεκτρολυθεί το νερό, μία τάση υψηλότερη από την τάση ανοιχτού κυκλώματος πρέπει να εφαρμοστεί για να αντλήσει οξυγόνο από την πλευρά του ατμού στην πλευρά του αέρα. Σαφώς, μεγάλο μέρος της χρησιμοποιούμενης ηλεκτρικής ενέργειας, 60-70% της συνολικής ηλεκτρικής ισχύς, χάνεται αναγκάζοντας τον ηλεκτρολύτη να λειτουργεί έναντι της υψηλής κλίσης χημικού δυναμικού για το οξυγόνο. Η απελευθέρωση του οξυγόνου που προέρχεται από την αποσύνθεση του νερού στην πλευρά της ανόδου είναι σαφώς απόβλητα. Μια νέα προσέγγιση για τη μείωση της κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας στους ηλεκτρολύτες επιτεύχθηκε με τη χρήση φυσικού αερίου προκειμένου να μειωθεί η διαφορά χημικού δυναμικού στο κελί του ηλεκτρολύτη. Σε αυτή τη νέα τεχνολογία, ο αέρας στην πλευρά της ανόδου αντικαθίσταται από φυσικό αέριο, προκειμένου να μειωθεί η τάση ανοιχτού κυκλώματος και συνεπώς η κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας. Το φυσικό αέριο βοηθά στη μείωση της διαφοράς χημικού δυναμικού μεταξύ των δύο πλευρών του ηλεκτρολύτη [23].

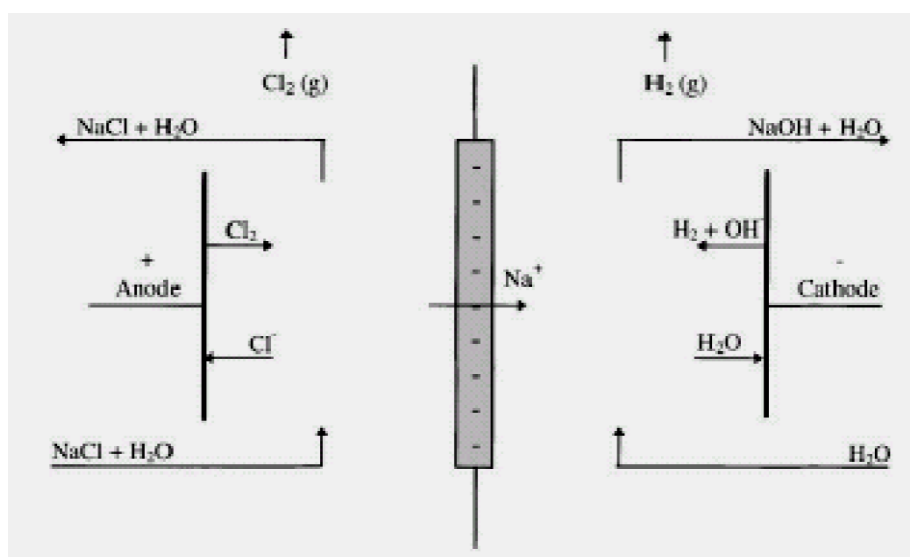
#### **3.1.4.4. Το υδρογόνο ως παραπροϊόν από την παραγωγή χλωριούχων αλκαλίων**

Το κύριο προϊόν της διαδικασίας ηλεκτρόλυσης χλωριούχων αλκαλίων, που χρησιμοποιεί NaCl ως πρώτη ύλη, είναι το χλώριο. Εξαιτίας περιβαλλοντικών και οικονομικών παραγόντων, μια μεγάλη ποσότητα του απαιτούμενου χλωρίου παράγεται προς το παρόν από τις σχετικά νέες διεργασίες μεμβράνης. Σε αυτή τη

διεργασία, η άνοδος και η κάθοδος του κελιού συνήθως διαχωρίζονται με μία ευαίσθητη μεμβράνη πάχους περίπου 50-200μm.

Το κομμάτι της ανόδου τροφοδοτείται με διάλυμα άλμης. Στην άνοδο, χλωριούχα ιόντα μετατρέπονται σε αέριο χλώριο. Το μέρος της καθόδου τροφοδοτείται με νερό και στο νερό της καθόδου μετατρέπεται σε αέριο υδρογόνο και ιόντα υδροξυλίου.

Τα ιόντα νατρίου διέρχονται και μεταναστεύουν μέσω του συλλέκτη κατιόντων-μεμβράνης από την άνοδο στην κάθοδο. Το νάτριο σε συνδυασμό με ιόντα υδροξυλίου εξέρχονται από τη μεμβράνη ως υδροξείδιο του νατρίου. Η διαδικασία φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



Εικόνα 19: Παρουσίαση ενός κελιού στη διαδικασία χλωρίου-αλκαλίων. [24]

Μεταξύ ανόδου και καθόδου διατηρείται μία διαφορά δυναμικού (2-4V) με τέτοιο τρόπο ώστε να επιτυγχάνεται η επιθυμητή πυκνότητα ρεύματος (2000-5000A/m<sup>2</sup>). Η επιφάνεια της με μεμβράνης είναι περίπου 1-3 m<sup>2</sup>. Τα κελία της μεμβράνης όπως παρουσιάζονται στο παραπάνω σχήμα γίνονται ζευγάρια σε σειρά σε μία στοίβα, όπου βρίσκονται περίπου 20 έως περισσότερα από 100 από αυτά τα κελιά. Οι μεμβράνες που χρησιμοποιούνται στην ηλεκτρόλυση είναι κατασκευασμένες από ένα διασυνδεδεμένο δίκτυο πολυμερούς, στο οποίο είναι σταθεροποιημένες οι λειτουργικές ομάδες. Στις μεμβράνες που ενσωματώνονται στις μονάδες ηλεκτρόλυσης χλωριούχου καλίου, δύο τύποι ενεργών ομάδων συνδέονται με τις καρβοξυλικές και τις σουλφονικές ομάδες. Οι ιδιότητες μεταφοράς και προσρόφησης μιας συγκεκριμένης στρώσης, μπορούν να ρυθμιστούν από τον αριθμό των γραμμομορίων των ενεργών ομάδων ανά χιλιόγραμμο ξυρού πολυμερούς. Οι σουλφονικές ομάδες των μεμβρανών ενισχύονται με σύρματα Teflon, ώστε να αυξηθεί η μηχανική σταθερότητα της μεμβράνης. Το σουλφονικό

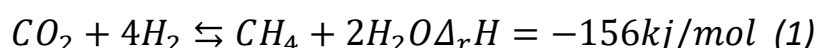


στρώμα στρώμα τοποθετείται κυρίως στην πλευρά της ανόδου, ώστε να αποτραπεί η πρωτονίωση των καρβοξυλικών ομάδων στο καρβοξυλικό στρώμα, που θα μπορούσε να συμβεί στο σχετικά όξινο περιβάλλον που υπάρχει στην πλευρά της ανόδου. Παρουσία μικρής διαφοράς πίεσης (0,1bar) μεταξύ ανόδου και καθόδου, η μεμβράνη πιέζεται προς την άνοδο για να μειώσει τη μάζα που μεταφέρεται από την άνοδο στη μεμβράνη, όπου εξαιτίας της χαμηλότερης συγκέντρωσης ηλεκτρολύτη, η ηλεκτρική αντίσταση είναι μεγαλύτερη από την κάθοδο. Η απόσταση μεταξύ της καθόδου και της μεμβράνης είναι περίπου 1mm. Αυτές οι μονάδες ηλεκτρόλυσης λειτουργούν σε ατμοσφαιρικές πιέσεις και σε θερμοκρασία 80-95° [24,25,26].

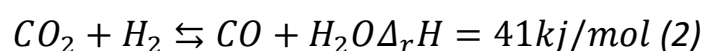
## 3.2. Μεθανοποίηση

### 3.2.1. Βασικές αρχές

Οι αντιδράσεις μεθανοποίησης του μονοξειδίου και του διοξειδίου του άνθρακα ανακαλύφθηκαν στις αρχές του 19ου αιώνα [5]. Σήμερα, οι αντιδράσεις αυτές εφαρμόζονται ευρέως στην παραγωγή αμμωνίας, ώστε να απομακρυνθούν ίχνη του μονοξειδίου του άνθρακα. Επίσης, τα διυλιστήρια κάνουν χρήση των αντιδράσεων μεθανοποίησης για τον καθαρισμό του υδρογόνου (αφαίρεση του μονοξειδίου του άνθρακα). Με το σημερινό αυξανόμενο ενδιαφέρον για την παραγωγή SNG από άνθρακα με αεριοποίηση, η αντίληψη της διαδικασίας της μεθανοποίησης έχει αλλάξει εντελώς. Ένας άλλος λόγος της αυξανόμενης σημασίας της διαδικασίας της μεθανοποίησης είναι η ανάγκη για την αποθήκευση περίσσειας ηλεκτρικής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές [6,7]. Πολλές από τις εφαρμογές που έχουν αναπτυχθεί για να απομακρύνουν το μονοξείδιο του άνθρακα που μετατρέπεται σε μεθάνιο, μπορούν εύκολα να τροποποιηθούν σε διεργασίες όπου το διοξείδιο του άνθρακα και το υδρογόνο χρησιμοποιούνται ως πρώτη ύλη. Η μεθανοποίησης του διοξειδίου του άνθρακα είναι μία εξώθερμη καταλυτική αντίδραση και τυπικά λειτουργεί σε θερμοκρασίες μεταξύ 200 ° C και 550 ° C ανάλογα με τον χρησιμοποιούμενο καταλύτη:

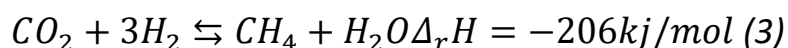


Ένας μηχανισμός αντίδρασης δύο σταδίων υποτίθεται για την αντίδραση αυτή. Στο πρώτο βήμα, το διοξείδιο του άνθρακα και το υδρογόνο μετατρέπονται σε μονοξείδιο του άνθρακα και νερό μέσω της αντίδρασης μετατόπισης νερού-αερίου.

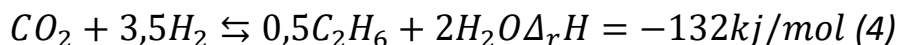


Σε μετέπειτα αντίδραση, μεθάνιο σχηματίζεται από μονοξείδιο του άνθρακα και υδρογόνο:

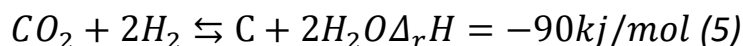




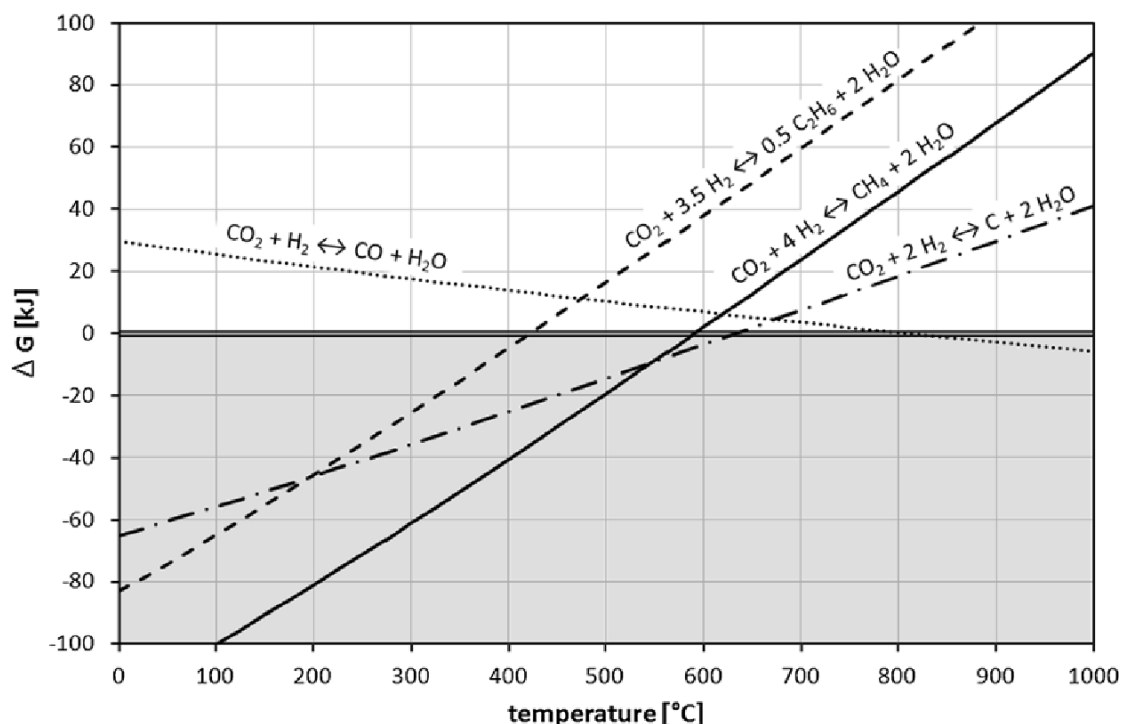
Εκτός από μεθάνιο και νερό, κορεσμένοι υδρογονάνθρακες μπορούν να βρεθούν στα προϊόντα.



Υπό ορισμένες συνθήκες διεργασίας, καθίζηση άνθρακα μπορεί να συμβεί σύμφωνα με τον ακόλουθο μηχανισμό αντίδρασης:



Μια κατάλληλη ποσότητα για να εκτιμηθεί ποίο από τα παραπάνω προϊόντα αναμένεται σε μία ορισμένη θερμοκρασία είναι η ελεύθερη ενέργεια Gibbs Δg. Το παρακάτω σχήμα συνοψίζει την ανάπτυξη της ενθαλπίας Gibbs με τη θερμοκρασία για όλες τις παραπάνω αντιδράσεις[8].

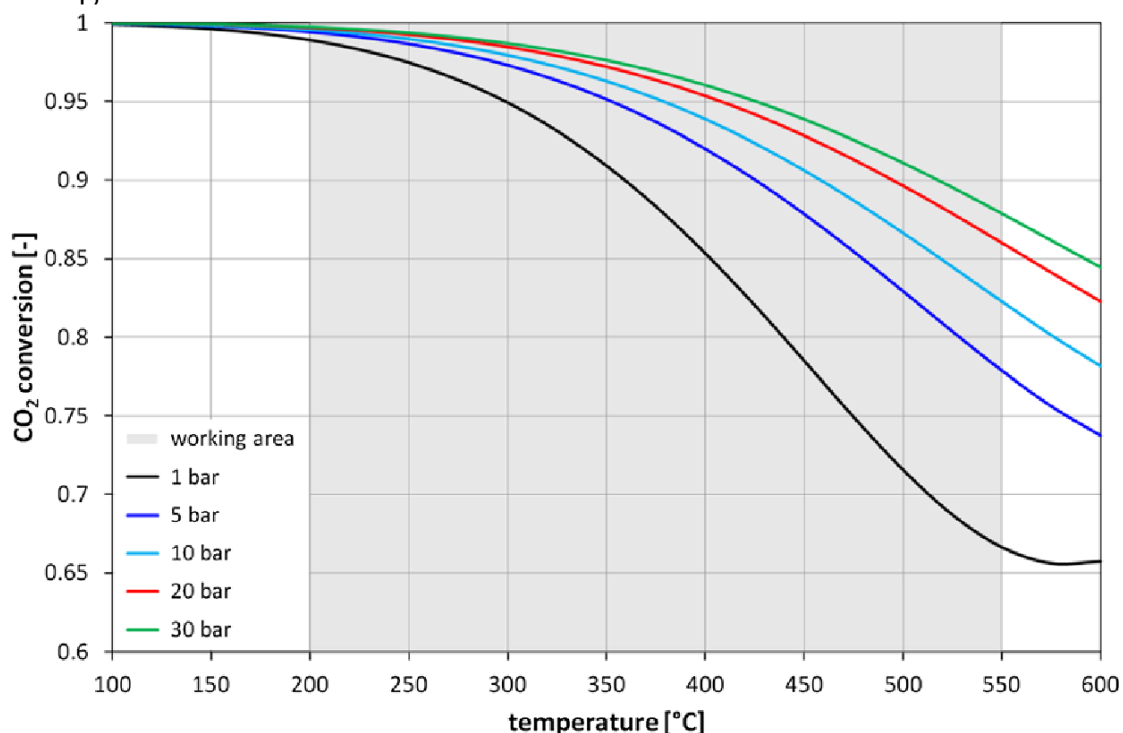


Εικόνα 20: Ελεύθερη ενέργεια Gibbs ως συνάρτηση της θερμοκρασίας. [8]

Μία αντίδραση είναι σε ισορροπία, αν  $\Delta G=0$ . Για  $\Delta G<0$  (γκρι περιοχή στο διάγραμμα), η αντίστοιχη αντίδραση ευνοείται και η ισορροπία μετατοπίζεται προς τα προϊόντα. Αν  $\Delta G>0$ , η ισορροπία μετατοπίζεται προς τα αντιδρώντα. Όπως φαίνεται ο σχηματισμός μεθανίου από διοξείδιο του άνθρακα και υδρογόνο ευνοείται πάνω από τους 600 ° C. Ο σχηματισμός μονοξειδίου του άνθρακα, από την άλλη πλευρά, ευνοείται σε θερμοκρασίες πάνω από 800 ° C. Συνεπώς, η μέθοδος θα πρέπει να τρέξει σε πολλαπλά στάδια για να διατηρηθεί η

θερμοκρασία, και κατά συνέπεια, η συγκέντρωση του μονοξειδίου του άνθρακα χαμηλή (η αντίδραση μεθανοποίησης είναι εξώθερμη). Καθώς ο σχηματισμός του αιθανίου δεν ευνοείται σε θερμοκρασίες άνω των 400 ° C, χαμηλή συγκέντρωση αιθανίου αναμένεται σε αυξημένες θερμοκρασίες.

Έκτος από την επίδραση της θερμοκρασίας, πρέπει να ληφθεί υπόψη και η πίεση της αντίδρασης της μεθανοποίησης. Στο σχήμα που ακολουθεί απεικονίζεται η μετατροπή του διοξειδίου του άνθρακα συναρτήσει της θερμοκρασίας και της πίεσης.



Εικόνα 21: Μετατροπή CO<sub>2</sub> ως συνάρτηση της θερμοκρασίας και της πίεσης. [9]

Παρατηρείται ότι η μετατροπή τού διοξειδίου του άνθρακα αυξάνεται με την αύξηση της πίεσης και τη μείωση της θερμοκρασίας. Για παράδειγμα, σε ατμοσφαιρική πίεση 1bar και σε θερμοκρασία 450° C, θα μπορούσε να επιτευχθεί μια μετατροπή διοξειδίου του άνθρακα 78%. Ωστόσο, η διαδικασία σύνθεσης μεθανίου, απαιτεί υψηλότερες μετατροπές διοξειδίου του άνθρακα. Με μία απλή ενός σταδίου διαδικασία, αυξημένες μετατροπές μπορούν να επιτευχθούν μόνο σε χαμηλότερες θερμοκρασίες και υψηλότερες πιέσεις.

Αυξάνοντας την πίεση στα 20bar και διατηρώντας τη θερμοκρασία στους 450° C, η μετατροπή του CO<sub>2</sub> φτάνει περίπου στο 93%. Μία περαιτέρω αύξηση της πίεσης δεν αυξάνει σημαντικά την απόδοση του μεθανίου.

Εκτός από αυτές τις καθαρά θερμοδυναμικές εκτιμήσεις, η επιλογή των καταλυτών έχει σημαντική επίδραση στην αντίδραση μεθανοποίησης. Το νικέλιο χρησιμοποιείται κυρίως λόγω της υψηλής δραστηριότητας και της συγκριτικά χαμηλής τιμής του. Ο καταλύτης νικελίου πρέπει να πληροί κάποιες σημαντικές συνθήκες: το υλικό πρέπει να είναι σε θέση να αντέξει γρήγορες αλλαγές της

θερμοκρασίας μεταξύ 50° C και 100° C που απαιτούνται μέσα σε λίγα δευτερόλεπτα και που προκαλούνται από τις αλλαγές του σημείου λειτουργίας. Θερμοκρασίες λειτουργίας κάτω από 200° C δεν επιτρέπονται υπό την παρουσία ενός καταλύτη με βάση το νικέλιο, λόγω του πιθανού σχηματισμού εξαιρετικά τοξικού καρβουνυλίου του νικελίου από μονοξείδιο του άνθρακα. Η θερμοκρασία λειτουργίας, δεν πρέπει από την άλλη πλευρά, να ξεπερνά τους 550° C, ώστε να αποφευχθεί η απενεργοποίηση του καταλύτη από τον σχηματισμό άνθρακα ή τη συσσωμάτωση. Για τους λόγους αυτούς, το εύρος των πιθανών θερμοκρασιών στον αντιδραστήρα μεθανοποίησης είναι σαφώς καθορισμένο. Το παραπάνω σχήμα αστικοποιεί το εύρος θερμοκρασίας λειτουργίας του καταλύτη με ένα γκρίζο πλαίσιο. Για να αποφευχθεί η υποβάθμιση του καταλύτη από δηλητήρια, όπως θείο ή σιλοξάνιο, απαιτείται μια στρατηγική καθαρισμού με αέριο έναντι του αντιδραστήρα μεθανοποίησης [9,10].

### 3.2.2. Σχεδίαση αντιδραστήρα μεθανοποίησης

Λόγω της εξαιρετικά εξώθερμης φύσης της αντίδρασης μεθανοποίησης, ο σχεδιασμός του αντιδραστήρα είναι ζωτικής σημασίας ώστε να είναι σε θέση να έχει θερμικό έλεγχο του συστήματος. Υπάρχουν βασικά δύο τύπου αντιδραστήρων που μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε αυτή τη διαδικασία: δύο φάσεων αντιδραστήρες σταθερής κλίνης και αντιδραστήρες ρευστοστερεής κλίνης. Οποιαδήποτε σχεδίαση αντιδραστήρα επιλεγεί, η παραγόμενη θερμότητα από την αντίδραση μεθανοποίησης, θα πρέπει συνεχώς να απομακρύνεται συνεχώς από τον αντιδραστήρα. Για τη μεθανοποίηση του διοξειδίου του άνθρακα (αντίδραση εξίσωση , μια αύξηση του μοριακού αερίου κλάσματος του μεθανίου κατά 1% στο παράγον αέριο επάγει αύξηση της θερμοκρασίας κατά περίπου 60 K. Ένας αποτελεσματικός τρόπος για τη μείωση θερμοκρασιών στον αντιδραστήρα, είναι η μείωση της αντιδρώσας τροφοδοσίας μέσω της ελεγχόμενης διάλυσης του εισερχόμενου αντιδρώντος ρεύματος αερίου. Αυτό μπορεί να πραγματοποιηθεί με ψύξη και επανακυκλοφορία ενός τμήματος του εξερχόμενου αντιδρώντος ρεύματος αερίου. Ψύξη του παραγόμενου αερίου, ωστόσο, προκαλεί ανεπιθύμητες απώλειες ενέργειας. Μια εναλλακτική λύση είναι η ισόθερμη λειτουργία του αντιδραστήρα. Σε αυτή την περίπτωση, ένας ψυχόμενος αντιδραστήρας απαιτείται για τη μεταφορά της θερμότητας αντίδρασης, από τη ζώνη αντίδρασης, σε ένα ψυχόμενο μέσο. Ωστόσο, λόγω της έντονης εξώθερμης φύσης της αντίδρασης μεθανοποίησης και της περιορισμένης ακτινικής και αξονικής μεταφοράς θερμότητας σε έναν αντιδραστήρα σταθερής κλίνης, είναι δύσκολο να λειτουργήσει ένας μονός αντιδραστήρας σταθερής κλίνης υπό ισόθερμες συνθήκες. Για τον καλό έλεγχο της θερμοκρασίας της αντίδρασης σε ένα αντιδραστήρα σταθερής κλίνης, τουλάχιστον δύο αδιαβατικοί αντιδραστήρες πρέπει να συνδέονται σε σειρά. Ο έλεγχος της θερμοκρασίας μπορεί να πραγματοποιηθεί με επανακυκλοφορία του εξερχόμενου ρεύματος αερίου και από τα ενδιάμεσα στάδια ψύξης. Ως εναλλακτική εναλλακτική

λύση είναι οι αντιδραστήρες ρευστοστερεής κλίνης. Σε αυτούς τους αντιδραστήρες, η αντίδραση μεθανοποίησης λαμβάνει χώρα εντός μίας ρευστοστερεής κλίνης των σωματιδίων του καταλύτη. Λόγω της πολύ καλής ανάμιξης του αερίου και των στερεών σωματιδίων του καταλύτη, μεγάλη μάζα, μεταφορά θερμότητας και σχεδόν ισόθερμες συνθήκες μπορούν να επιτευχθούν. Ένα περαιτέρω πλεονέκτημα είναι ο πολύ καλός έλεγχος της διαδικασίας. Ωστόσο παρατηρείται τριβή και παράσυρση σωματιδίων καταλύτη στο αέριο [11,12].

Process number	Process/company	Reactor type	Process stages	Operation range		Feed
				p (bar)	T (°C)	
(a)	TREMP/Haldor Topsøe	Fixed bed	3	30	300...700	Coal, petrol coke, biomass
(b)	Hicom/British Gas Corp.	Fixed bed	4	25...70	230...640	Coal
(c)	RMP/Ralph M. Parson Co.	Fixed bed	4...6	1...70	315...780	Coal, heavy fuel
(d)	SuperMeth, ConoMeth/Conoco	Fixed bed	4/4	Approximately 80	n. s.	Coal
(e)	CRG/British Gas Corp.	Fixed bed	2	Approximately 25	300	Naphtha (refinery residue)
(f)	Hugas/Institute of Gas Technology	Fixed bed	2	70	280...480	Coal
(g)	Lurgi, Sasol/Lurgi GmbH	Fixed bed	2	18	Approximately 450	Coal
(h)	ICI, Koppers/Imperial Chemical Industries	Fixed bed	3		400...700	Coal
(i)	Linde/Linde AG	Fixed bed	2	n. s.	n. s.	Coal
(j)	Bi-Gas/Bituminous Coal Res. Inc.	Fluidized bed	1	86	n. s.	Coal
(k)	Bureau of Mines/US department of the Interior	Fluidized bed		20	200...400	
(l)	Comflux/Thysengas GmbH	Fluidized bed	1	20...60	400...500	Coal (biomass)

Πίνακας 1: Αναπτυγμένες μέθοδοι σταθερής και ρευστοστερεής κλίνης μεθανοποίησης. [11]

Όλες οι διαδικασίες που παρουσιάζονται χρησιμοποιούν ως πρώτη ύλη άνθρακα ή νάφθα. Σημαντικές εξελίξεις στο πεδίο της παραγωγής SNG από άνθρακα ή νάφθα σημειώθηκαν μεταξύ της δεκαετίας 60 και 80. Οι διεργασίες που χρησιμοποιούν αντιδραστήρες σταθερής κλίνης παρατηρείται ότι είναι τουλάχιστον δύο σταδίων. Οι διαδικασίες (a), (b), (d) και (g) χρησιμοποιούν μια ατελή ανακυκλοφόρηση παραγωγικού αερίου με ενδιάμεσα στάδια ψύξης με σκοπό τον βέλτιστο έλεγχο θερμοκρασίας στο εσωτερικό των αντιδραστήρων. Η διαδικασία (i) αποτελείται από έναν ισοθερμικό, σταθερής κλίνης αντιδραστήρα, με ένα εναλλάκτη θερμότητας και από ένα αδιαβατικό αντιδραστήρα σταθερής κλίνης με στόχο την αύξηση της συνολικής απόδοσης μεθανίου. Μια διαδικασία μεθανοποίησης υψηλής θερμοκρασίας που αποτελείται από τρεις αδιαβατικούς αντιδραστήρες σε σειρά αναπτύχθηκε από την ICI (h). Το αμερικάνικο γραφείο μεταλλείων ανέπτυξε δύο διαφορετικούς αντιδραστήρες ρευστοστερεής κλίνης, οποίοι είναι εξοπλισμένοι με διαφορετικά συστήματα τροφοδοσίας αερίου (k). Ο πρώτος είναι ένας αντιδραστήρας με εσωτερική διάμετρο 19mm και μία είσοδο αερίου. Ο δεύτερος αντιδραστήρας είναι εσωτερικής διαμέτρου 25,4mm και περιέχει τρεις εισόδους αερίου που βρίσκονται στο κάτω μέρος. Ο αντιδραστήρας ρευστοστερεής κλίνης (j), από την άλλη πλευρά, περιέχει δύο εισόδους τροφοδοσίας και δύο εναλλάκτες θερμότητας. Έχει διάμετρο 0.4m και λειτουργούσε για εκατοντάδες ώρες μεταξύ

του 1977 και 1981. Το 1982, ένας προεμπορικός αντιδραστήρας διαμέτρου 1m κατασκευάστηκε και τέθηκε σε λειτουργία. Έκτοτε, η έννοια της διαδικασίας μπορεί να αποδοθεί σε μια βιομηχανική κλίμακα με ρυθμό παραγωγής  $2000\text{m}^3/\text{h}$  συνθετικού φυσικού αερίου.

Τόσο οι τεχνολογικές όσο και οι οικονομικές προκλήσεις δεν επιτρέπουν την εκτεταμένη εμπορική εκμετάλλευση των παραπάνω σεναρίων. Παγκοσμίως, μόνο μία εμπορική μονάδα μεθανοποίησης έχει κατασκευαστεί μέχρι στιγμής. Τέθηκε σε λειτουργία το 1984 στη Βόρεια Ντακότα (g). Αρχικά, το εργοστάσιο σχεδιάστηκε για την παραγωγή  $3,54$  εκατ  $\text{m}^3$ / ημέρα συνθετικού φυσικού αερίου. Μία συνεχή βελτίωση της διαδικασίας κατά τη διάρκεια της δεκαετίας του 90 αύξησε την παραγωγή στα  $4,81$  εκατ  $\text{m}^3$ /ημέρα. Το εργοστάσιο βρίσκεται ακόμα σε λειτουργία [12].

### **3.2.3. Πρόσφατες ερευνητικές δραστηριότητες**

Η αυξανόμενη επιθυμία για ανεξαρτησία από εισαγωγή φυσικού αερίου από ορισμένες χώρες μαζί με τις αυξανόμενες τιμές του φυσικού αερίου, έχουν αναβιώσει έντονα τις δραστηριότητες στον τομέα της παραγωγής συνθετικού φυσικού αερίου από άνθρακα και βιομάζα. Ειδικά στην Κίνα και στις Ηνωμένες Πολιτείες, τεράστιες προσπάθειες έχουν γίνει για να αυξηθεί η παραγωγή SNG. Στις Ηνωμένες Πολιτείες, κάποιες νέα σενάρια στη διαδικασία μεθανοποίησης, όπως η υδρομεθανοποίηση, οι εναλλακτικοί ρευστοστερεής κλίνης αντιδραστήρες καθώς και σενάρια χωρίς καταλύτες έχουν αναπτυχθεί τα τελευταία χρόνια. Το ιστορικό ανάπτυξης διαδικασιών σύνθεσης SNG με βάση τη βιομάζα είναι πολύ μικρότερο από αυτό του άνθρακα. Η σημερινή και η μελλοντική ανάγκη για την αποθήκευση ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές, όπως αιολικά και ηλιακά εργοστάσια, συμβάλλει στον σχεδιασμό νέων καινοτόμων διαδικασιών μεθανοποίησης [13,14,15].

## **3.3. Δέσμευση και διαχωρισμός διοξειδίου του άνθρακα**

### **3.3.1. Διαχωρισμός μέσω προσρόφησης**

Η προσρόφηση (adsorption) είναι μία διεργασία κατά την οποία ένα ή περισσότερα συστατικά που περιλαμβάνονται σε ένα υγρό ή αέριο ρεύμα μεταφέρονται εκλεκτικά στην επιφάνεια (την εξωτερική ή/και των πόρων που συνήθως υπάρχουν) στερεών σωματιδίων που είναι αδιάλυτα στο ρευστό τροφοδοσίας. Η προσρόφηση ανήκει στην κατηγορία διαχωρισμών μέσω στερεών μέσων (solid agent), δεδομένου ότι το μέσο αυτό προκαλεί το διαχωρισμό του μίγματος, και είναι συγγενής διεργασία με την εναλλαγή ιόντων και τη χρωματογραφία. Οι διεργασίες αυτές στην πράξη δε λειτουργούν σε μόνιμη κατάσταση και σε συνθήκες ισορροπίας αλλά αντίθετα είναι από τη φύση τους ασυνεχείς καθώς εμφανίζουν λειτουργικούς κύκλους που περιλαμβάνουν το στάδιο της επεξεργασίας της τροφοδοσίας και το

στάδιο της αναγέννησης. Προκειμένου να υλοποιηθεί η προσρόφηση είναι απαραίτητη η ύπαρξη ενός κατάλληλου υλικού που χαρακτηρίζεται ως προσροφητικό (adsorbent) και πρέπει να έχει τη δυνατότητα να σχηματίζει δεσμούς ανάμεσα στην επιφάνειά του και τα μόρια, άτομα ή ιόντα των ουσιών της τροφοδοσίας (adsorbate) που επιζητείται να απομακρυνθούν ή να τις συγκρατεί με ασθενείς διαμοριακές δυνάμεις. Η δυνατότητα του προσροφητικού υλικού να προσελκύει ορισμένα μόνο συστατικά (πολλές φορές μόνο κάποιο συγκεκριμένο) από ένα ρευστό αλλά όχι τα υπόλοιπα αποτελεί τη βάση για την εφαρμογή της μεθόδου σε διαχωρισμούς. Η ύπαρξη πόρων θεωρείται πολύ σημαντική καθώς αυξάνει την επιφάνεια προσρόφησης ανά μονάδα όγκου. Το προσροφητικό υλικό μπορεί να αποτελεί το πληρωτικό υλικό κάποιας στήλης ή να αιωρείται σε κάποιο δοχείο ώστε να επιτευχθεί η ανάμιξή του με το ρευστό προς επεξεργασία. Πρέπει να τονιστεί ότι το πληρωτικό υλικό στην περίπτωση αυτή είναι εκείνο που προκαλεί το διαχωρισμό, ενώ το πληρωτικό υλικό (packing material) στις στήλες απορρόφησης ή απόσταξης είναι αδρανές ως προς το ρευστό επεξεργασίας και απλά αυξάνει τη διεπιφάνεια επαφής και κατ' επέκταση το συντελεστή μεταφοράς μάζας μεταξύ των φάσεων της διεργασίας. Στην απορρόφηση το πληρωτικό-προσροφητικό υλικό συμμετέχει στο διαχωρισμό με τη συγκράτηση της ανακτώμενης ουσίας στην επιφάνεια του και για αυτό το λόγο καθίσταται κορεσμένο ύστερα από κάποιο χρόνο λειτουργίας και χρειάζεται αναγέννηση για την απομάκρυνση της ουσίας από το προσροφητικό υλικό [16].

Η διεργασία της προσρόφησης βρίσκει σημαντικές εφαρμογές τόσο στο διαχωρισμό όσο και στον εξευγενισμό υγρών και αερίων μιγμάτων. Γενικά σκοπεύει είτε στην απομάκρυνση ουσιών που περιέχονται σε ρευστά σε σχετικά μικρές αναλογίες με σκοπό τον καθαρισμό των ρευστών ή στην ανάκτηση ουσιών που περιέχονται σε ρευστά. Στην περίπτωση των υγρών συστημάτων χρησιμοποιείται για το διαχωρισμό κανονικών (n-) κορεσμένων υδρογονανθράκων (παραφινών) από ίσο (i-) κορεσμένους υδρογονάνθρακες (ισοπαραφίνες) ή αλκένια (ολεφίνες), της φρουκτόζης από την δεξτρόζη και τους πολυσακχαρίτες, του μ- και π-κουμηνίου και της μ- και π-κρεσόλης από ενώσεις ισομερείς του κουμηνίου και της κρεσόλης, αντίστοιχα, του π-ξυλολίου από άλλες αρωματικές ενώσεις C-8, για τον καθαρισμό οργανικών διαλυμάτων από ενώσεις του θείου ή υπολείμματα νερού ή αντίστροφα την απαλλαγή του νερού από οργανικές μολύνσεις και τον αποχρωματισμό διαφόρων διαλυμάτων. Στην περίπτωση των αερίων συστημάτων η προσρόφηση εφαρμόζεται για το διαχωρισμό διαφόρων μιγμάτων όπως αζώτου - οξυγόνου, νερού - αιθανόλης, αιθυλενίου και ακετόνης από αέρια ρεύματα κανονικών κορεσμένων υδρογονανθράκων από ίσο κορεσμένους και αρωματικούς υδρογονάνθρακες, για την απομάκρυνση μονοξειδίου και διοξειδίου του άνθρακα, μεθανίου, αμμωνίας, αζώτου, υδρογόνου και άλλων αερίων από μίγματα, τον καθαρισμό του φυσικού αερίου από διοξείδιο του άνθρακα, του αζώτου από τα

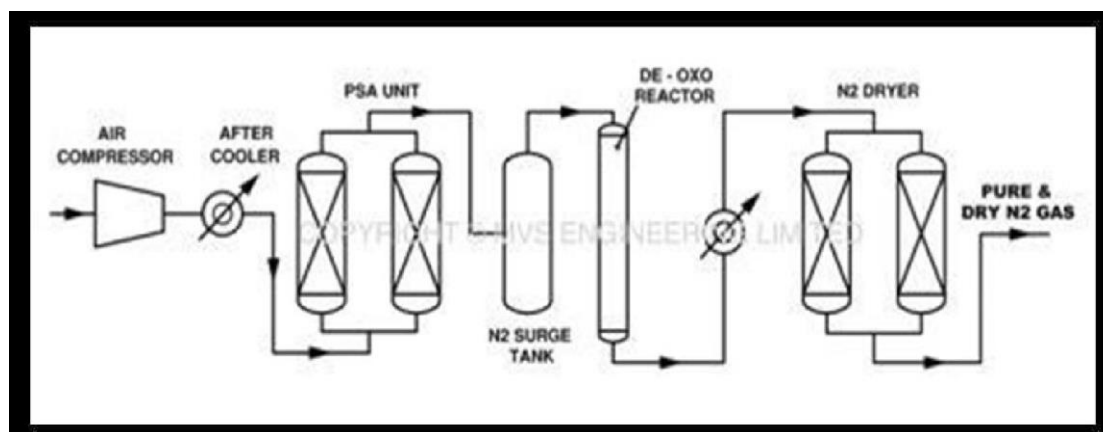
οξειδιά του, του αέρα από οσμηρές ουσίες και ατμούς διαλυτών, του αέρα και διαφόρων αερίων ρευμάτων από τους υδρατμούς, αερίων ρευμάτων από οργανικές ενώσεις, διοξείδιο και λοιπές ενώσεις του θείου. Η απλούστερη εφαρμογή της προσρόφησης αναφέρεται στα οικιακά φίλτρα άνθρακα για τον καθαρισμό του πόσιμου νερού. Είναι χαρακτηριστικό ότι η διεργασία αυτή, όπως και οι υπόλοιπες διεργασίες ρόφησης, χρησιμοποιούνται συνήθως για την επεξεργασία πολύ αραιών μιγμάτων ή μιγμάτων που διαχωρίζονται δύσκολα με τις κλασικές διεργασίες διαχωρισμών όπως η απόσταξη και η εκχύλιση οι οποίες είτε είναι πολύ δαπανηρές στις περιπτώσεις αυτές ή δε δίνουν την επιθυμητή καθαρότητα [17].

### 3.3.2. Τεχνολογίες προσρόφησης

Οι εμπορικές τεχνολογίες διαχωρισμού αερίων μέσω προσρόφησης δουλεύουν μέσω της μεθόδου της εναλλαγής (swing). Με τη χρήση δύο βημάτων ανά κύκλο, στα οποία εναλλάσσεται μία από τις παραμέτρους της σταθεράς προσρόφησης, πραγματοποιείται προσρόφηση και κατόπιν εκρόφηση και αναγέννηση του προσροφητικού. Οι κυριότερες εμπορικές τεχνολογίες είναι μέσω εναλλαγής πίεσης και μέσω εναλλαγής θερμοκρασίας.

#### 3.3.2.1. Προσρόφηση με εναλλαγή πίεσης-PSA

Όταν η αναγέννηση του προσροφητικού γίνεται μειώνοντας την ολική πίεση του συστήματος, η διεργασία ορίζεται ως προσρόφηση με εναλλαγή πίεσης (PSA), λόγω της εναλλαγής μεταξύ της υψηλής πίεσης της τροφοδοσίας και της χαμηλής πίεσης της αναγέννησης. Η ιδέα κατοχυρώθηκε ως πατέντα το 1932, μα η πρώτη εφαρμογή δε παρουσιάστηκε παρά 30 χρόνια αργότερα.



Εικόνα 22: Διάταξη διαχωρισμού αερίων μέσω PSA. [18]

Όσο υψηλότερη η πίεση, τόσο περισσότερο αέριο μπορεί να προσροφηθεί μέχρις ότου να κορεστεί το προσροφητικό. Τυπικές τιμές πίεσης για το στάδιο της προσρόφησης είναι 10-40 bar ενώ για το στάδιο της εκρόφησης λίγο άνω της ατμοσφαιρικής -η θερμοκρασία λειτουργίας είναι επίσης παραπλήσια της



θερμοκρασίας δωματίου και επιθυμείται να διατηρείται πρακτικά σταθερή κατά το κύκλο.

Συνήθως, η PSA προτιμάται από άλλες διεργασίες όταν η συγκέντρωση των συστατικών προς αφαίρεση είναι σημαντική (από 1-2 % και άνω). Σε τέτοιες συνθήκες, επιτυγχάνεται γρήγορη πλήρωση της στήλης με το βαρύ συστατικό και, καθώς η πίεση μπορεί να μεταβληθεί γρήγορα, ο χρόνος μεταξύ προσρόφησης και αναγέννησης είναι ισορροπημένος. Για χαμηλότερες συγκεντρώσεις, το στάδιο της προσρόφησης μπορεί να διαρκέσει πολύ περισσότερο, οπότε κι άλλες επιλογές όπως η TSA πρέπει να λαμβάνονται υπόψιν.

Ένας σημαντικός παράγοντας που θα πρέπει επίσης να λαμβάνεται υπόψιν είναι τα θερμικά φαινόμενα που εμφανίζονται στα δύο στάδια. Εάν προηγείται η συμπίεση για να επιτευχθεί η υψηλή πίεση του πρώτου σταδίου θα εκλύεται και θερμότητα, ενώ κατά την αποτόνωση του

δευτέρου σταδίου θα καταναλώνεται θερμότητα. Τα φαινόμενα αυτά υποβαθμίζουν την ικανότητα προσρόφησης και εκρόφησης αντίστοιχα, ενώ η απόδοση του αδιαβατικού κύκλου είναι πάντα μειωμένη σε σχέση με του ισοθερμοκρασιακού. Μπορεί βέβαια να προβλεφθεί στο σχεδιασμό η αντιστάθμιση της καταναλισκόμενης θερμότητας κατά την εκρόφηση από την παραγόμενη κατά τη προσρόφηση.

Κατά την διαδικασία δέσμευσης CO<sub>2</sub> σε πυκνότητα 40% κατ' όγκον με την τεχνολογία PSA απαιτείται κατανάλωση ενέργειας 0,22-0,25 kWh/m<sup>3</sup> των καυσαερίων που διατίθενται από διάφορες πηγές παραδείγματος χάρη από σταθμούς καύσης βιομάζας, μπορούμε να βρούμε την αντίστοιχη ενέργεια για την δέσμευση του από τσιμεντοβιομηχανίες χαλυβουργίες κ.α.

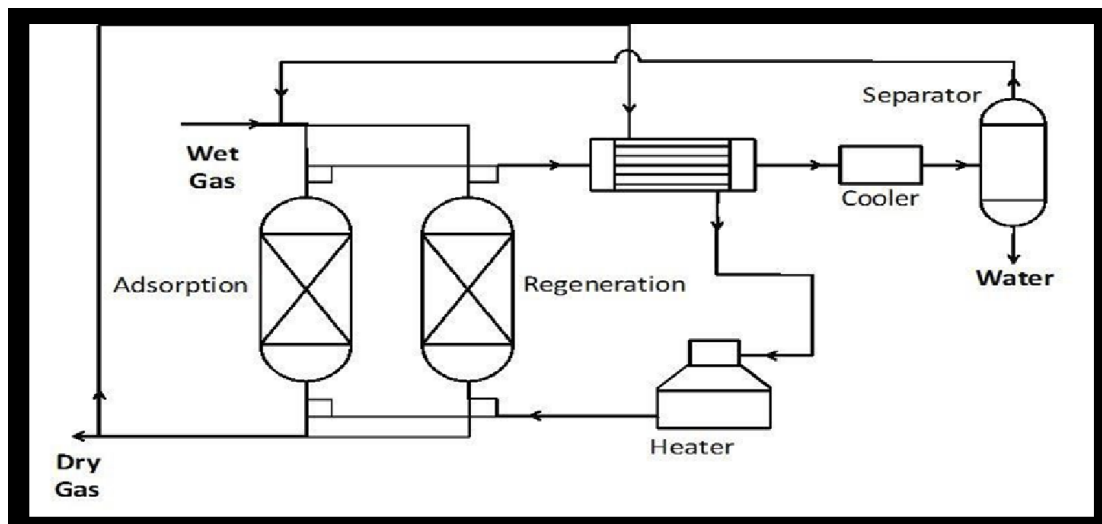
Η διάρκεια ενός τυπικού κύκλου είναι της τάξης των 10 λεπτών. Κατά το χρόνο αυτό, το προσροφητικό χρησιμοποιείται τόσο για τη προσρόφηση όσο και για την εκρόφηση μιας συγκεκριμένης ποσότητας αερίου. Σε κάθε στήλη, η ποσότητα που προσροφήθηκε κατανέμεται σε μια αρχική ζώνη, όπου επιτευχθεί η ισορροπία, και σε μία ζώνη "μεταφοράς μάζας" προς το τέλος της στήλης, όπου το προσροφητικό δεν είναι πλήρως κορεσμένο. Η δεύτερη αυτή ζώνη σχετίζεται με κινητικούς περιορισμούς διάχυσης κατά μήκος του προσροφητικού και αξονικής διασποράς [18].

### **3.3.2.2. Προσρόφηση με εναλλαγή θερμοκρασίας-TSA**

Η προσρόφηση με εναλλαγή θερμοκρασίας (TSA) είναι μια άλλη μέθοδος για την αναγέννηση μιας κλίνης προσροφητικού "φορτωμένου" με ένα προς καθαρισμό αέριο. Σαν διεργασία, έχει πατενταριστεί νωρίτερα από την PSA και χρησιμοποιείται εμπορικά από το '60 για τη ξήρανση συμπιεσμένου αέρα και φυσικού αερίου, καθώς και σε εφαρμογές καθαρισμού όπως το διοξείδιο του άνθρακα από τον αέρα.



Καθώς η αυξομείωση της θερμοκρασίας είναι εν γένει δυσκολότερη και γίνεται με αργότερους ρυθμούς συγκριτικά με της πίεσης, ο τυπικός κύκλος της διεργασίας αυτής διαρκεί περισσότερο (μερικές ώρες). Αυτό οφείλεται στο ότι απαιτείται χρόνος κατά τη ψύξη και τη θέρμανση για τη συναλλαγή της θερμότητας, που απαιτείται για τη προσρόφηση και την εκρόφηση αντίστοιχα. Η διάταξη της μεθόδου παρουσιάζεται στην παρακάτω Εικόνα.



Εικόνα 23: Διάταξη διαχωρισμού αερίων μέσω TSA. [19]

Η ικανότητα προσρόφησης επηρεάζεται αντίστροφα από τη θερμοκρασία απ' ό,τι με την πίεση έτσι, η αναγέννηση επιτυγχάνεται μέσω της αύξησης της θερμοκρασίας. Στο πρώτο στάδιο, η προσρόφηση λαμβάνει χώρα σε χαμηλές θερμοκρασίες της τάξης των 40°C ενώ στο δεύτερο, η εκρόφηση πραγματοποιείται αυξάνοντας τη θερμοκρασία άνω των 120°C. Προτού μπορέσει να επαναληφθεί ο κύκλος, θα πρέπει η κλίνη να ξαναψυχθεί στην αρχική θερμοκρασία.

Σε αντίθεση με την PSA, η TSA προτιμάται όταν οι συγκεντρώσεις των ουσιών που επιθυμείται να αφαιρεθούν μέσω της δέσμευσής τους στο προσροφητικό (βαριές) είναι χαμηλές. Γενικότερα, η TSA προτιμάται έναντι της PSA στις εξής περιπτώσεις:

- Σε πιέσεις κάτω από 4 bar.
- Όταν τα λειτουργικά κόστη της PSA προκύπτουν πολύ υψηλά (η TSA συνήθως χαρακτηρίζεται από χαμηλότερα λειτουργικά μα μεγαλύτερα αρχικά κόστη).
- Όταν δεν είναι δυνατή η επίτευξη υψηλής καθαρότητας μέσω PSA, ενδέχεται να γίνεται μέσω TSA.

Γενικά, μια σχετικά μικρή μεταβολή της θερμοκρασίας μπορεί να επηρεάσει σε μεγάλο βαθμό την προσροφητική ικανότητα του υλικού. Μπορούν έτσι να αποφευχθούν πολύ υψηλές θερμοκρασίες, που θα μπορούσαν και να αλλοιώσουν το προσροφητικό υλικό [19,20].

## BIBLIOΓΡΑΦΙΑ

- [1] Specht M, Baumgart F, Feigl B, Frick V, Störmer B, Zuberböhler U (2010) Erdol Erdgas Kohle 10:342–346
- [2] Graf F (2010) DBI-Fachforum. Berlin, DBI - Gastechnologisches Institut gGmbH, Freiberg
- [3] BMWI (2012) Energiewende in Deutschland. <http://www.bmwi.de/Dateien/BMWi/PDF/energiewende-in-deutschland,property=pdf,bereich=bmwi2012,sprache=de,rwb=true.pdf>
- [4] DENA (2010) Endbericht dena Netzstudie II. [http://www.dena.de/fileadmin/user\\_upload/Presse/studien\\_umfragen/Netzstudie\\_II/Endbericht\\_dena-Netzstudie\\_II.pdf](http://www.dena.de/fileadmin/user_upload/Presse/studien_umfragen/Netzstudie_II/Endbericht_dena-Netzstudie_II.pdf)
- [5] Sabatier P, Senderens JB (1902) Direct hydrogenation of Oxides of Carbon in presence of various finely divided metals [in french]. C R Acad Sci 134:689–691
- [6] Appl M (1999) Ammonia: principles and industrial practice. Wiley-VCH, Weinheim, Chichester. ISBN 3527295933
- [7] Xu G, Chen X, Zhang ZG (2006) Temperature-staged methanation: an alternative method to purify hydrogen-rich fuel gas for PEFC. ChemEng J 121:97–107
- [8] Kóster H (1936) Reduction of carbon dioxide to methane upon iron catalysts at ordinary pressures. Brennstoff-Chemie 17:203–206
- [9] Pedersen K, Skov A, Rostrup Nielsen JR (1980) Symposium on catalytic reactions involving synthesis gas, Houston. pp 89–100, [https://web.anl.gov/PCS/acsfuel/preprint%20archive/Files/25\\_2\\_HOUSTON\\_03-80\\_0089.pdf](https://web.anl.gov/PCS/acsfuel/preprint%20archive/Files/25_2_HOUSTON_03-80_0089.pdf)
- [10] Boll W, Hochgesand G, Higman C, Supp E, Kalteier P, Móller W-D, Kriebel M, Schlichting H, Tanz H (2000) Ullmann's encyclopedia of industrial chemistry: gas production, 3. gas treating. Wiley-VCH, Weinheim. ISBN 9783527306732
- [11] Hedden K (1986) Fachinformationszentrum Energie. Physik, Mathematik, Karlsruhe
- [12] Kopyscinski J, Schildhauer TJ, Biollaz SMA (2010) Production of synthetic natural gas (SNG) from coal and dry biomass - a technology review from 1950 to 2009. Fuel 89(8):1763–1783
- [13] Ronsch S, Ortwein A (2011) Methanisierung von Synthesegasen – Grundlagen und Verfahrensentwicklungen. Chemie Ingenieur Technik 83(8):1200–1208

- [14] Sudiro M, Bertucco A (2010) Synthetic natural gas (SNG) from coal and biomass: a survey of existing process technologies, open issues and perspectives. Natural gas, InTech. ISBN 9789533071121
- [15] Krajete A (2013) DBI Fachforum Energiespeicher/Pilotprojekte, Berlin. DBI - Gastechnologisches Institut gGmbH, Freiberg
- [16] John Wiley & Sons Rousseau R.W. (ed.), Handbook of Separation Process Technology., Inc., 1987.
- [17] Benitez J., Principles and Modern Applications of Mass Transfer Operations, 2ed ed., John Wiley & Sons, Inc. Publication, 2009.
- [18] Ralph vanWissen, Michael Golombok, J.J.H. Brouwers , "Separation of carbon dioxide and methane in continuous countercurrent gas centrifuges"(2005), Chemical Engineering Science 60 (2005) 4397–4407.
- [19] Carlos A. Grande, "Advances in Pressure Swing Adsorption for Gas Separation" (2012), ISRN Chemical Engineering, Volume 2012 (2012), Article ID 982934
- [20] Gennady S. Burkhanov, Nelli B. Gorina, Natalia B. Kolchugina and Nataliya R. Roshan, "Palladium-Based Alloy Membranes for Separation of High Purity Hydrogen from Hydrogen-Containing Gas Mixtures" (2011), Platinum Metals Rev., 2011.
- [21] Neagu C, Jansen H, Gardeniers H, and Elwenspoek M, 2000, .The electrolysis of water: An actuation principle for MEMS with a big opportunity., Mechatronics: 571-581.
- [22] Kreuter W, and Hofmann H, 1998, .Electrolysis: the important energy transformer in a world of sustainable energy., Int. J. Hydrogen Energy 23(8): 661-666.
- [23] Stucki S, Scherer GG, Schlagowski S, Fischer E, 1998, .PEM water electrolyzers: evidence for membrane failure in 100 kW demonstration plants., J. Applied Electrochemistry, 28:1041-1049.
- [24] Proceedings of the 2001 DOE Hydrogen Program Review, NREL/CP-570-30535.
- [25] Van der Stegen JHG, Van der Veen AJ, Weerdenburg H, Hogendoorn JA, and Versteeg GF, 1999, .Application of the Maxwell-Stefan theory to the transport in ion-selective membranes used in the chlor-alkali electrolysis process., Chemical Engineering Science 54: 2501-2511.

## Κεφάλαιο 4: Μεθοδολογία ανάλυσης κύκλου ζωής (AKZ)

Με την όλο και περισσότερο ευαισθητοποίηση μεγάλου μέρους του πληθυσμού για τα θέματα που αφορούν το περιβάλλον, η ελαχιστοποίηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων από την παραγωγική διαδικασία έχει γίνει μέρος της προσπάθειας πολλών κρατών και οργανισμών.

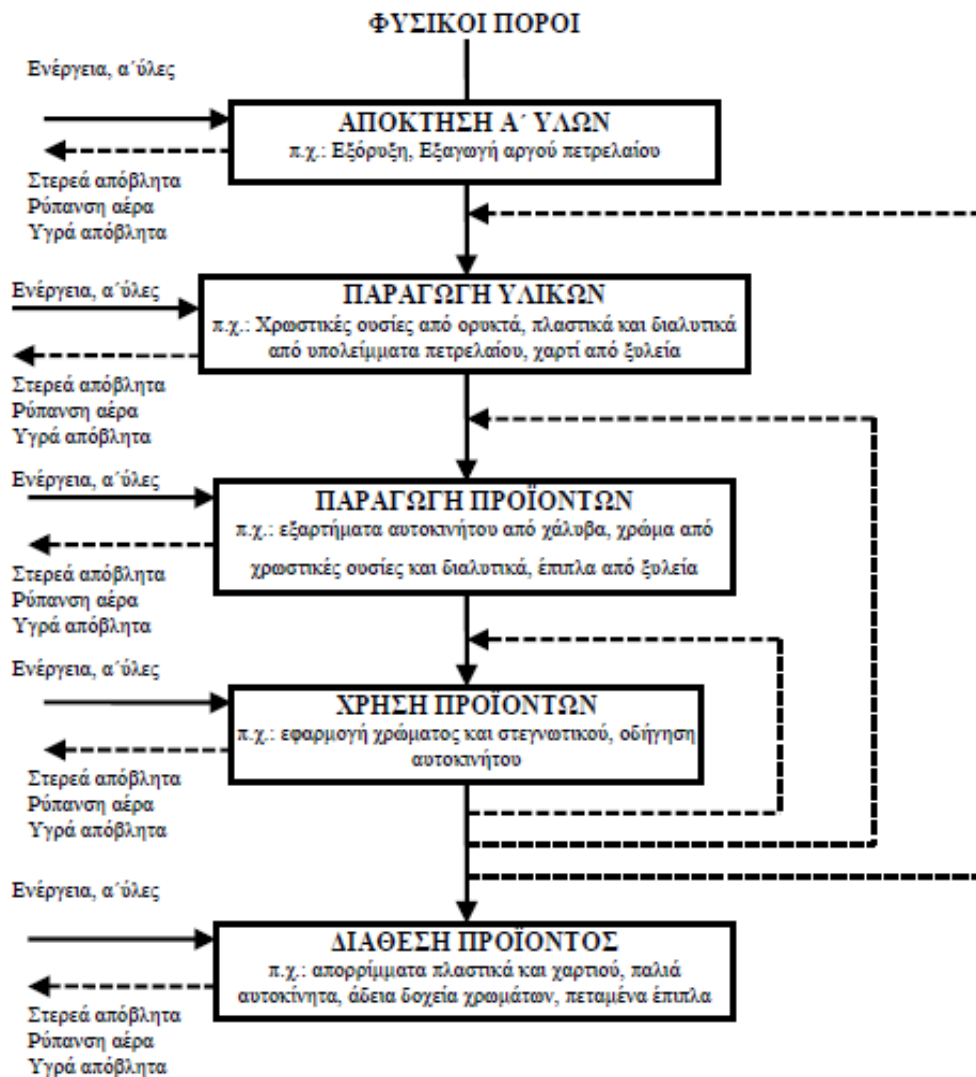
Ενώ μέχρι τώρα η αύξηση του κέρδους και η βελτίωση της ποιότητας του προϊόντος αποτελούσαν τον μοναδικό στόχο κάθε παραγωγικής διαδικασίας, παράγοντες όπως η ελάττωση των ρύπων και η διαχείριση των αποβλήτων αρχίζουν να παίζουν καθοριστικό ρόλο στην λειτουργία των παραγωγικών μονάδων.

Η δραστική ελάττωση της παραγωγής βιομηχανικών αποβλήτων, τοξικών ουσιών και καθ' επέκταση αστικών αποβλήτων μπορεί να γίνει μόνο με τον ανασχεδιασμό των προϊόντων και των φυσικών και χημικών διεργασιών. Για την ενσωμάτωση όλων των περιβαλλοντικών περιορισμών στον σχεδιασμό μιας παραγωγικής διαδικασίας ή κάποιας υπηρεσίας απαιτείται νέα προσέγγιση σχεδιασμού με κύριο στοιχείο την αναγνώριση και την κατάταξη των ρυπογόνων ροών από τις διεργασίες.

Η μελέτη Ανάλυσης Κύκλου Ζωής είναι ένα σύνολο συστηματικών διεργασιών με σκοπό την συλλογή και εξέταση των στοιχείων εισόδου και εξόδου των ενεργειακών ισοζυγίων και ισοζυγίων μάζας και των περιβαλλοντικών επιπτώσεων που συνδέονται με αυτά και προσδιορίζονται απευθείας μέσω της λειτουργίας του προϊόντος ή του συστήματος εξυπηρέτησης κατά την διάρκεια του κύκλου ζωής.

Η Ανάλυση Κύκλου Ζωής είναι ταυτόχρονα μια συλλογιστική, μια νέα σκέψη, ένα εργαλείο για την παρακολούθηση και αποτίμηση της περιβαλλοντικής επίδοσης ενός προϊόντος ή μιας διεργασίας ή μιας δράσης καθ' όλη την διάρκεια της ύπαρξης του από το σημείο της ανάκτησης της πρώτης ύλης μέχρι της τελικής διάθεσης είτε μέσω ανακύκλωσης ή καύσης ή απόρριψης ή παρασκευή λιπάσματος.

Το πολύ ισχυρό αυτό εργαλείο μπορεί να συμβάλει στη διαμόρφωση περιβαλλοντικών νόμων για την κατεύθυνση της ανάπτυξης και την χρήση προϊόντων, να βοηθήσει τους κατασκευαστές να αναλύσουν τις διεργασίες τους και να βελτιώσουν τα προϊόντα τους καθώς επίσης και να διευκολύνει τους καταναλωτές παρέχοντάς τους τις πληροφορίες που χρειάζονται όταν πρόκειται να επιλέξουν μεταξύ διαφορετικών προϊόντων [1].



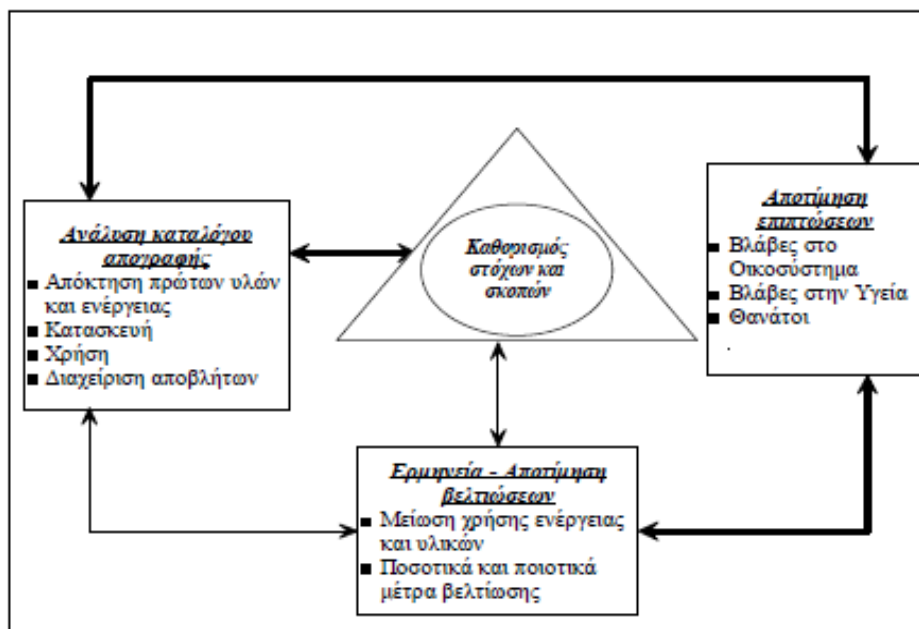
Εικόνα 24: Πλαίσιο απογραφής στην ΑΚΖ. [2]

Η SETAC (Society for Environmental Toxicology and Chemistry, 1991) έχει ορίσει την Ανάλυση Κύκλου Ζωής (ΑΚΖ) σαν “μια τεχνική εκτίμησης των περιβαλλοντικών επιβαρύνσεων που συνδέονται με κάποιο προϊόν, διεργασία ή δραστηριότητα προσδιορίζοντας και ποσοτικοποιώντας την ενέργεια και τα υλικά που χρησιμοποιούνται, καθώς και τα απόβλητα που απελευθερώνονται στο περιβάλλον, εκτιμώντας τις επιπτώσεις από την χρήση της ενέργειας και των υλικών καθώς και των αποβλήτων και αναγνωρίζοντας και εκτιμώντας τις δυνατότητες περιβαλλοντικών βελτιώσεων” [2].

#### 4.1. Μεθοδολογία

Η ΑΚΖ είναι ένα νέο εργαλείο ανάλυσης που βρίσκεται ακόμη σε εξέλιξη γι’ αυτό δεν είναι δυνατό να καθοριστούν αυστηροί κανόνες μεθοδολογίας. Η επιλογή των κατάλληλων μεθόδων για την εισαγωγή απλοποιήσεων ή του κατάλληλου επιπέδου ανάλυσης, εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τον σκοπό κάθε μιας μελέτης

ξεχωριστά. Το πλαίσιο μεθοδολογίας της ΑΚΖ που προτείνεται από τον SETAC (1991, 1992, και 1993) αποτελείται από τέσσερα βασικά στάδια: 1) τον προσδιορισμό του στόχου και της έκτασης της μελέτης, 2) την αναλυτική απογραφή δεδομένων, 3) την εκτίμηση επιπτώσεων και 4) την εκτίμηση βελτιώσεων.



Εικόνα 25: Ανάλυση κύκλου ζωής. [4]

Ο προσδιορισμός του στόχου και της έκτασης της μελέτης καθορίζεται από τον σκοπό, το αντικείμενο, και τη μελλοντική εφαρμογή της μελέτης που επηρεάζουν την κατεύθυνση, το βάθος της, και τις απαιτήσεις της τελικής αναφοράς και της επανεξέτασής της. Κατά την αναλυτική απογραφή του κύκλου ζωής, συλλέγονται και παρουσιάζονται δεδομένα στοιχείων εισόδου και εξόδου του υπό εξέταση συστήματος. Η ποιότητα των δεδομένων που χρησιμοποιούνται στις αναλυτικές απογραφές, αποτελεί υπόθεση υψίστης σημασίας λόγω της μεγάλης ανομοιομορφίας των πηγών προέλευσης και της ευρύτητας του αντικειμένου. Η εκτίμηση των επιπτώσεων δίνει μία προοπτική στα δεδομένα και στις πληροφορίες εισόδου και εξόδου. Χωρίς την εκτίμηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων των αποβλήτων, και της ελάττωσης των αποθεμάτων, είναι δύσκολο να γίνει κατανοητή η σχέση των δεδομένων εισόδου και εξόδου του συστήματος με το περιβάλλον, ή το όφελος από την επίτευξη βελτιώσεων στο σύστημα. Η εκτίμηση βελτιώσεων βοηθά στο να εξασφαλιστούν οι βέλτιστες δυνατές στρατηγικές μείωσης και τα προγράμματα βελτίωσης που δεν θα δημιουργούν επιπρόσθετες απρόβλεπτες επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία και την υγεία του περιβάλλοντος [4].

## 4.2. Σκοπός ανάλυσης κύκλου ζωής

### 4.2.1. Λειτουργική μονάδα

Ο καθορισμός της λειτουργικής μονάδας αποτελεί ένα θεμελιώδες βήμα για την αποφυγή ασαφειών κατά τη διατύπωση του σκοπού. Η λειτουργική μονάδα συντελεί στη δημιουργία μιας βάσης σύγκρισης μεταξύ διαφορετικών κύκλων ζωής προϊόντος, και μεταξύ διαφόρων σεναρίων ή υποθέσεων. Επίσης είναι ένα μέτρο απόδοσης του συστήματος. Θα πρέπει να είναι πλήρως καθορισμένη, μετρήσιμη και σχετική με τα δεδομένα εισόδου και εξόδου. Ένας εύκολος διαχωρισμός του συστήματος σε υποσυστήματα μπορεί να γίνει με βάση τα στάδια του κύκλου ζωής. Κάθε στάδιο ή διεργασία μπορεί να θεωρηθεί σαν ένα υποσύστημα του συνολικού συστήματος. Αντιμετωπίζοντας τα στάδια ως υποσυστήματα, διευκολύνεται η συγκέντρωση των δεδομένων για την αναλυτική απογραφή του όλου συστήματος. Σε μια αναλυτική απογραφή κύκλου ζωής που γίνεται με στόχο τη δημιουργία μιας βάσης δεδομένων για μελλοντική αξιοποίηση ή βελτίωση του προϊόντος, η μονάδα πάνω στην οποία πραγματοποιείται η ανάλυση μπορεί να είναι σχεδόν οτιδήποτε ανταποκρίνεται με συνέπεια στην παραγωγική διαδικασία [1,4].

### 4.2.2. Όρια συστήματος

Τα όρια του συστήματος καθορίζουν ποιές διεργασίες θα πρέπει να συμπεριληφθούν στη μελέτη ΑΚΖ. Ο καθορισμός των ορίων του συστήματος είναι εν μέρει υποκειμενικός και γίνεται συνήθως κατά τον ορισμό του πλαισίου. Όρια που πρέπει να ληφθούν υπόψη είναι για παράδειγμα τα όρια μεταξύ τεχνόσφαιρας ( διεργασίες, υλικά και άλλα είδη που προκύπτουν ως αποτέλεσμα της ανθρώπινης δραστηριότητας) και οικόσφαιρας (διεργασίες και υλικά που δεν προκύπτουν από κάποια ανθρώπινη δραστηριότητα), γεωγραφικά και χρονικά όρια και τα όρια μεταξύ του κύκλου ζωής υπό μελέτη και των κύκλων ζωής άλλων συστημάτων (πχ. παραγωγή κεφαλαιουχικών αγαθών).

### 4.2.3. Ποιότητα δεδομένων

Η εγκυρότητα των αποτελεσμάτων από τις μελέτες ΑΚΖ, εξαρτάται από την ποιότητα των δεδομένων που εισάγονται. Οι παράμετροι που θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη είναι: χρονική, γεωγραφική και τεχνολογική κάλυψη, ακρίβεια και αντιπροσωπευτικότητα των δεδομένων, συνέπεια και επαναληψιμότητα των μεθόδων που χρησιμοποιούνται για συλλογή των δεδομένων, και τέλος το σφάλμα και τα κενά δεδομένων. Επιπρόσθετα, θα πρέπει να καθορίζονται όρια (threshold points) σχετικά με την πληρότητα των δεδομένων.

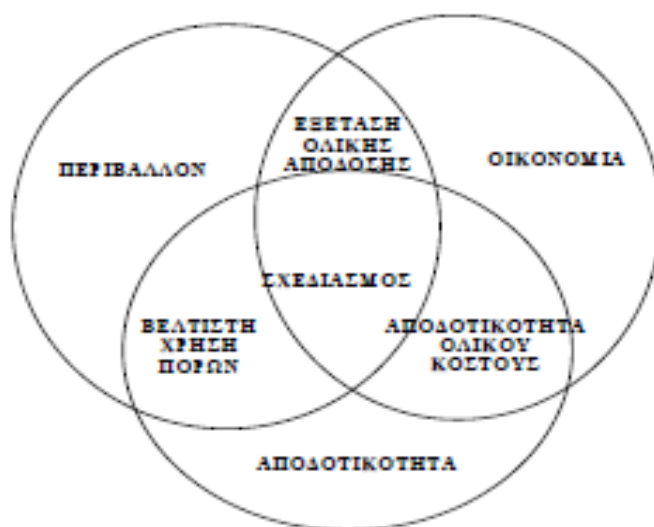
### 4.2.4. Συλλογή δεδομένων και καταγραφή κύκλου ζωής

Για την ολοκλήρωση του μοντέλου είναι αναγκαία η συλλογή δεδομένων για κάθε διεργασία που βρίσκεται εντός των ορίων του συστήματος. Τα δεδομένα που

χρειάζονται είναι συνδυασμός εισροών και εκροών σε κάθε διεργασία που περιλαμβάνεται στα όρια του συστήματος. Για τη συλλογή δεδομένων πρέπει, μεταξύ άλλων, να σχεδιάζονται κατάλληλα έντυπα συλλογής δεδομένων. Στη συνέχεια τα δεδομένα επαληθεύονται και σχετίζονται με τη λειτουργική μονάδα προκειμένου να επιτραπεί η συνάθροιση των αποτελεσμάτων. Ένα κρίσιμο βήμα σε αυτήν τη διαδικασία υπολογισμού είναι η κατανομή των ροών στο περιβάλλον π.χ. Οι εκπομπές στον αέρα, νερό και έδαφος. Επίσης, ένα άλλο πρόβλημα προκύπτει από το γεγονός ότι αρκετές διεργασίες παράγουν περισσότερα από ένα προϊόντα, που πιθανόν να μην βρίσκονται εντός των ορίων του συστήματος. Επομένως, τόσο οι διαδικασίες υπολογισμού είναι η κατανομή των ροών στο περιβάλλον π.χ. Οι εκπομπές στον αέρα, νερό και έδαφος. Επίσης, ένα άλλο πρόβλημα προκύπτει από το γεγονός ότι αρκετές διεργασίες παράγουν περισσότερα από ένα προϊόντα, που πιθανόν να μην βρίσκονται εντός των ορίων του συστήματος. Επομένως, τόσο οι εξαγωγές πρώτων υλών όσο και οι περιβαλλοντικές εκπομπές που σχετίζονται με τη συνολική διεργασία, θα πρέπει να καταμερίζονται στα διαφορετικά προϊόντα της διεργασίας [4].

### 4.3. Χρήσεις της ΑΚΖ

Η Ανάλυση Κύκλου Ζωής παίζει καθοριστικό ρόλο σε όλο το φάσμα των ανθρώπινων δραστηριοτήτων. Η χρήση της ΑΚΖ στην δημόσια διοίκηση μπορεί να παίξει καθοριστικό ρόλο στην λήψη αποφάσεων που θα περιορίσουν τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Η επιλογή μεθόδων εκτέλεσης δημόσιων έργων, η επιλογή υλικών απαραίτητων για την λειτουργία των δημόσιων οργανισμών, η λειτουργία δημόσιων επιχειρήσεων κλπ., αποτελούν παραδείγματα όπου η εφαρμογή του εργαλείου της ΑΚΖ μπορεί να οδηγήσει σε πολύ θετικά αποτελέσματα [4].



Εικόνα 26: Διαχείριση του κύκλου ζωής. [4]



#### **4.3.1. Η AKZ στη δημιουργία δεικτών**

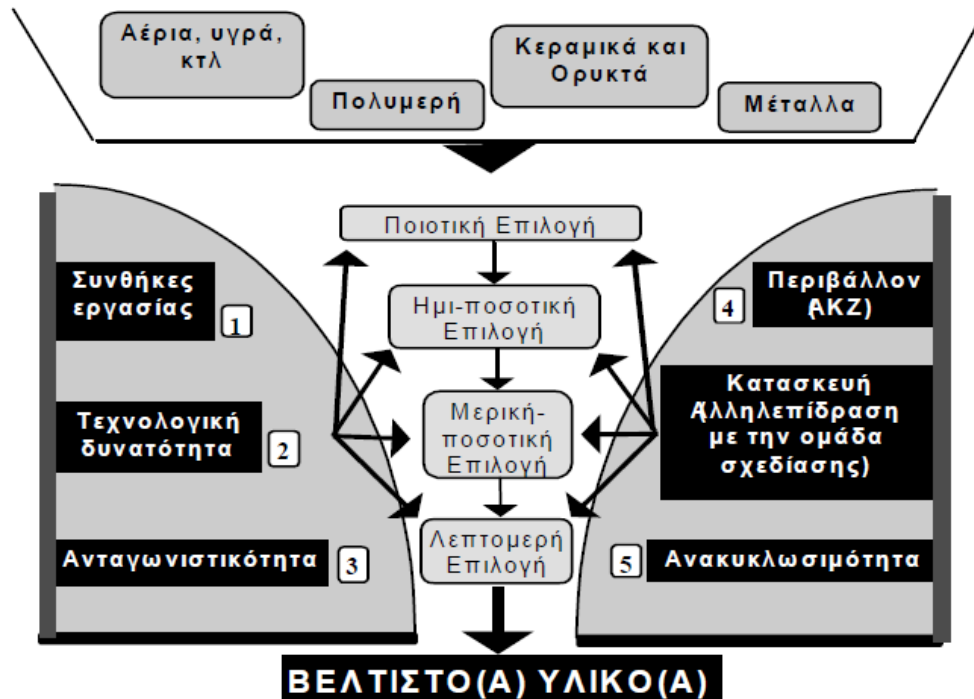
Η χρήση των δεικτών ολοκληρωμένης ανάπτυξης (ΔΟΑ) είναι εργαλεία που αποσκοπούν στο να καταστήσουν την έννοια της ολοκληρωμένης ανάπτυξης μετρήσιμη με την ποσοτικοποίηση τάσεων στην κοινωνία και να προσπαθήσουμε να αντιμετωπίσουμε το βασικό ερώτημα: Είμαστε σε τροχιά προς την ολοκληρωμένη ανάπτυξη ή όχι; Ο κύριος σκοπός των ΔΟΑ είναι να αποτελέσουν ενίσχυση στη λήψη αποφάσεων με την παροχή πληροφοριών σχετικά με την αειφορία σε μια ολοκληρωμένη και ποσοτική μορφή. Επιπλέον, οι ΔΟΑ μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθεί για την επικοινωνία και για παρακολούθηση των διεθνών, εθνικών και περιφερειακών στόχων. Η AKZ μπορεί να αποτελέσει το κύριο εργαλείο στην ανάπτυξη περιβαλλοντικών ΔΟΑ που θα αφορούν όλη την διαδικασία παραγωγής και αποφάσεων.

#### **4.3.2. Η AKZ στη βιομηχανία**

Στη βιομηχανία χρειάζονται δημιουργικές, αποτελεσματικές, και αποδοτικές μέθοδοι για να αντιμετωπιστούν οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις που είναι γνωστές αλλά και εκείνες που μόλις αρχίζουν να παρουσιάζονται. Η αποτελεσματικότερη προσέγγιση για την αντιμετώπιση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων είναι να χρησιμοποιηθεί η AKZ στις αρχικές φάσεις σχεδιασμού και να αναγνωριστούν οι εκτάσεις του προβλήματος, επιβάλλοντας προτεραιότητες και δίνοντας έμφαση σε πραγματικές αποτελεσματικές λύσεις. Η AKZ, ως εργαλείο περιβαλλοντικής διαχείρισης, συμβάλλει στο να αντιμετωπιστούν τα περιβαλλοντικά προβλήματα μέσω της επιλογής των υλικών, της διαδικασίας αλλαγής του σχεδιασμού προϊόντων, της αυξημένης επαναχρησιμοποίησης, της εκμετάλλευσης των υποπροϊόντων και της ανακύκλωσης.

#### **4.3.3. AKZ και οικολογικός σχεδιασμός (Eco-Desing/Ecomaterials)**

Για την κατασκευή ενός προϊόντος ή την ανάπτυξη μιας παραγωγικής διαδικασίας χρησιμοποιούνται ορισμένα τεχνικά δεδομένα. Με βάση τα δεδομένα αυτά είναι δυνατόν να εφαρμοστεί η μέθοδος της AKZ από την αρχή του σχεδιασμού. Ο παράγοντας περιβάλλον εισέρχεται δυναμικά και στο στάδιο έρευνας, ανάπτυξης και σχεδιασμού ενός προϊόντος ή μιας παραγωγικής διαδικασίας. Το EuroMat σαν σχεδιαστικό εργαλείο περιλαμβάνει 5 κριτήρια επιλογής όπως παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα. Εδώ χρησιμοποιείται μια διαδικασία “επαναπροσέγγισης”. Αυτή περιλαμβάνει: ιεράρχηση των υλικών (top-down step by step approach) και επανεξέταση της διαδικασίας επιλογής των ιεραρχημένων υλικών, λαμβάνοντας υπόψη και ποιοτικά κριτήρια. Στα διάφορα στάδια αυτής της διαδικασίας προσέγγισης, εισάγονται διάφοροι δείκτες επιλογής π.χ. κατανάλωση ενέργειας.



Εικόνα 27: Εργαλείο οικολογικού σχεδιασμού βασισμένο στη προσέγγιση της ιεράρχησης των υλικών (top-down eco-design) [5]

#### 4.3.4. Η ΑΚΖ ως εργαλείο περιβαλλοντικής διαχείρισης

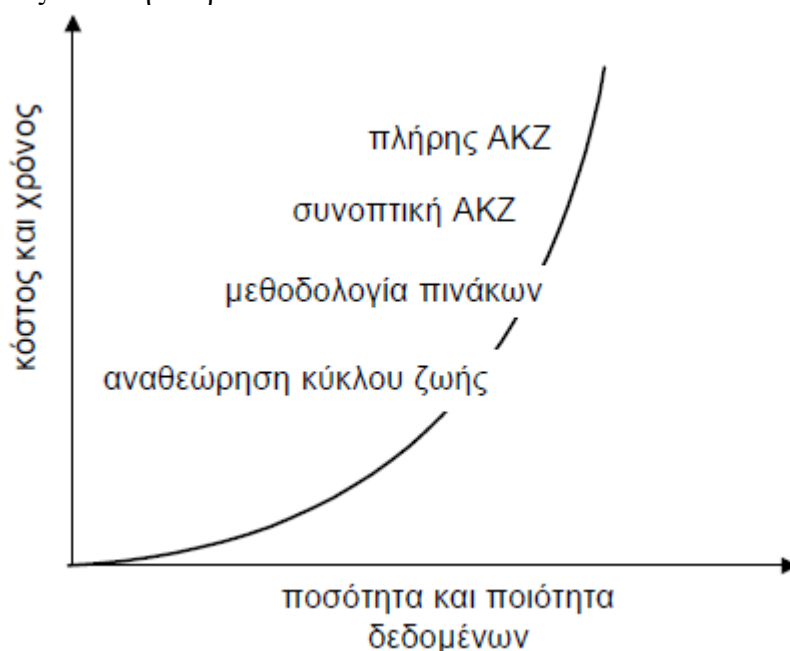
Εντάσσοντας την Ανάλυση Κύκλου Ζωής μέσα στο γενικότερο πλαίσιο της περιβαλλοντικής διαχείρισης, η ΑΚΖ αποτελεί μια μόνο από τις διάφορες τεχνικές περιβαλλοντικής διαχείρισης. Συμπληρώνει άλλες τεχνικές όπως την ανάλυση περιβαλλοντικής επίδρασης, την αναγνώριση πηγών κινδύνου (hazard identification), την εκτίμηση κινδύνων (risk assessment), την τεχνολογική ανάλυση (technology assessment), τις μεθοδικές και λεπτομερείς εξετάσεις αποβλήτων (waste audits) και τον περιορισμό των αποβλήτων των διεργασιών (waste minimization assessment of processes) με σκοπό τον περιβαλλοντικό σχεδιασμό, την υπεύθυνη διαχείριση του προϊόντος, και την δημιουργία μέτρων σύγκρισης συστημάτων διαχείρισης. Όλες αυτές οι τεχνικές και τα εργαλεία διαχείρισης θα πρέπει να χρησιμοποιούνται εκεί όπου, κατά περίπτωση, κρίνονται ως κατάλληλα.

#### 4.3.5. Η ΑΚΖ ως εργαλείο εκτίμησης κόστους

Η απόφαση για την κατασκευή μιας βιομηχανικής μονάδας εξαρτάται από το πόσο επικερδής θα είναι η λειτουργία της. Με την χρησιμοποίηση της ΑΚΖ μας δίδεται η δυνατότητα ανάλυσης του ολικού κόστους της παραγωγής ενός προϊόντος, συμπεριλαμβανομένων και των επί μέρους επιπτώσεων της χρήσης του προϊόντος.

#### 4.4. Δυνατότητες διαφορετικών προσεγγίσεων ΑΚΖ

Ανάλογα με τον χρόνο διάρκειας μιας μελέτης, το κόστος και την ποσότητα και ποιότητα δεδομένων θα εξαρτηθεί και η προσέγγιση για την εκπόνηση της ΑΚΖ όπως παρουσιάζεται στην παρακάτω Εικόνα.

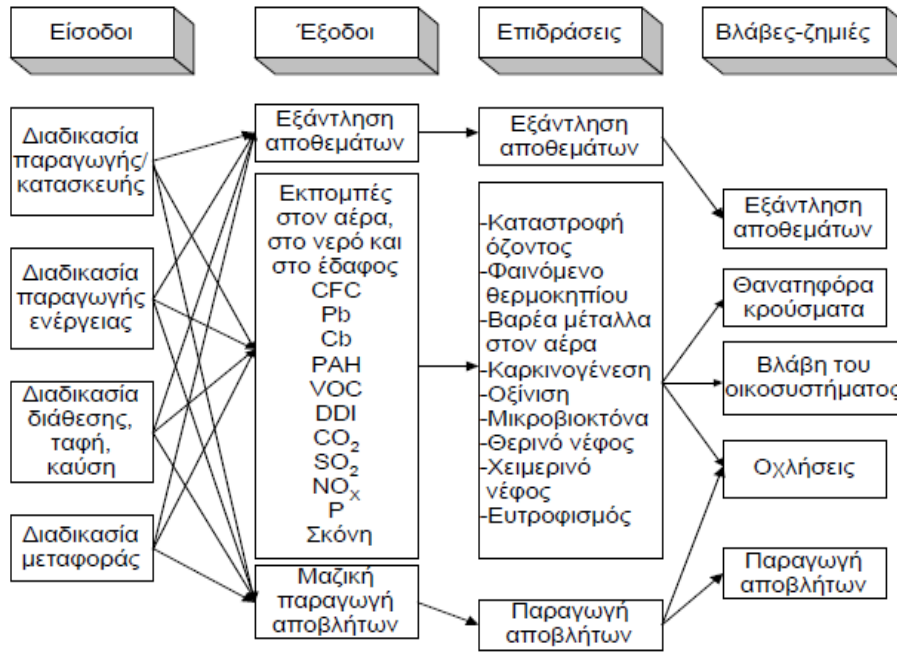


Εικόνα 28: Ποιότητα και ποσότητα δεδομένων συναρτήσει του κόστους και του χρόνου. [5]

#### 4.5. Εκτίμηση επιπτώσεων

Η εκτίμηση επιπτώσεων στην ΑΚΖ είναι μια ποσοτική ή/ και ποιοτική διαδικασία που χρησιμοποιείται, για να χαρακτηρίσει και να εκτιμήσει τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις που προσδιορίζονται κατά τη φάση της απογραφής δεδομένων. Η περιβαλλοντική επίπτωση ενός προϊόντος μπορεί να περιγραφεί με διάφορους τρόπους, αλλά γενικά καταλήγει στον υπολογισμό της επίπτωσης του προϊόντος εξετάζοντας στις εξόδους, τις επιδράσεις ή καταστροφές που προκαλούνται σε μια ή περισσότερες φάσεις του κύκλου ζωής.

Σύμφωνα με τη μεθοδολογία που προτείνεται από τον SETAC, η εκτίμηση επιπτώσεων αποτελείται από τα ακόλουθα τρία βήματα: ταξινόμηση, χαρακτηρισμό και αξιολόγηση. Η σχέση μεταξύ ποιοτικών και ποσοτικών δεδομένων στην εκτίμηση επιπτώσεων. Η εκτίμηση επιπτώσεων συνήθως περιγράφεται ως μια βήμα προς βήμα ερμηνεία του σταδίου της απογραφής: Απογραφή ⇒ Ταξινόμηση ⇒ Χαρακτηρισμός (⇒ Κανονικοποίηση) ⇒ Αξιολόγηση [5].



Εικόνα 29: Περιβαλλοντικές επιπτώσεις. [5]

#### 4.6. Εκτίμηση βελτιώσεων

Ο οργανισμός SETAC ορίζει την εκτίμηση βελτιώσεων ως εξής: “Η εκτίμηση βελτιώσεων αποτελεί μια συστηματική αξιολόγηση των αναγκών και δυνατοτήτων για την μείωση της περιβαλλοντικής επιβάρυνσης που συνδέεται με τη χρήση ενέργειας και πρώτων υλών και τις περιβαλλοντικές εκπομπές καθ’ όλη τη διάρκεια του κύκλου ζωής προϊόντων, διεργασιών και υπηρεσιών. Η ανάλυση αυτή είναι δυνατό να περιέχει τόσο ποιοτικά όσο και ποσοτικά μέτρα βελτίωσης, όπως αλλαγές στο προϊόν, στη διεργασία και τον σχεδιασμό, στη χρήση των πρώτων υλών, στη χρήση από τον καταναλωτή και στη διαχείριση των απορριμμάτων” [4,5].

## **ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

[1] SETAC, "Guidelines for Life Cycle Assessment: A 'Code of Practice'", Workshop (March 31- April 3 1993) report, SETAC and SETAC Foundation for Environmental Education, Inc., Pensacola, FL., 1993.

[2] Breville, Magalie, Thomas Gloria, Michael O'Connell, and Theodore Saad, "Life Cycle Assessment, Trends, Methodologies and Current Implementation," Masters Thesis, Tufts University, Medford, MA., 1994.

[3] Hardi, P. and Zdan T., Assessing Sustainable Development. Principles in Practice. Winnipeg, Manitoba, Canada, International Institute for Sustainable Development, 1997.

[4] ISO/DIS 14040, Environmental Management - Life Cycle Assessment, Principles and framework Geneva, Switzerland, International Organisation of Standardisation, 1997.

[5] Tillman, A.-M., Significance of decision making for LCA methodology. SETAC-Europe annual meeting, Bordeaux, 1998.

## Κεφάλαιο 5: Εφαρμογή Ανάλυσης Κύκλου Ζωής (AKZ)

Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, όπως η αιολική ενέργεια και οι φωτοβολταϊκά, έχουν σημαντική δυνατότητα μείωσης των εκπομπών αέριων ρύπων του θερμοκηπίου στην παραγωγή ηλεκτρική ενέργειας.

Επί του παρόντος, τα φωτοβολταϊκά και η αιολική ενέργεια έχουν μικρό ρόλο στην παγκόσμια παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, λόγω των διακυμάνσεων της παραγωγή τους. Η τεχνολογία παραγωγής υποκατάστατου φυσικού αερίου (Power to Gas (PtG)) θα μπορούσε να εξισορροπήσει αυτές τις διακυμάνσεις με την αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας σε περιόδους πλεονασματικής παραγωγής.

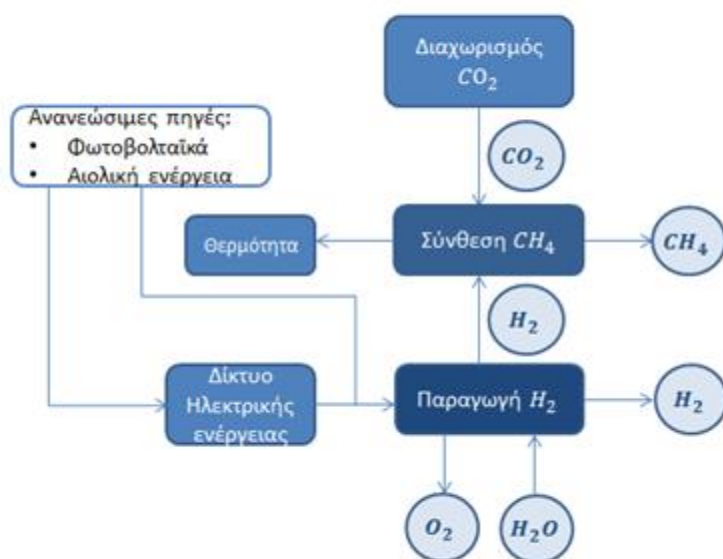
Σε αντίθεση με συστήματα μπαταριών, η τεχνολογία PtG παρέχει μια μακροπρόθεσμη δυνατότητα αποθήκευσης ενέργειας και είναι ιδιαίτερα κατάλληλη για την εξισορρόπηση των εποχιακών διακυμάνσεων. Επιπλέον, σε αντίθεση με την τεχνολογία της αντλησιοταμίευσης που απαιτούνται τοποθεσίες με κατάλληλη γεωγραφία, η παροχή ισχύος της PtG θα μπορούσε να εγκατασταθεί σε διάφορες περιοχές και σε συνδυασμό με το ήδη υπάρχον δίκτυο αερίου.

Το σύστημα PtG χρησιμοποιεί την ηλεκτρική ενέργεια για να διαχωρίσει το νερό σε υδρογόνο και οξυγόνο σε ένα ηλεκτρολύτη. Η πλεονάζουσα ηλεκτρική ενέργεια μπορεί αν οριστεί ως ηλεκτρική ενέργεια που δεν θα μπορούσε να τροφοδοτήσει το δημόσιο ηλεκτρικό δίκτυο ή να χρησιμοποιηθεί διαφορετικά. Ένα επιπλέον βήμα της τεχνολογίας η σύνθεση μεθανίου από διοξείδιο του άνθρακα και υδρογόνο μέσω της διαδικασίας της μεθανοποίησης.

Η παραγωγή μεθανίου έχει χαμηλό βαθμό απόδοσης (~50%), αλλά θα μπορούσε να είναι επωφελής όσον αφορά την τροφοδότηση του δικτύου διανομής αερίου, σε αντίθεση με το υδρογόνο. Στο παρακάτω διάγραμμα παρουσιάζονται τα διάφορα στάδια της διαδικασίας.

Διάφορες Αναλύσεις Κύκλου Ζωής έχουν διεξαχθεί για την παραγωγή υδρογόνου και την αξιοποίηση του ως καύσιμο για μεταφορές. Οι οικολογικές πτυχές του υδρογόνου ως φορέας ενέργειας αντιμετωπίζονται ήδη πολύ καλά στη βιβλιογραφία. Ωστόσο η σύνθεση μεθανίου από υδρογόνο και διοξείδιο του άνθρακα, το οποίο αποτελεί μέρος της διαδικασίας PtG, είναι μάλλον ένα νέο θέμα από την οπτική γωνία του κύκλου ζωής.

## ΠΑΡΑΓΩΓΗ $CH_4$ ΚΑΙ $H_2$



Εικόνα 30: Διάγραμμα ροής της παραγωγής  $H_2$  και  $CH_4$ . [3]

### 5.1. Σκοπός-Αντικείμενο

Ο στόχος της ΑΚΖ είναι να προσδιορίσει την οικολογική απόδοση της τεχνολογίας Power to Gas (PtG) και την κύρια παράμετρο που επηρεάζει την ενδεχόμενη θέρμανση του πλανήτη (Global warming potential (GWP)). Τα αποτελέσματα για το  $H_2$  και το  $CH_4$  που προέκυψαν από την τεχνολογία PtG συγκρίνονται με άλλες διεργασίες, όπως η αναμόρφωση ατμού από φυσικό αέριο και αργό πετρέλαιο, και η εξαγωγή φυσικού αερίου. Παρόλο που τα πρότυπα ISO 14040 για τις ΑΚΖ καλύπτουν μόνο τις εκτιμήσεις των περιβαλλοντικών επιπτώσεων ενός προϊόντος, η μεθοδολογία μπορεί επίσης να εφαρμοστεί στις διαδικασίες.

### 5.2. Λειτουργική Μονάδα

Η λειτουργία της τεχνολογίας PtG είναι, αφενός η αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας και αφετέρου, η παραγωγή ενός φορέα ενέργειας που μπορεί να εφαρμοστεί τόσο για παραγωγή θερμότητας και ηλεκτρικής ενέργειας, όσο και ως καύσιμο στις μεταφορές. Ως λειτουργική μονάδα στην παρούσα εργασία επιλέγεται το ενεργειακό περιεχόμενο, του ηλεκτρισμού προς αποθήκευση. Επομένως όλα τα αποτελέσματα της ΑΚΖ σχετίζονται με 1kWh αποθηκευμένης ηλεκτρικής ενέργειας.

### 5.3. Μοντελοποίηση

Ο ορισμός των ορίων του συστήματος, καθορίζει την ροή εισόδου και εξόδου που θεωρήθηκε, καθώς και τα στάδια της διαδικασίας του συστήματος που

αξιολογείται. Ο Κύκλος Ζωής αρχίζει συνήθως με την εξαγωγή πρώτων υλών και ενεργειακών φορέων, και τελειώνει με την παραγωγή αποβλήτων, την ανάκτηση ή την κατανάλωση ενέργειας. Σύμφωνα με το ISO 14044 (2006) σχετικά με τα όρια του συστήματος, δεν επιτρέπεται ο περιορισμός σύντομων μοντέλων, εάν αυτό οδηγεί σε θεμελιώδεις περιορισμούς για τα συμπεράσματα του Κύκλου Ζωής.

Το παρακάτω διάγραμμα παρουσιάζει τα όρια του συστήματος της AKZ που διεξάγονται, με επίκεντρο την παραγωγή  $CH_4$  σε μία μονάδα PtG. Η μεταφορά και η αποθήκευση των προϊόντων, καθώς και η εφαρμογή τους δεν αξιολογήθηκαν, αλλά θεωρήθηκαν ποιοτικά κατά την ερμηνεία.

### ΠΑΡΑΓΩΓΗ $CH_4$ ΚΑΙ $H_2$ ΜΕ PtG



Εικόνα 31: Διάγραμμα ροής της παραγωγής  $H_2$  και  $CH_4$  με PtG [3]

Η παραγωγή  $CH_4$  σε μία μονάδα PtG περιλαμβάνει την ηλεκτρόλυση του νερού, τη μεθανοποίηση, τον διαχωρισμό του  $CO_2$  και την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

#### 5.3.1. Ευαισθησία

Παρόλο που η τεχνολογία PtG είναι σχετικά νέα, οι επιμέρους διαδικασίες όπως η μεθανοποίηση και η ηλεκτρόλυση, είναι αποδεδειγμένες τεχνολογίες, με αποτέλεσμα η αβεβαιότητα του συστήματος να είναι αρκετά χαμηλή. Παρόλα αυτά, υπάρχουν τρεις σημαντικές παράμετροι που θα μπορούσαν να επηρεάσουν σημαντικά τα αποτελέσματα. Αυτά είναι: α) η προέλευση της ηλεκτρικής ενέργειας, β) η απόδοση του διαχωρισμού του διοξειδίου του άνθρακα καθώς και γ) η αποδοτικότητα της διεργασίας. Τα ακόλουθα σενάρια αναπτύχθηκαν λαμβάνοντας υπόψη αυτές τις παραμέτρους στην ανάλυση ευαισθησίας.



A) Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από αιολική ενέργεια, φωτοβολταϊκά ή μείγμα ηλεκτρικής ενέργειας, της Ελλάδας.

B)  $CO_2$  ως προϊόν αποβλήτων ή ειδικού διαχωρισμού από καυσαέριο.

#### 5.4. Ανάλυση αποθέματος

Οι είσοδοι και οι έξοδοι από διαφορετικά στάδια της διαδικασίας PtG, καθώς και οι διαδικασίες αναφοράς, περιγράφονται με δεδομένα από τη βιβλιογραφία και τους κατασκευαστές. Η ισορροπία των υλικών και της ενέργειας απαιτείται ως είσοδος για τη μοντελοποίηση χρησιμοποιώντας το λογισμικό SimaPro Η AKZ εξετάζει τους απαιτούμενους πόρους για την παραγωγή μεθανίου και τη σχετική αλυσίδα εφοδιασμού.

##### 5.4.1 Παραγωγή $H_2$ στην ηλεκτρόλυση του νερού

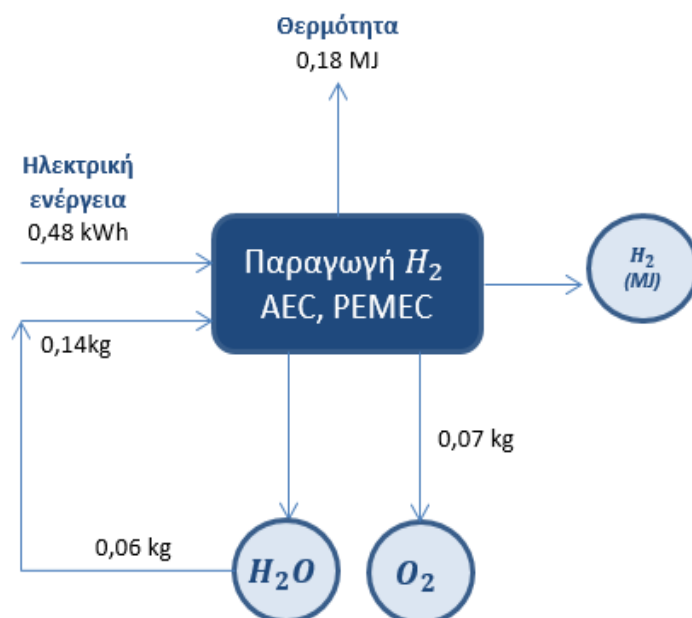
Σε μία ηλεκτρόλυση, το νερό διαχωρίζεται με ηλεκτρική ενέργεια σε υδρογόνο και οξυγόνο, σύμφωνα με την αντίδραση  $2H_2O \rightarrow 2 H_2 + O_2$ . Το σχετικό υλικό καθώς και οι ενεργειακές εισροές και εκροές της παραγωγής του  $H_2$  φαίνονται στο παρακάτω σχήμα. Αν και υπάρχουν κάποιες διαφορές ανάμεσα στις AEC και PEMEC, οι LCA-σχετικές εισροές και εκροές πραγματοποιούνται και τις δυο μεθόδους. Ο πίνακας περιγράφει κάποια πρόσθετα χαρακτηριστικά των AEC και PEMEC που σχετίζονται με τα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας.

Παράμετρος	AEC	PEMEC
Ονομαστική Ισχύς	αρκετά MW	> 1 MW
Εύρος Ισχύος	20-100% της ονομαστικής ισχύς	0-100% της ονομαστικής ισχύς
Πίεση Λειτουργίας	1-30 bar	>100 bar
Θερμοκρασία Λειτουργίας	~80°C	~80°C
Χρόνος Ζωής	10-20 χρόνια	6-15 χρόνια
	(Ισχυρά ανάλογο του τρόπου λειτουργίας)	
Απαίτηση χώρου	5 έως 10 φορές μικρότερος του PEMEC	

Πίνακας 2: Χαρακτηριστικά των PEM και αλκαλικών ηλεκτρολυτών . [3]

Η AEC χρησιμοποιεί έναν υδατικό αλκαλικό ηλεκτρολύτη κι έτσι θεωρείται η πιο αναπτυγμένη και οικονομικότερη τεχνολογία ηλεκτρόλυσης. Οι αλκαλικοί ηλεκτρολύτες είναι διαθέσιμοι σε μεγαλύτερες χωρητικότητες και παρουσιάζουν καλή απόδοση όταν λειτουργούν συνεχόμενα. Οι προκλήσεις παρουσιάζονται σε δυναμική λειτουργία, καθώς ο δυναμικός εξοπλισμός περιορίζει την ευελιξία της AEC και η συμπεριφορά εκκίνησης γίνεται πιο αργή εξαιτίας της υψηλής θερμοχωρητικότητας του συστήματος. Η ισχύς των αλκαλικών ηλεκτρολυτών είναι μικρότερη από την αντίστοιχη των PEM ηλεκτρολυτών και η ποιότητα του φυσικού αερίου είναι αρκετά χαμηλή στο μερικό φορτίο. Η PEMEC έχει πιο απλή σχεδίαση,

χρησιμοποιεί έναν ηλεκτρολύτη με πολυμερή μεμβράνη, έτσι ώστε να είναι ανθεκτική σε μεταβατικά φορτία και να παρουσιάζει καλύτερη συμπεριφορά εκκίνησης. Στα μειονεκτήματά της είναι η περιορισμένη διάρκεια ζωής της μεμβράνης, οι μικρές διαθέσιμες χωρητικότητες και τα υψηλά κόστη των καταλυτών ευγενών μετάλλων, όπως η πλατίνα (λευκόχρυσος). Αυτή τη στιγμή, η PEMEC είναι διαθέσιμη μόνο σε μικρότερες χωρητικότητες και έχει μικρότερη απόδοση από την AEC. Παρόλα αυτά, μακροπρόθεσμα, η αποδοτικότητα τους αναμένεται να αυξηθεί σε σχέση με την AEC, και προβλέπονται συγκρίσιμες διάρκειες ζωής. Οι τρέχουσες προκλήσεις και για τους δύο τύπους ηλεκτρολυτών, ειδικά όταν χρησιμοποιούνται σε συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας, είναι η χαμηλή αποδοτικότητα, η μειωμένη αντοχή και τα υψηλά επενδυτικά κόστη.

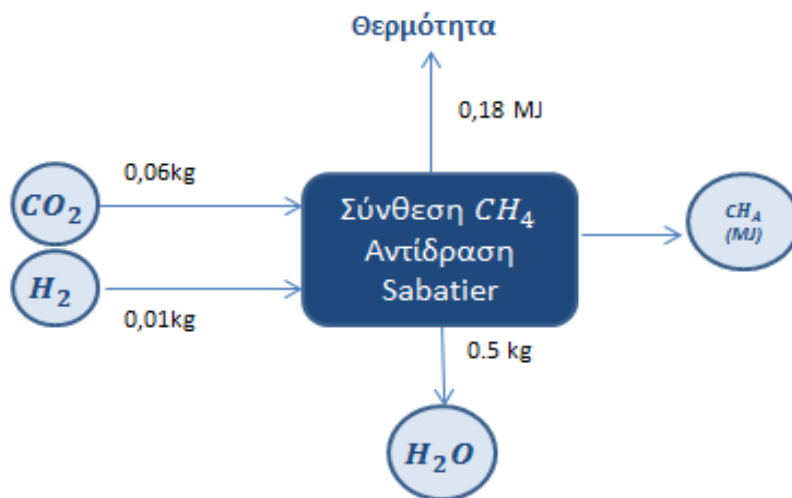


Εικόνα 32: Σύνθεση ενός MJ H<sub>2</sub> μέσω ηλεκτρόλυσης.

Σε αυτή την ΑΚΖ, μελετάται η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας στην Ελλάδα. Όπως σημειώθηκε και παραπάνω, το νερό και η ηλεκτρική ενέργεια απαιτούνται για την παραγωγή H<sub>2</sub> μέσω της μεθόδου της ηλεκτρόλυσης. Σύμφωνα με την ΑΚΖ το απιονισμένο νερό συντηρείται με τη διαδικασία της αντίστροφης όσμωσης.

#### 5.4.2 Παραγωγή CH<sub>4</sub> (μεθάνιο) μέσω της αντίδρασης Sabatier

Το υδρογόνο και το διοξείδιο του άνθρακα αντιδρούν σε μεθάνιο μέσω της ετερογενούς κατάλυσης της αντίδρασης Sabatier ( $4\text{H}_2 + \text{CO}_2 \rightarrow \text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O}$ ), με τη βοήθεια κυρίως καταλυτών νικελίου. Οι ενεργειακές εισροές και οι εκροές της διαδικασίας παραγωγής μεθανίου φαίνονται στο παρακάτω σχήμα.



Εικόνα 33: Σύνθεση  $CH_4$  μέσω αντίδρασης Sabatier. [3]

Το μεθάνιο μπορεί να παραχθεί όχι μόνο από τα  $H_2$  και  $CO_2$ , αλλά και από τα  $H_2$  και  $CO$  (μονοξείδιο του άνθρακα). Η τελευταία αυτή τεχνολογία είναι η πιο προηγμένη και χρησιμοποιείται στην παραγωγή αερίου από άνθρακα, καθώς και σε καθαρισμό αέριων προϊόντων. Παρόλα αυτά, η παραγωγή μεθανίου μέσω του μονοξειδίου του άνθρακα δεν αφορά αυτή την ΑΚΖ, η οποία επικεντρώνεται κυρίως στην χρησιμοποίηση του  $CO_2$  στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας. Πληροφορίες σχετικές με τις δυο διαδικασίες παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα.

Παράμετρος	CO Μεθανοποίηση	CO <sub>2</sub> Μεθανοποίηση
Σχεδιασμός διαδικασίας	Σταθερή κλίνη, ρευστοποιημένη κλίνη, στήλη φυσαλίδων με 1 σε 4 στάδια	
Εύρος Ισχύος	80-110% της ονομαστικής ισχύος	
Πίεση Λειτουργίας	13-60 bar	6-7 bar
Θερμοκρασία Λειτουργίας	300-700°C	180-350°C
Απαίτηση χώρου	Ανάλογα με τον τύπο της διαδικασίας και την παραγωγική ικανότητα διπλασιασμός της παραγωγικής ικανότητας δεν σημαίνει και διπλασιασμός του απαιτούμενου χώρου	

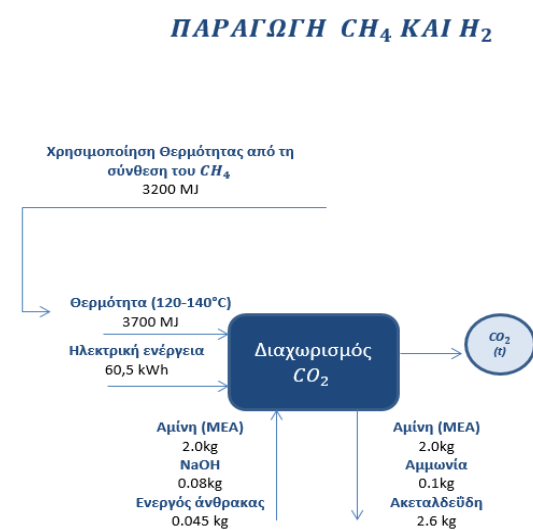
Πίνακας 3: Χαρακτηριστικά της CO και CO<sub>2</sub>. [3]

Επιπρόσθετα με την παραγωγή  $H_2$  κατά την ηλεκτρόλυση του νερού, το  $CO_2$  χρησιμοποιείται για τη σύνθεση  $CH_4$  σε συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας. Το  $CO_2$  παράγεται μέσω διαφόρων διεργασιών, όπως η καύση λιθάνθρακα, σε εργοστασιακές διεργασίες όπως το τσιμέντο και η παραγωγή άσβεστου, στη ζύμωση σε εγκαταστάσεις βιοαερίου και αεριοποίησης βιομάζας. Σε θεωρητική

βάση, το CO<sub>2</sub> μπορεί να εξαχθεί και από τον ατμοσφαιρικό αέρα. Η αποδοτικότητα όμως αυτών των διεργασιών απορρόφησης είναι πολύ χαμηλή.

### 5.4.3 Διαχωρισμός CO<sub>2</sub> από τα καυσαέρια σε μονάδες ηλεκτροπαραγωγής με καύση άνθρακα μέσω καθαρισμού αμινών

Μία πιθανή πηγή CO<sub>2</sub>, για παραγωγή μεθανίου, είναι από τα καυσαέρια σε μονάδες ηλεκτροπαραγωγής με καύση άνθρακα. Η τελευταίας τεχνολογίας μέθοδος για διαχωρισμό CO<sub>2</sub> από καυσαέρια είναι ο καθαρισμός με αμίνες, που μελετάται σε αυτή την ΑΚΖ. Οι ενεργειακές εισροές και οι εκροές του διαχωρισμού του διοξειδίου του άνθρακα φαίνονται στο παρακάτω σχήμα.



Εικόνα 34: Ο διαχωρισμός του CO<sub>2</sub> από τα καυσαέρια των σταθμών ηλεκτροπαραγωγής με καύση άνθρακα μέσω καθαρισμού αμίνης. [3]

Ο πίνακας παρακάτω παρουσιάζει πληροφορίες σχετικές με τον καθαρισμό αμινών.

Παράμετρος	Καθαρισμός αμίνης
Τυπικό μέγεθος	2100 με 350,000 tCO <sub>2</sub> /a
Πίεση Λειτουργίας	~1 bar
Θερμοκρασία Λειτουργίας	25-50°C
Χρόνος Ζωής	15-20 χρόνια
Αποδοτικότητα διαχωρισμού CO <sub>2</sub>	85-90%

Πίνακας 4: Χαρακτηριστικά του διαχωρισμού CO<sub>2</sub> μέσω καθαρισμού αμίνης.[3]

Ο καθαρισμός αμινών είναι μια διαδικασία που έπεται της καύσης και χρησιμοποιείται για το διαχωρισμό του CO<sub>2</sub> σε ροή αερίου κατά τη χημική αντίδραση με οργανικό διαλύτη, π.χ. μονοαιθανολαμίνη (MEA). Ο διαλύτης που

φέρει το CO<sub>2</sub>, πρέπει να αναγεννηθεί με θερμότητα που θα παρέχει το εργοστάσιο. Η θερμότητα αυτή, που θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, η συνολική αποδοτικότητα του εργοστασίου μειώνεται όταν το CO<sub>2</sub> δεσμεύεται και η πρωτογενής ανάγκη για ενέργεια ανά KWh αυξάνεται. Στην παραγωγή μεθανίου σε ένα σύστημα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, η θερμότητα παράγεται σαν υποπροϊόν. Αυτό είναι χρήσιμο κατά τη διαδικασία καθαρισμού αμινών.

#### 5.4.4 Διαδικασίες αναφοράς

Το H<sub>2</sub> χρησιμοποιείται κυρίως σαν πρώτη ύλη στη χημική βιομηχανία και παράγεται κυρίως από ορυκτές πρώτες ύλες όπως το φυσικό αέριο, το πετρέλαιο και το κάρβουνο. Εξαιτίας του υψηλού κόστους, μόνο μια μικρή ποσότητα του υδρογόνου που παράγεται παγκοσμίως είναι μέσω της ηλεκτρόλυσης του νερού. Οι επιλεγμένες διαδικασίες παραγωγής H<sub>2</sub> ήταν η αναμόρφωση του ατμού από το φυσικό αέριο και το αργό πετρέλαιο.

Το μεθάνιο παράγεται από το φυσικό αέριο. Στην παραγωγή του μπορούμε να περιλάβουμε και τη μετάδοση του.

#### 5.5 Εθνικός ενεργειακός σχεδιασμός

Κατά την τελευταία 20ετία, το εθνικό ενεργειακό σύστημα εξελίχθηκε σύμφωνα τόσο με τα μεγέθη της οικονομικής ανάπτυξης όσο και με τις νέες καταναλωτικές συνήθειες που υιοθετήθηκαν. Παρατηρήθηκε μια τάση για διαρκή αύξηση της ζήτησης ενέργειας σε όλους τους τομείς κατανάλωσης, η οποία επηρέασε την ανάπτυξη του ενεργειακού συστήματος.

Το υψηλό επίπεδο χρήσης συμβατικών καυσίμων τόσο για την παραγωγή ηλεκτρισμού όσο και για την κατανάλωση σε όλους ανεξαιρέτως τους τομείς αποτελεί το κύριο χαρακτηριστικό του ελληνικού ενεργειακού μίγματος. Η αξιοποίηση του λιγνίτη, αποτέλεσε στρατηγική επιλογή, παρά τις περιβαλλοντικές του επιπτώσεις, καθώς μέχρι σήμερα αποτελεί το βασικό μας εγχώριο καύσιμο. Το ενεργειακό ισοζύγιο της χώρας κυριαρχείται επίσης, από εισαγόμενους υδρογονάνθρακες και κυρίως πετρελαϊκά προϊόντα και λιγότερο φυσικό αέριο.

Η μεγάλη εξάρτηση της χώρας από τις εισαγωγές καυσίμων και οι μη προβλέψιμες και κυρίως μη ελεγχόμενες μεταβολές στην τιμή τους, επιφέρουν ένα σημαντικό παράγοντα αβεβαιότητας στο σχεδιασμό ενεργειακών πολιτικών αλλά και στην ασφάλεια ενεργειακού εφοδιασμού.

Μια από τις σημαντικότερες προκλήσεις στον τομέα της ενέργειας είναι η ανάπτυξη και βέλτιστη αξιοποίηση των εγχώριων πηγών, τόσο των συμβατικών καυσίμων, όσο και του ανανεώσιμου δυναμικού, γεγονός που θα συμβάλλει σημαντικά στη μείωση της τρέχουσας υψηλής εξάρτησης από εισαγωγές, θα παρέχει ασφάλεια ως προς την κάλυψη των εγχώριων φορτίων και θα αποτελέσει σημαντικό μέσο ενίσχυσης και ανάπτυξης της εθνικής οικονομίας. Ιδιαίτερα στον τομέα των ΑΠΕ

είναι επιτακτικό να επιλυθούν όλα τα ζητήματα που αφορούν σε καθυστερήσεις στην αδειοδοτική διαδικασία, καθώς και στην ανάπτυξη των απαραίτητων υποδομών δικτύου όπου αυτό απαιτείται. Επιπλέον, είναι σημαντικό, κυρίως για τα αιολικά (ειδικά και για τα θαλάσσια) και φωτοβολταϊκά πάρκα, να προγραμματιστεί μια μελέτη για τη βέλτιστη χωροθέτησή τους στις διοικητικές περιφέρειες, σε σχέση, τόσο με το υπάρχον δυναμικό όσο και με το εκτιμώμενο φορτίο.

Στο πλαίσιο αυτό, το Εθνικό Σχέδιο Δράσης για τις ΑΠΕ που παρουσιάστηκε το καλοκαίρι του 2010 και έχει ως στόχο την επίτευξη συγκεκριμένων στόχων για τη διείσδυση των ΑΠΕ στην ακαθάριστη τελική κατανάλωση, θέτει συνολικά και τις βάσεις και την πορεία εξέλιξης του ενεργειακού τομέα μέχρι το 2020.

Λαμβάνοντας υπόψη τις συγκεκριμένες δεσμεύσεις και τους εθνικούς στόχους, στην παρούσα μελέτη δίνεται ιδιαίτερη έμφαση στην πορεία εξέλιξης του ενεργειακού συστήματος σε μακροπρόθεσμο πλαίσιο (έως το 2050), επιχειρώντας την ανάλυση των αποτελεσμάτων διαφορετικών σεναρίων σχετικά με τους στόχους, τη λειτουργία, τη δομή και τη σύνθεση του ενεργειακού συστήματος.

Ειδικότερα, για τη μακροπρόθεσμη παρακολούθηση της εξέλιξης του συστήματος και της τελικής ζήτησης μέχρι το 2050, λαμβάνεται ως έτος αναφοράς το 2020, όπου και θεωρείται ότι έχουν επιτευχθεί οι κεντρικοί εθνικοί ενεργειακοί στόχοι που προβλέπουν διείσδυση κατά 20% των ΑΠΕ στην τελική ενεργειακή κατανάλωση, με την επιμέρους ανάλυση του μεριδίου των ΑΠΕ να αφορά σε 40% στην ηλεκτροπαραγωγή, 20% συμμετοχή στη ζήτηση ενέργειας για θέρμανση/ψύξη και σε διείσδυση κατά 10% στις μεταφορές.

Το αποτέλεσμα της ανάλυσης του Ελληνικού ενεργειακού συστήματος μέχρι το 2020 οδηγεί στο συμπέρασμα ότι η επίτευξη του ποσοστού συμμετοχής των ΑΠΕ στην ηλεκτροπαραγωγή, θα επιτευχθεί μόνο με τη συνδυαστική εφαρμογή θεσμικών, κανονιστικών, οικονομικών και τεχνολογικών μέτρων που έχουν ως βασικό στόχο την αξιοποίηση του οικονομικού δυναμικού ανάπτυξης μεγάλων έργων ΑΠΕ, την ολοκλήρωση των αναγκαίων εργασιών επέκτασης και αναβάθμισης του ηλεκτρικού δικτύου και τη σταδιακή ανάπτυξη της διεσπαρμένης παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Προφανώς αυτό απαιτεί την αντιμετώπιση ποικίλων εμποδίων, που έχουν ήδη εντοπιστεί, και σχετίζονται με καθυστερήσεις στην αδειοδότηση έργων ΑΠΕ, σε ασάφειες θεμάτων χωροταξικού σχεδιασμού, καθώς και την ελλιπή ενημέρωση των πολιτών σχετικά με τις εφαρμογές έργων ΑΠΕ.

Αντίστοιχα, για την ικανοποίηση των εθνικών στόχων για το 2020, συμμετοχής των ΑΠΕ σε θέρμανση-ψύξη και μεταφορές, προβλέπεται αξιοποίηση όλων των θεσμικών αλλαγών που έχουν ήδη υλοποιηθεί ή δρομολογούνται ώστε να επιτευχθεί εξοικονόμηση ενέργειας μέσω βελτίωσης της ενεργειακής απόδοσης, διείσδυσης ώριμων τεχνολογικών εφαρμογών, καθώς και υιοθέτησης πολιτικών ορθολογικής χρήσης ενέργειας σε όλους τους τομείς.

Στο πλαίσιο αυτό, σύμφωνα και με τις κατευθυντήριες οδηγίες από την ΕΕ, για την περίοδο μετά το 2020 θα συνεχιστεί η περαιτέρω διείσδυση και συμμετοχή των ΑΠΕ στην ηλεκτροπαραγωγή, στη θέρμανση και ψύξη καθώς και στις μεταφορές και θα συνεπικουρείται και από την ενδυνάμωση των μηχανισμών και των αντίστοιχων κυρώσεων σχετικά με τις εκπομπές αέριων ρύπων του θερμοκηπίου. Παράλληλα, η εφαρμογή θεσμικών μέτρων κυρίως στον κτιριακό τομέα και τις μεταφορές, καθώς και η ταχεία εξέλιξη τεχνολογικών εφαρμογών που οδηγούν σε βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης, αναμένεται να επιτύχουν σημαντικά μεγέθη εξοικονόμησης ενέργειας που

στις επόμενες δεκαετίες θα οδηγήσουν σε σταδιακή μείωση του ρυθμού αύξησης της ζήτησης και τελικά και της απόλυτης μείωσης της τελικής κατανάλωσης ενέργειας.

Συγκεκριμένα, στα σενάρια εξέλιξης του ενεργειακού συστήματος που εξετάζονται, ισχύουν ή/και ενδυναμώνονται οι τάσεις που δημιουργήθηκαν για να επιτευχθούν οι στόχοι του 2020 μέχρι το 2050 και για το σκοπό αυτό τίθενται δεσμεύσεις και στόχοι για τις εκπομπές, επιτυγχάνονται υψηλοί ρυθμοί βελτίωσης της ενεργειακής απόδοσης και εξοικονόμησης ενέργειας, ενώ και η συμμετοχή των τεχνολογιών διαμορφώνεται στη βάση του ελαχίστου κόστους [1].

### 5.5.1 Η ηλεκτροπαραγωγή στην Ηπειρωτική Ελλάδα το 2017

Το ενεργειακό μίγμα για το 2017, σύμφωνα με τα πληροφοριακά δελτία που εκδίδονται κάθε μήνα από το ΛΑΓΗΕ, αποτυπώνεται στον παρακάτω πίνακα [2]. Τα διαγράμματα και οι πίνακες από τους οποίους προέκυψε παρουσιάζονται Παράρτημα Ι.

ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΟ ΜΙΓΜΑ ΓΙΑ ΤΟ ΕΤΟΣ 2017	
Products	KWh
Electricity, production mix GR/GR U 2017	1
Materials/fuels	
Electricity, hydropower, at power plant/GR U	0,067
Electricity, lignite, at power plant/GR U	0,316
Electricity, natural gas, at power plant/UCTE U	0,297
Electricity, at wind power plant/RER U	0,0921
Electricity, at cogen ORC 1400kWth, wood, allocation exergy/CH U	0,034
Electricity, production mix photovoltaic, at plant/CH U	0,0625

Πίνακας 5: Ενεργειακό μίγμα Ηπειρωτικής Ελλάδας 2017. [2]

### 5.5.2 Εξέλιξη της ηλεκτροπαραγωγής στην Ηπειρωτική Ελλάδα έως το 2050

Ο τομέας της ηλεκτροπαραγωγής αναμένεται ότι θα εμφανίσει σημαντικές διαφοροποιήσεις την περίοδο έως το 2050, καθώς ένας μεγάλος αριθμός των μέτρων που αφορούν στην χάραξη εθνικής πολιτικής, αναφέρεται στο συγκεκριμένο

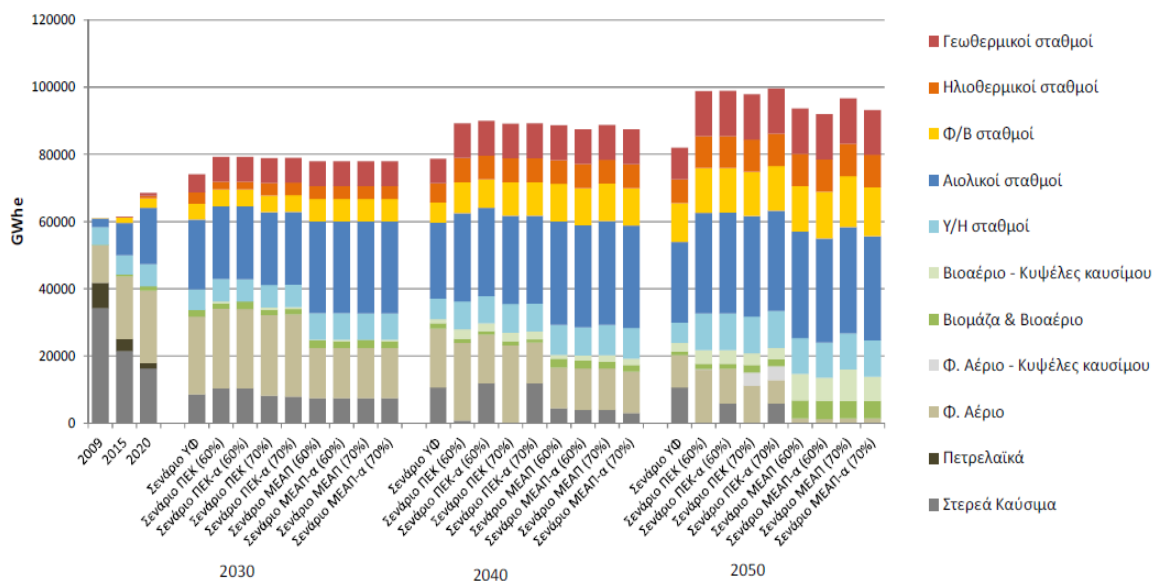
τομέα. Για την εξέλιξη της ηλεκτροπαραγωγής ακολουθούνται κυρίως τρία σενάρια τα οποία παρουσιάζονται παρακάτω:

- Το Σενάριο «Υφιστάμενων πολιτικών» (Σενάριο ΥΦ) υποθέτει συντηρητική υλοποίηση των πολιτικών για την ενέργεια και το περιβάλλον. Προβλέπεται μέτριο επίπεδο περιορισμού των αερίων του θερμοκηπίου μέχρι το 2050 τουλάχιστον κατά 40% σε σχέση με το 2005. Προβλέπονται επίσης μέτριες διεισδύσεις τεχνολογιών ΑΠΕ και εξοικονόμησης ενέργειας ως συνέπεια των συντηρητικών πολιτικών υλοποίησής του.
- Το Σενάριο «Μέτρων Μεγιστοποίησης ΑΠΕ» (Σενάριο ΜΕΑΠ) υποθέτει τη μεγιστοποίηση της διείσδυσης των ΑΠΕ στα επίπεδα του 100% στην ηλεκτροπαραγωγή και σε πολύ μεγάλη κλίμακα συνολικά, με στόχο τη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου κατά 60%-70%, με μεγάλη εξοικονόμηση ενέργειας στα κτίρια και τις μεταφορές. Το ίδιο σενάριο εξετάζεται με χρήση εισαγωγών ηλεκτρικής ενέργειας που θα φέρουν μείωση του κόστους στον τομέα ηλεκτρισμού λόγω λιγότερων επενδύσεων και αγορών ηλεκτρικής ενέργειας σε χαμηλότερες τιμές (Σενάριο ΜΕΑΠ-α).
- Το Σενάριο «Περιβαλλοντικών Μέτρων Ελαχίστου Κόστους» (Σενάριο ΠΕΚ) όπου το μίγμα των ενεργειακών τεχνολογιών επιλέγεται με βάση την πολιτική ελαχίστου κόστους για μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου κατά 60%-70%, ενώ παράλληλα γίνεται μεγάλη εξοικονόμηση ενέργειας στα κτίρια και τις μεταφορές. Το επίπεδο διείσδυσης των ΑΠΕ είναι μεγάλο αλλά δεν ξεπερνάει το 85% στην ηλεκτροπαραγωγή λόγω του περιορισμού στις απαιτούμενες μονάδες αποθήκευσης. Ειδικά βάσει των υποθέσεων που διαμορφώνονται για το Σενάριο ΠΕΚ, μελετάται και ένα εναλλακτικό σενάριο (Σενάριο ΠΕΚ-α), στο οποίο γίνεται η υπόθεση ότι την περίοδο 2035-2040 εντάσσεται σε δύο από τις υπάρχουσες (και νεότερες) ατμοηλεκτρικές μονάδες λιγνίτη (ισχύος 1,1GW) τεχνολογία δέσμευσης και αποθήκευσης διοξειδίου του άνθρακα (CCS). Το εναλλακτικό αυτό σενάριο στην ουσία εξετάζει την δυνατότητα παράτασης της παραμονής του εγχώριου στερεού καυσίμου στο σύστημα ηλεκτροπαραγωγής.

Όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα, η συνολική παραγωγή ηλεκτρισμού στη χώρα θα αυξηθεί σε σχέση με τα σημερινά επίπεδα έως και κατά 63% έως το 2050 (μέχρι και 45% σε σχέση με το 2020)

και θα βασίζεται σε όλα τα σενάρια σε «καθαρότερες» πηγές. Συγκεκριμένα, ενώ σήμερα, το 56% της ηλεκτροπαραγωγής προέρχεται από σταθμούς παραγωγής με καύσιμο το λιγνίτη, σύμφωνα με το Σενάριο ΥΦ το μερίδιο του λιγνίτη θα μειωθεί στο 13% το 2050, ενώ στα υπόλοιπα σενάρια θα μηδενιστεί. Εξαίρεση αποτελεί το Σενάριο ΠΕΚ-α, στο οποίο λόγω της ένταξης τεχνολογίας δέσμευσης και αποθήκευσης CO<sub>2</sub> (CCS) παραμένουν λιγνιτικές μονάδες έως το τέλος της περιόδου 2020-2050, κατέχοντας μερίδιο 6% στην ηλεκτροπαραγωγή το 2050 [1].





Εικόνα 35: Εξέλιξη της ηλεκτροπαραγωγής ανά καύσιμο για κάθε εξεταζόμενο σενάριο. [1]

Έχοντας ως πηγή τον Εθνικό Ενεργειακό Σχεδιασμό (Οδικός χάρτης για το 2050) που εκδόθηκε τον Μάρτιο του 2012 από το ΥΠΕΚΑ, θα εισάγουμε δεδομένα για το ενεργειακό μίγμα που θα έχουμε σε βάθος χρόνου το 2050. Κατά τον υπολογισμό των δεδομένων χρησιμοποιήσαμε το Σενάριο ΥΦ και Σενάριο ΠΕΚ 70%. Επειδή μέσω του λογισμικού δεν μας δινόταν η δυνατότητα υπολογισμού της ενέργειας που προέρχεται από γεωθερμία κατά τον υπολογισμό του ενεργειακού μίγματος μοιράσαμε το ποσοστό συμμετοχής της στο τελικό ενεργειακό μίγμα στις υπόλοιπες μορφές ηλεκτροπαραγωγής. Έτσι υπολογίσαμε τα παρακάτω δεδομένα για το ενεργειακό μίγμα στις περιπτώσεις ηλεκτροπαραγωγής i) το 2017, ii) το 2050 με Σενάριο ΥΦ και iii) το 2050 με Σενάριο ΠΕΚ 70% [1].

ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΟ ΜΙΓΜΑ ΓΙΑ ΤΟ ΕΤΟΣ 2050 ΣΕΝΑΡΙΟ ΥΦ	
Products	KWh
Electricity, production mix GR/GR U 2050	1
Materials/fuels	
Electricity, hydropower, at power plant/GR U	0,0931
Electricity, lignite, at power plant/GR U	0,142
Electricity, natural gas, at power plant/UCTE U	0,154
Electricity, at wind power plant/RER U	0,325
Electricity, at cogen ORC 1400kWth, wood, allocation exergy/CH U	0,0589
Electricity, production mix photovoltaic, at plant/CH U	0,227

Πίνακας 6: Ενεργειακό μίγμα Ηπειρωτικής Ελλάδας 2050 σεναρίου ΥΦ. [1]

ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΟ ΜΙΓΜΑ ΓΙΑ ΤΟ ΕΤΟΣ 2050 ΣΕΝΑΡΙΟ ΠΕΚ 70%	
Products	KWh
Electricity, production mix GR/GR U 2050	1
Materials/fuels	
Electricity, hydropower, at power plant/GR U	0,133
Electricity, natural gas, at power plant/UCTE U	0,176
Electricity, at wind power plant/RER U	0,34
Electricity, at cogen ORC 1400kWh, wood, allocation exergy/CH U	0,083
Electricity, production mix photovoltaic, at plant/CH U	0,268

Πίνακας 7: Ενεργειακό μίγμα Ηπειρωτικής Ελλάδας 2050 σεναρίου ΠΕΚ 70%. [1]

Στη συνέχεια εξετάστηκαν τα εξής σενάρια για την αποθήκευση 1kWh:

α) Στο Σενάριο 1 υπολογίζονται οι εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα της διεργασίας που περιγράφηκε στις προηγούμενες ενότητες με δεδομένα εισόδου το ενεργειακό μίγμα της Ηπειρωτικής Ελλάδας σε κάθε μία από τις τέσσερις περιπτώσεις. Στο Σενάριο 1 έχει γίνει η παραδοχή ότι στο στάδιο διαχωρισμού του διοξειδίου του άνθρακα, η θερμότητα που απαιτείται προέρχεται εξολοκλήρου από την απορριπτόμενη θερμότητα που παράγεται στο στάδιο της σύνθεσης του μεθανίου.

β) Στο Σενάριο 2 υπολογίζονται οι εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα της ίδιας διεργασίας με ίδια δεδομένα εισόδου με το Σενάριο 1 με την εξής διαφοροποίηση: στο στάδιο του διαχωρισμού του διοξειδίου του άνθρακα ένας μέρος της απαιτούμενης θερμότητας (500 MJ), όπως προκύπτει από την εικόνα 33, προέρχεται από καύση Φυσικού Αερίου και όχι εξολοκλήρου από αυτή που παράγεται στο στάδιο της σύνθεσης του μεθανίου όπως στο Σενάριο 1.

γ) Στο Σενάριο 3 υπολογίζονται οι εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα θεωρώντας πως ο συνολικός βαθμός απόδοσης ολόκληρης της διεργασίας παραγωγής υποκατάστατου Φυσικού Αερίου είναι 85% και με δεδομένα εισόδου τα ίδια με τα προηγούμενα σενάρια [7].

Όπως προκύπτει από τον πίνακα 8 για τα τρία σενάρια που εξετάστηκαν, το μεγαλύτερο ποσοστό των εκπομπών του διοξειδίου του άνθρακα παρατηρείται στο στάδιο της ηλεκτρόλυσης και πολύ χαμηλότερο στο στάδιο του διαχωρισμού του διοξειδίου του άνθρακα.

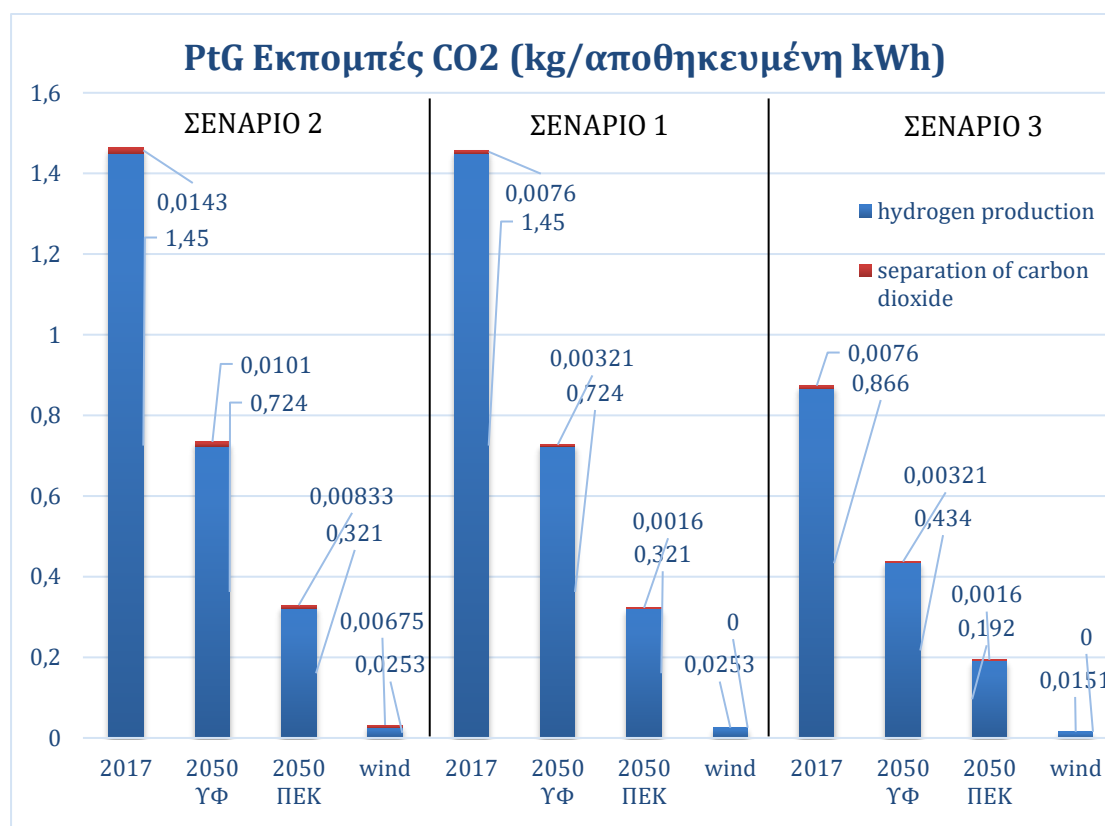
Σημαντικό ρόλο παίζει το ενεργειακό μίγμα προς αποθήκευση. Η μεγαλύτερη διείσδυση των ΑΠΕ και η μείωση λειτουργίας των συμβατικών μονάδων επιφέρει μείωση των εκπομπών ενώ η αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας μόνο από αιολική παραγωγή έχει σχεδόν μηδενικές εκπομπές.

Καθώς αυξάνεται ο βαθμός απόδοσης της διεργασίας στο μέγιστο, παρατηρείται μείωση των εκπομπών, ενώ η καύση φυσικού αερίου στο στάδιο του διαχωρισμού CO<sub>2</sub> για την παραγωγή θερμότητας αυξάνει τις εκπομπές της συνολικής διεργασίας.

Συγκεντρωτικά παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του SimaPro στον παρακάτω πίνακα, ενώ αναλυτικά παρουσιάζονται τα διαγράμματα στο Παράρτημα II.

			Hydrogen production	Separation of carbon dioxide	Total
ΣΕΝΑΡΙΟ 1	Electricity mix	2017	1,45	0,0076	1,457
		2050 ΥΦ	0,724	0,00321	0,728
		2050 ΠΕΚ	0,321	0,0016	0,322
		wind	0,0253	0	0,0253
ΣΕΝΑΡΙΟ 2		2017	1,45	0,0143	1,46
		2050 ΥΦ	0,724	0,0101	0,734
		2050 ΠΕΚ	0,321	0,00833	0,329
		wind	0,0253	0,00675	0,032
ΣΕΝΑΡΙΟ 3		2017	0,866	0,0076	0,873
		2050 ΥΦ	0,434	0,00321	0,437
		2050 ΠΕΚ	0,192	0,0016	0,193
		wind	0,0151	0	0,0151

Πίνακας 8: Εκπομπές CO<sub>2</sub>(kg/αποθηκευμένη kWh) της τεχνολογίας PtG



Διάγραμμα 1: Εκπομπές CO<sub>2</sub>(kg/αποθηκευμένη kWh) της τεχνολογίας PtG

## 5.6 Υπολογισμός εκπομπών CO<sub>2</sub> στην τεχνολογία αναστρέψιμων υδροηλεκτρικών (PHS)

Τα αναστρέψιμα υδροηλεκτρικά (PHS) αφορούν το 99% της ηλεκτρικής αποθήκευσης σήμερα και είναι, όπως και η PtG, τεχνολογία αποθήκευσης μεγάλης κλίμακας.

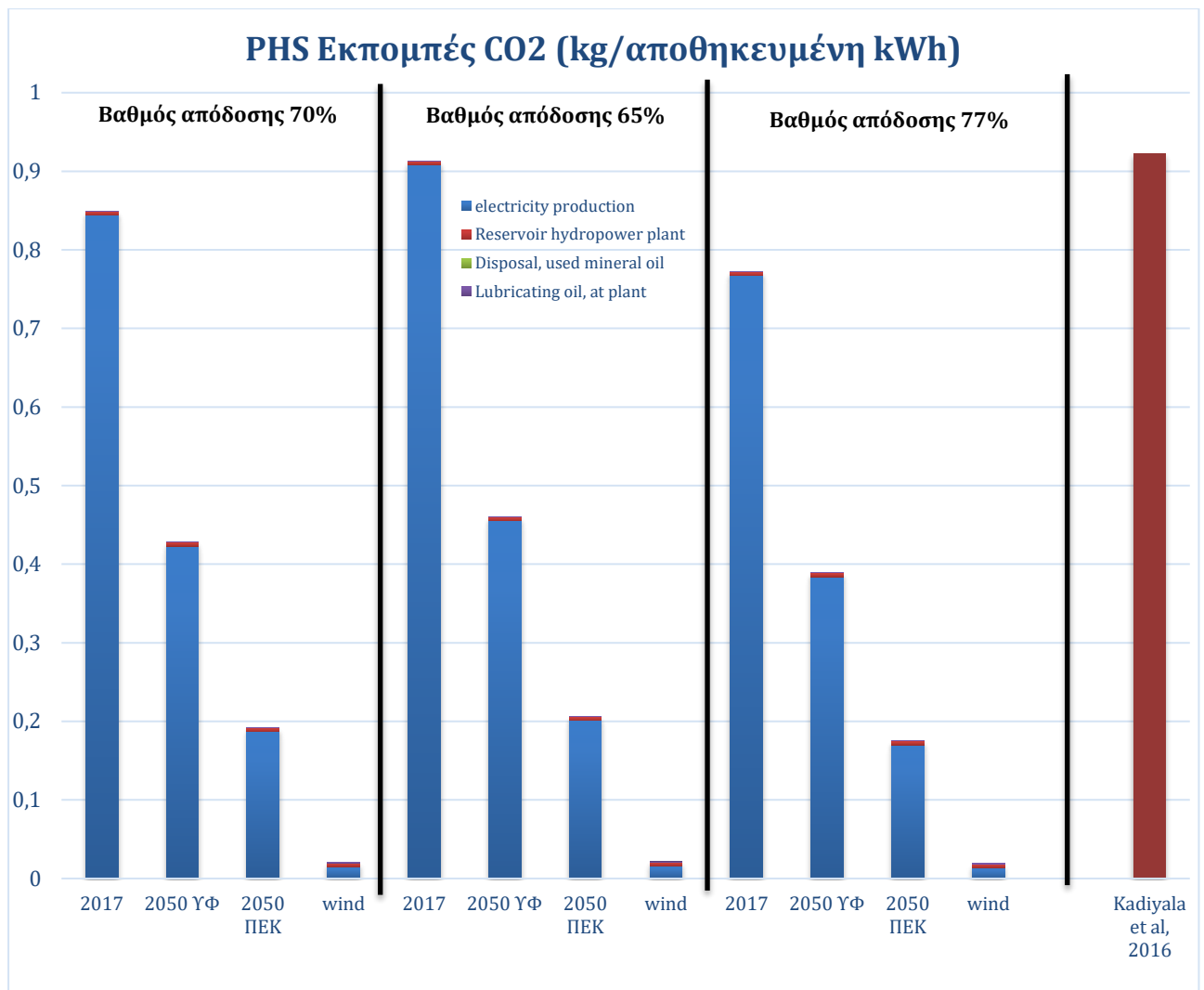
Ένα επιπλέον κριτήριο για την κατηγοριοποίηση των τεχνολογιών αποθήκευσης κατά την αποθήκευση ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές είναι η ικανότητα αποθήκευσης τους ανάλογα με τις περιόδους φόρτισης/αποφόρτισης. Οι περίοδοι φόρτισης και αποφόρτισης των δύο αυτών τεχνολογιών είναι αρκετά μεγάλες, με την τεχνολογία PtG να φτάνει και το ένας έτος.

Το σύστημα PHS έχει εκπομπές εξαιτίας της κατανάλωσης ενέργειας από τις αντλίες. Οι εκπομπές τους κυμαίνονται από 5.6 έως 923 g/αποθηκευμένη kWh [5,6].

Για τον υπολογισμό των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα χρησιμοποιήθηκε το ίδιο ενεργειακό μίγμα με αυτό της τεχνολογίας PtG. Συγκεκριμένα υπολογίστηκαν οι εκπομπές της τεχνολογίας PHS, μέσω του λογισμικού SimaPro, με δεδομένα εισαγωγής την ηλεκτροπαραγωγή στην Ελλάδα το 2017, το 2050 αλλά και αποκλειστικά την αιολική παραγωγή. Στους παρακάτω υπολογισμούς θεωρήθηκε βαθμός απόδοσης 70% (Σενάριο 1), και υπολογίστηκαν οι εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα για την αποθήκευση μίας κιλοβατώρας. Καθώς ο βαθμός απόδοσης αυτής της τεχνολογίας κυμαίνεται από 65% έως 77%, εξετάστηκαν αυτά τα δύο ακραία σενάρια για την ίδια παραγωγή (1 kWh) με το πρώτο σενάριο (Σενάριο 2 και 3 αντίστοιχα).

			Electricity production	Reservoir hydropower plant	Disposal, used mineral oil	Lubricating oil, at plant	Total
Βαθμός απόδοσης 70%	Electricity mix	2017	0,844	0,00511	0,00002	0,00000671	<b>0,849</b>
		2050 ΥΦ	0,423	0,00511	0,00002	0,00000671	<b>0,428</b>
		2050 ΠΕΚ	0,187	0,00511	0,00002	0,00000671	<b>0,192</b>
		wind	0,0148	0,00511	0,00002	0,00000671	<b>0,0199</b>
Βαθμός απόδοσης 65%		2017	0,908	0,00511	0,00002	0,00000671	<b>0,913</b>
		2050 ΥΦ	0,455	0,00511	0,00002	0,00000671	<b>0,46</b>
		2050 ΠΕΚ	0,201	0,00511	0,00002	0,00000671	<b>0,207</b>
		wind	0,0159	0,00511	0,00002	0,00000671	<b>0,021</b>
Βαθμός απόδοσης 77%		2017	0,767	0,00511	0,00002	0,00000671	<b>0,772</b>
		2050 ΥΦ	0,384	0,00511	0,00002	0,00000671	<b>0,389</b>
		2050 ΠΕΚ	0,17	0,00511	0,00002	0,00000671	<b>0,175</b>
		wind	0,0134	0,00511	0,00002	0,00000671	<b>0,0185</b>

Πίνακας 9: Εκπομπές CO<sub>2</sub>(kg/αποθηκευμένη kWh) της τεχνολογίας PHS



Διάγραμμα 2: Εκπομπές CO2(kg/αποθηκευμένη kWh) της τεχνολογίας PHS.

Όμοια και με την τεχνολογία αποθήκευσης PtG, οι εκπομπές CO2 εξαρτώνται σημαντικά από το ενεργειακό μίγμα προς αποθήκευση. Με τους τρεις διαφορετικούς βαθμούς απόδοσης αποτυπώθηκε ένα εύρος εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα ώστε να συγκριθεί με αυτό που αναγράφεται στη βιβλιογραφία [6]. Όσο αυξάνεται ο βαθμός απόδοσης τόσο μειώνονται οι εκπομπές CO2.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Εθνικός Ενεργειακός Σχεδιασμός, EnPlan-RoadMap 2050\_dtld-Apr-12.pdf
- [2] <http://www.lagie.gr/agora/analysis-agoras/miniaia-deltia-iep/>
- [3] Gerda Reiter & Johannes Lindorfer , 2015, Global warming potential of hydrogen and methane production from renewable electricity via power-to-gas technology. Int J Life Cycle Assess (2015) 20:477–489
- [4] Harmen Sytze de Boer, Lukas Grond , Henk Moll , Ren\_e Benders, 2014, The application of power-to-gas, pumped hydro storage and compressed air energy storage in an electricity system at different wind power penetration levels, Energy 72 (2014) 360e370
- [5] Manuel Gotz, Jonathan Lefebvre, Friedemann Mors, Amy McDaniel Koch, Frank Graf, Siegfried Bajohr, Rainer Reimert, Thomas Kolb, 2016, Renewable Power-to-Gas: A technological and economic review, Renewable Energy 85 (2016) 1371-1390
- [6] Akhil Kadiyala , Raghava Kommalapati and Ziaul Huque ,2016, Evaluation of the Life Cycle Greenhouse Gas Emissions from Hydroelectricity Generation Systems, Sustainability 2016, 8, 539; doi:10.3390/su8060539
- [7] Stephan Anger, Dimosthenis Trimis, 2014, Potential of thermally integrated high-temperature electrolysis and methanation for the storage of energy by Power-to-Gas, International Gas Union Research Conference



## Κεφάλαιο 6: Συμπεράσματα

Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές, όπως η αιολική και η ηλιακή ενέργεια, είναι συχνά εξαιρετικά μεταβαλλόμενη. Η υψηλή ταχύτητα ανέμου σε ένα ηλεκτρικό σύστημα και η μεγάλη διείσδυση ΑΠΕ, πρέπει να αντισταθμίζονται είτε με τη μείωση της προσφοράς είτε με την αύξηση της ζήτησης της ηλεκτρικής ενέργειας. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την απόρριψη μεγάλου ποσοστού ενέργειας από ΑΠΕ. Οι τεχνολογίες αποθήκευσης, μπορούν να απορροφήσουν ηλεκτρική ενέργεια όταν η παροχή ηλεκτρισμού υπερβαίνει τη ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας, ενώ παράλληλα εξομαλύνουν και τη μη σταθερή παραγωγή των ΑΠΕ. Το πρόβλημα σχετικά με τα συστήματα αποθήκευσης είναι συχνά το υψηλό κόστος εγκατάστασης.

Προκειμένου να μειωθούν οι εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου (GHG), ο τομέας της ενέργειας πρέπει να επικεντρωθεί στη μείωση εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα. Με τη σημαντική αύξηση της αιολικής και της φωτοβολταϊκής παραγωγής, υπάρχει μία συνεχώς αυξανόμενη ανάγκη για νέες τεχνολογίες ενσωμάτωσης της παραγόμενης αυτής ενέργειας από ΑΠΕ στο ενεργειακό σύστημα. Μεταξύ των άλλων πιθανών στρατηγικών, όπως η επέκταση του δικτύου και η διαχείριση της ζήτησης, η αποθήκευση ενέργειας κερδίζει μεγάλη προσοχή καθώς μπορεί να παίξει τόσο το ρόλο του παραγωγού όσο και του καταναλωτή αλλά και να χρησιμοποιηθεί μακροπρόθεσμα, μεσοπρόθεσμα αλλά και βραχυπρόθεσμα. Τεχνολογίες αποθήκευσης μεγάλης κλίμακας είναι η αντλησιοταμίευση και η τεχνολογία συμπιεσμένου αέρα. Ωστόσο, και οι δύο τεχνολογίες εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από τις τοπικές συνθήκες.

Η τεχνολογία PtG είναι περισσότερο ευέλικτη, δεδομένου ότι εξαρτάται μόνο από την πρόσβαση στο ήδη υπάρχον δίκτυο φυσικού αερίου, ενισχύοντας το δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας και φυσικού αερίου. Μπορεί να κάνει χρήση της περίσσειας ενέργειας από ΑΠΕ και να τη μετασχηματίζει σε φυσικό αέριο, ενώ παράλληλα αξιοποιεί το υφιστάμενο δίκτυο φυσικού αερίου. Επιπλέον, η PtG έχει δυνατότητα αποθήκευσης τεράστιων ποσών πλεονάζουσας ενέργειας σε ήδη υπάρχουσες δομές αποθήκευσης φυσικού αερίου. Μεγαλύτερα συστήματα αναμένεται να αναπτυχθούν λόγω της πολυμορφίας των διάφορων συνιστωσών που περιλαμβάνει ένα σύστημα PtG.

Μέσω του λογισμικού SimaPro, υπολογίστηκαν οι εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα για τις τεχνολογίες PtG και PHS καθώς και οι δύο αποτελούν τεχνολογίες μεγάλης κλίμακας αποθήκευσης. Και στις δύο τεχνολογίες χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα εισόδου του ίδιου ενεργειακού μίγματος και εξετάστηκαν ακραία σενάρια ώστε να υπολογιστούν οι μέγιστες και οι ελάχιστες δυνατές εκπομπές. Όπως προέκυψε από τα αποτελέσματα και τις δύο τεχνολογίες, το μεγαλύτερο



μέρος των εκπομπών οφείλεται στην ηλεκτροπαραγωγή. Με μεγαλύτερη διείσδυση ΑΠΕ μειώνονται κατά πολύ οι εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα.

Στην τεχνολογία PtG το μεγαλύτερο ποσοστό εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα πραγματοποιείται στο στάδιο της ηλεκτρόλυσης και αρκετά μικρότερο στο στάδιο του διαχωρισμού του διοξειδίου του άνθρακα. Αυτό προκύπτει και από τα αποτελέσματα του SimaPro, όπου οι εκπομπές του Σεναρίου 2 είναι ελαφρώς αυξημένες σε σχέση με αυτές του Σεναρίου 1. Στο Σενάριο 3 όπου υπολογίστηκαν οι εκπομπές με το μέγιστο δυνατό βαθμό απόδοσης, παρατηρείται ότι μειώνονται αρκετά σε σχέση με τα δύο προηγούμενα σενάρια.

Οι εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα της τεχνολογίας PHS, όπως προκύπτει από τα αποτελέσματα του SimaPro, κυμαίνονται σχεδόν στα ίδια επίπεδα με τις εκπομπές της τεχνολογίας PtG. Για να αποτυπωθεί και σε αυτή την τεχνολογία το εύρος των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα εξετάστηκαν σενάρια για τους διάφορους συντελεστές απόδοσης.

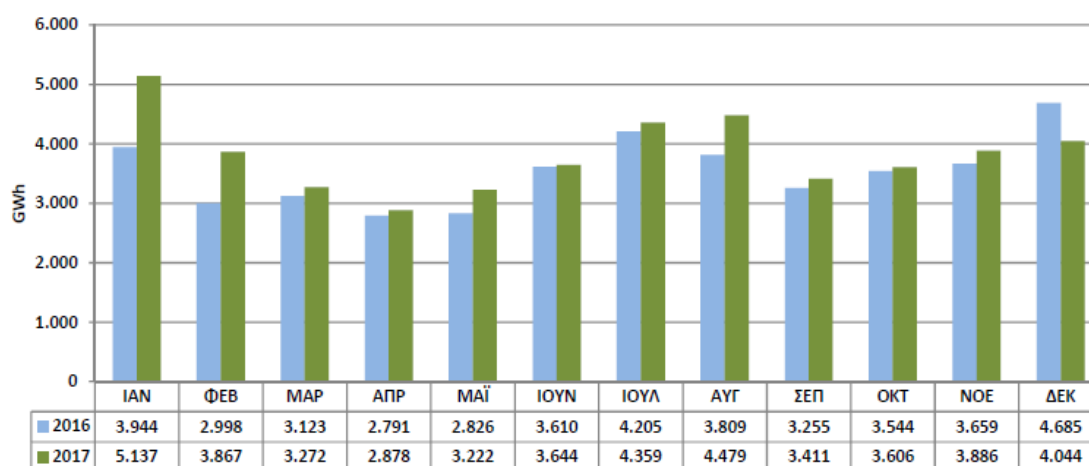
Η περιβαλλοντική συμπεριφορά ως προς τις εκπομπές CO<sub>2</sub> μπορεί να κυμανθεί σε μεγάλα εύρη και για τα δύο συστήματα. Κάτι που σημαίνει ότι δεν υπάρχει μονοσήμαντη απάντηση για το ποια από τις δύο τεχνολογίες αποθηκεύει με λιγότερες εκπομπές.

Η αξιοποίηση θερμότητας που παράγεται από τη σύνθεση του μεθανίου στο στάδιο του διαχωρισμού του διοξειδίου του άνθρακα μειώνει σημαντικά τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα σε σχέση με την καύση φυσικού αερίου για την παραγωγή της. Σημαντικά μειώνονται οι εκπομπές με την αύξηση του βαθμού απόδοσης στις συνολικής διεργασίας παραγωγής υποκατάστατου φυσικού αερίου. Υπό αυτές τις συνθήκες οι εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα της διεργασίας PtG φαίνονται να είναι μικρότερες από αυτές της διεργασίας PHS.

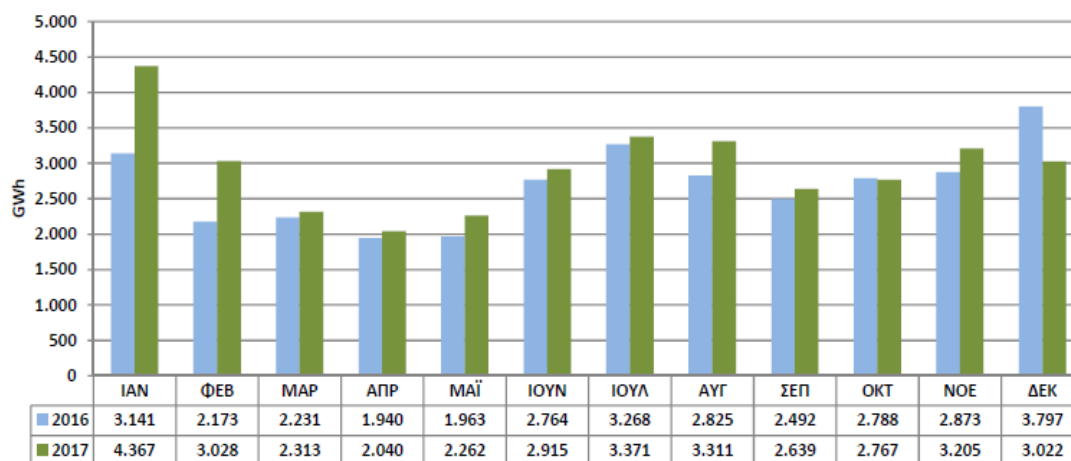
Τέλος, δεν μελετήθηκε η αξιοποίηση της αποθηκευμένης ενέργειας για τις δύο αυτές τεχνολογίες, κάτι που θα άλλαζε σημαντικά τα αποτελέσματα. Καθώς η αποθηκευμένη ενέργεια δεν είναι στην ίδια μορφή, χημική για την τεχνολογία PtG και δυναμική στην τεχνολογία PHS, θα έπρεπε να ληφθεί υπόψη η μετατροπή αυτής της ενέργειας πάλι σε ηλεκτρική.

## Παράρτημα Ι

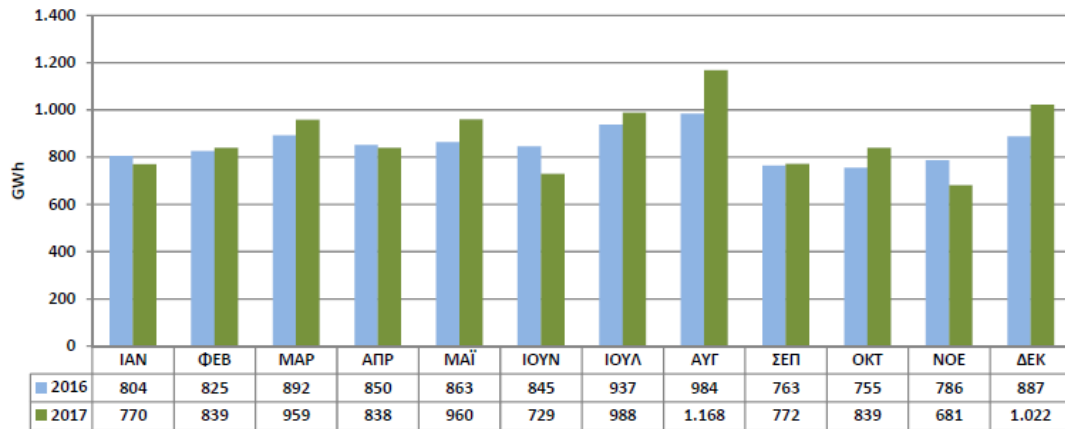
Στο Παράρτημα Ι παρουσιάζονται τα διαγράμματα και οι πίνακες με τα πληροφοριακά δελτία που εκδίδονται κάθε μήνα από το ΛΑΓΗΕ, από όπου προέκυψε το ενεργειακό μίγμα του Ηπειρωτικού Συστήματος της Ελλάδας για το 2017. Στους τρεις πρώτους πίνακες παρουσιάζεται η συνολική παραγωγή αλλά και επιμέρους η παραγωγή από συμβατικές μονάδες και ΑΠΕ.



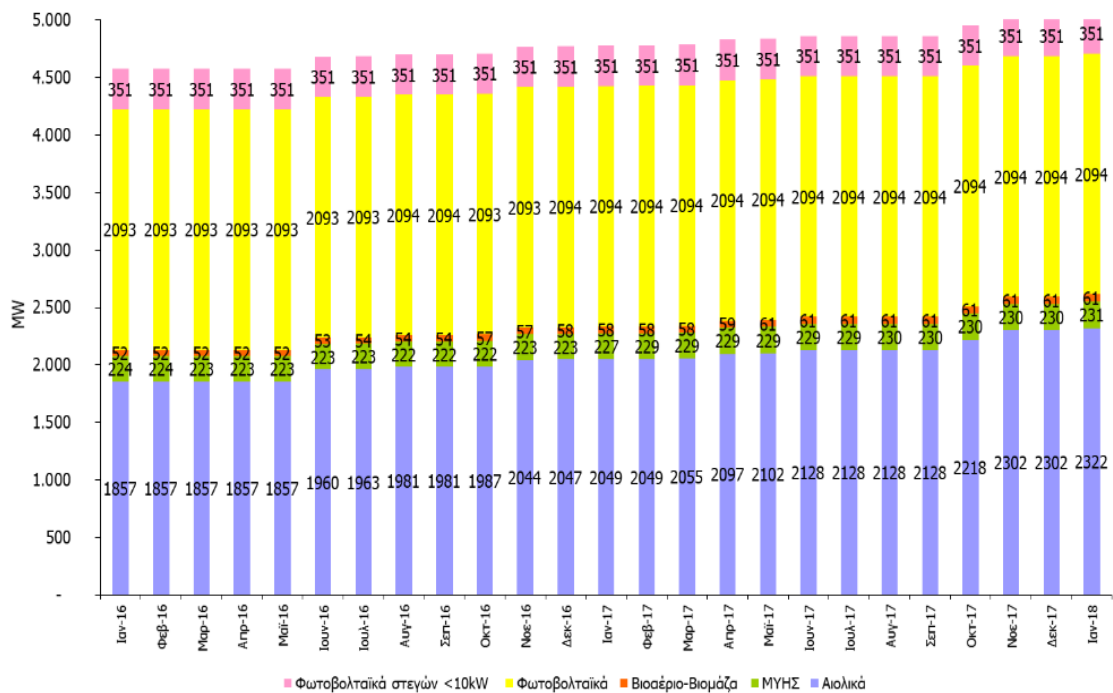
Πίνακας 1: Συνολική παραγωγή από συμβατικές μονάδες και μονάδες ΑΠΕ ανά μήνα για το 2016-2017.



Πίνακας 2: Συνολική παραγωγή από συμβατικές μονάδες ανά μήνα για το 2016-2017.



Πίνακας 3: Συνολική παραγωγή από ΑΠΕ ανά μήνα για το 2016-2017



Διάγραμμα 1: Εγκατεστημένη ισχύς (MW) μονάδων ΑΠΕ στο διασυνδεδεμένο σύστημα.

Στους παρακάτω πίνακες παρουσιάζεται η συνολική παραγωγή ενέργειας (MWh) αλλά και από τις επιμέρους τεχνολογίες ΑΠΕ.

**ΑΙΟΛΙΚΑ**

Μήνας	Ενέργεια (MWh)	Εγκατεστημένη Ισχύς (MW)	Συντελεστής Φόρτισης (%)
Ιανουάριος	433.373	2048,77	28,43%
Φεβρουάριος	426.558	2048,77	30,98%
Μάρτιος	416.887	2054,77	27,27%
Απρίλιος	266.609	2096,75	17,66%
Μάιος	403.709	2102,17	25,81%
Ιούνιος	176.280	2128,47	11,50%
Ιούλιος	418.702	2128,47	26,44%
Αύγουστος	600.513	2.128,47	37,92%
Σεπτέμβριος	282.735	2.128,47	18,45%
Οκτώβριος	370.151	2.218,47	22,43%
Νοέμβριος	340.342	2.301,77	20,54%
Δεκέμβριος	641.370	2.301,77	37,45%
<b>Σύνολο</b>	<b>4.777.228</b>		

**ΜΥΗΣ**

Μήνας	Ενέργεια (MWh)	Εγκατεστημένη Ισχύς (MW)	Συντελεστής Φόρτισης (%)
Ιανουάριος	45.935	227,38	27,15%
Φεβρουάριος	69.850	229,25	45,34%
Μάρτιος	121.262	229,25	71,09%
Απρίλιος	63.015	229,25	38,18%
Μάιος	54.447	229,25	31,92%
Ιούνιος	39.084	229,25	23,68%
Ιούλιος	30.631	229,25	17,96%
Αύγουστος	26.415	230,25	15,42%
Σεπτέμβριος	18.296	230,25	11,04%
Οκτώβριος	19.298	230,25	11,27%
Νοέμβριος	31.968	230,25	19,28%
Δεκέμβριος	65.884	230,25	38,46%
<b>Σύνολο</b>	<b>586.086</b>		

**ΒΙΟΑΕΡΙΟ-ΒΙΟΜΑΖΑ**

Μήνας	Ενέργεια (MWh)	Εγκατεστημένη Ισχύς (MW)	Συντελεστής Φόρτισης (%)
Ιανουάριος	23.794	58,18	54,97%
Φεβρουάριος	21.172	58,18	54,15%
Μάρτιος	23.285	58,18	53,79%
Απρίλιος	22.260	59,15	52,27%
Μάιος	23.144	60,50	51,42%
Ιούνιος	18.693	60,50	42,91%
Ιούλιος	26.003	60,50	57,77%
Αύγουστος	23.689	60,50	52,63%
Σεπτέμβριος	23.273	60,50	53,43%
Οκτώβριος	24.353	61,02	53,64%
Νοέμβριος	23.517	61,02	53,53%
Δεκέμβριος	25.062	61,02	55,20%
<b>Σύνολο</b>	<b>278.245</b>		

**ΣΗΘΥΑ**

Μήνας	Ενέργεια (MWh)	Εγκατεστημένη Ισχύς (MW)
Ιανουάριος	24.396	100,07
Φεβρουάριος	20.327	100,07
Μάρτιος	18.739	100,07
Απρίλιος	16.234	100,07
Μάιος	13.374	100,07
Ιούνιος	10.198	100,07
Ιούλιος	10.626	100,07
Αύγουστος	11.544	100,07
Σεπτέμβριος	11.715	100,07
Οκτώβριος	15.831	100,07
Νοέμβριος	19.744	100,07
Δεκέμβριος	22.487	100,07
<b>Σύνολο (MWh)</b>	<b>195.216</b>	

**ΚΑΤΑΝΕΜΟΜΕΝΗ ΜΟΝΑΔΑ ΣΗΘΥΑ**

Μήνας	Ενέργεια (MWh)	Εγκατεστημένη Ισχύς (MW)	Ισχύς Προτεραιότητας της Μονάδας Συμπαράγωγής (MW) (*)
Ιανουάριος	89.951	334,00	134,60
Φεβρουάριος	78.292	334,00	132,90
Μάρτιος	84.824	334,00	132,90
Απρίλιος	78.245	334,00	132,90
Μάιος	84.071	334,00	132,90
Ιούνιος	72.979	334,00	132,90
Ιούλιος	81.137	334,00	132,90
Αύγουστος	81.144	334,00	132,90
Σεπτέμβριος	81.157	334,00	132,90
Οκτώβριος	83.568	334,00	132,90
Νοέμβριος	81.105	334,00	132,90
Δεκέμβριος	86.737	334,00	132,90
<b>Σύνολο (MWh)</b>	<b>983.210</b>		

**Φ/Β ΔΙΑΣΥΝΔΕΔΕΜΕΝΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ**

ΜΗΝΑΣ	ΕΝΕΡΓΕΙΑ (MWh)	ΕΓΚΑΤΕΣΤΗΜΕΝΗ ΙΣΧΥΣ (MW)	ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ (%) (**)
Ιανουάριος	132.145,75	2.093,68	8,48%
Φεβρουάριος*	182.549,25	2.093,68	12,97%
Μάρτιος	279.753,40	2.093,68	17,96%
Απρίλιος	333.669,50	2.093,78	22,13%
Μάιος	327.613,36	2.093,82	21,03%
Ιούνιος*	343.747,34	2.093,91	22,80%
Ιούλιος	366.285,09	2.093,91	23,51%
Αύγουστος	360.384,91	2.093,87	23,13%
Σεπτέμβριος	302.460,27	2.093,87	20,06%
Οκτώβριος*	285.147,28	2.093,97	18,30%
Νοέμβριος	165.273,64	2.093,97	10,96%
Δεκέμβριος	164.077,61	2.093,97	10,53%
<b>ΣΥΝΟΛΟ (MWh)</b>	<b>3.243.107,42</b>		

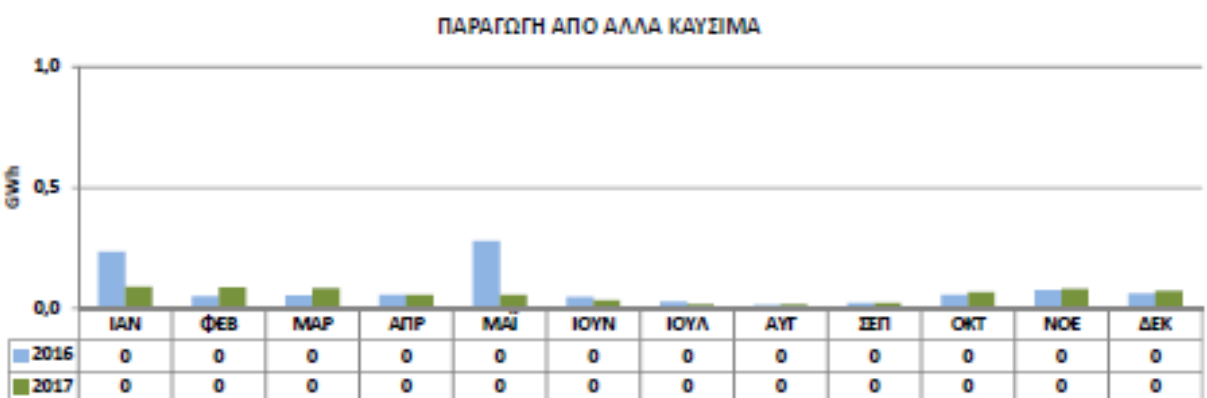
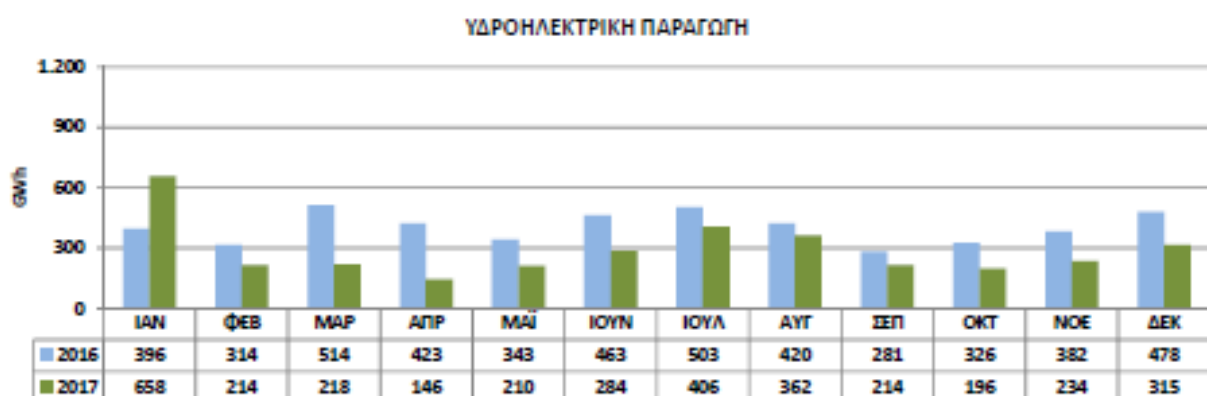
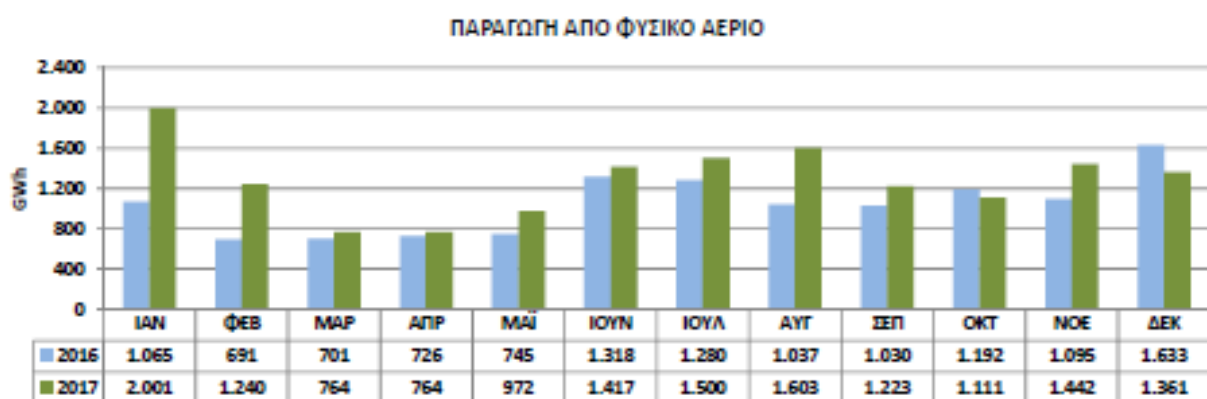
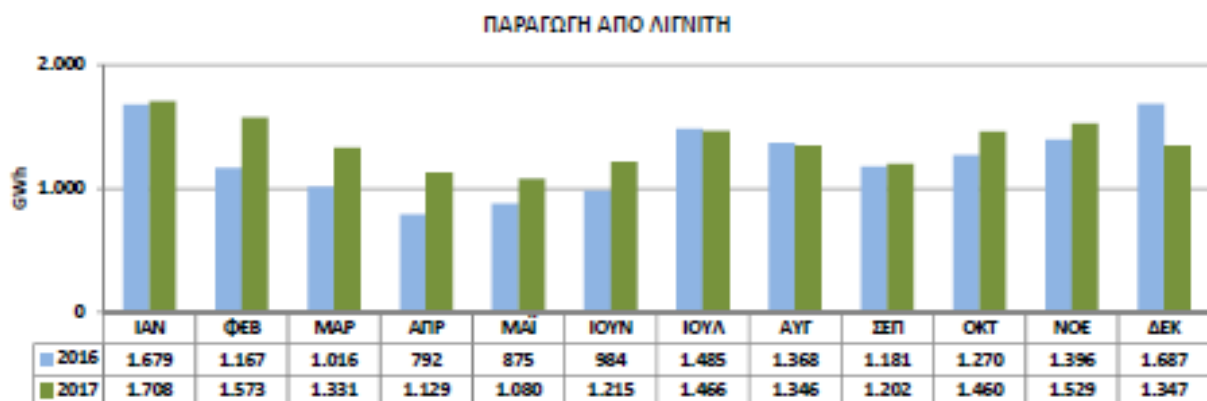
\*Μήνες εκκαθαριστικών λογαριασμών για τα Φ/Β ΧΤ

Πίνακας 4: Παραγωγή ενέργειας ανά τεχνολογία ΑΠΕ και ΣΥΘΥΑ.

		Κατανάλωση ενέργειας στα Όρια του Συστήματος				"Πραγματική" Κατανάλωση ενέργειας			
		Κατανάλωση ενέργειας στα Όρια του Συστήματος *				"Πραγματική" Κατανάλωση ενέργειας **			
		MWh	% διαφορά σε σχέση με τον αντίστοιχο μήνα του προηγούμενου έτους	αθροιστική από την αρχή του εκάστοτε έτους (MWh)	% διαφορά σε σχέση με τους αντίστοιχους μήνες του προηγούμενου έτους	MWh	% διαφορά σε σχέση με τον αντίστοιχο μήνα του προηγούμενου έτους	αθροιστική από την αρχή του εκάστοτε έτους (MWh)	% διαφορά σε σχέση με τους αντίστοιχους μήνες του προηγούμενου έτους
2017	Ιανουάριος	4.963.603	14,69	4.963.603,00	14,69	5.193.319	12,17	5.193.319,00	12,17
	Φεβρουάριος	3.901.291	7,70	8.864.894,00	11,50	4.200.516	6,45	9.393.835,00	9,54
	Μάρτιος	3.750.241	-0,68	12.615.135,00	7,58	4.195.777	0,81	13.589.612,00	6,69
	Απρίλιος	3.245.683	1,74	15.860.818,00	6,33	3.686.095	1,18	17.275.707,00	5,46
	Μάιος	3.408.306	4,07	19.269.124,00	5,93	3.847.716	3,21	21.123.423,46	5,04
	Ιούνιος	3.774.374	-4,53	23.043.498,00	4,06	4.189.770	-4,83	25.313.193,85	3,27
	Ιούλιος	4.564.392	-1,04	27.607.890,00	3,18	5.029.989	-1,09	30.343.182,67	2,52
	Αύγουστος	4.379.435	2,73	31.987.325,00	3,12	4.844.589	2,51	35.187.771,63	2,52
	Σεπτέμβριος	3.667.673	2,91	35.654.998,00	3,10	4.062.072	2,76	39.249.843,62	2,55
	Οκτώβριος	3.457.418	-2,14	39.112.416,00	2,61	3.840.946	-0,69	43.090.789,48	2,25
	Νοέμβριος	3.909.386	2,91	43.021.802,00	2,64	4.182.351	2,20	47.273.140,27	2,24
	Δεκέμβριος	4.291.107	-6,61	47.312.909,00	1,72	4.593.691	-6,16	51.866.831,45	1,44

Πίνακας 5: Συνολική παραγωγή ενέργειας στο Διασυνδεδεμένο σύστημα και στα ΜΔΝ.

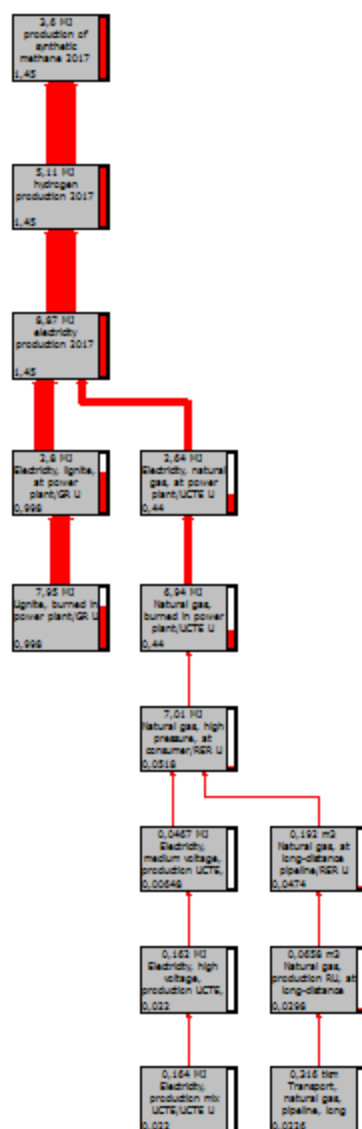
Στη συνέχεια η συνολική παραγωγή των συμβατικών μονάδων ανάλογα με το καύσιμο το οποίο καταναλώθηκε. Όπως φαίνεται το μεγαλύτερο μέρος της παραγωγής προέρχεται από λιγνίτη, μετά από Φυσικό αέριο και τέλος από υδροηλεκτρικά.



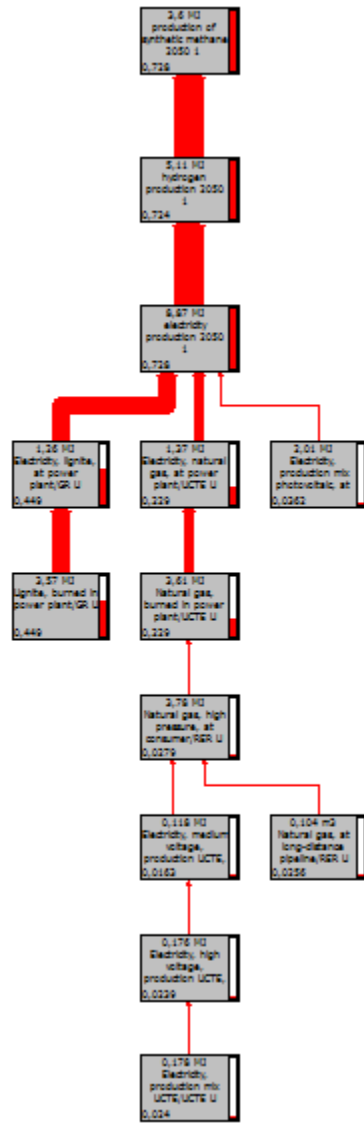
Πίνακας 6: Συνολική παραγωγή από συμβατικές μονάδες στο Σύστημα ανά καύσιμο.

## Παράρτημα II

Στο δεύτερο Παράρτημα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από το SimaPro για τα διάφορα σενάρια που εξετάστηκαν. Τα διαγράμματα αφορούν εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα σε κάθε ένα από τα στάδια της κάθε τεχνολογίας. Τα παρακάτω διαγράμματα αφορούν την τεχνολογία PtG για τα τρία σενάρια που εξετάστηκαν.

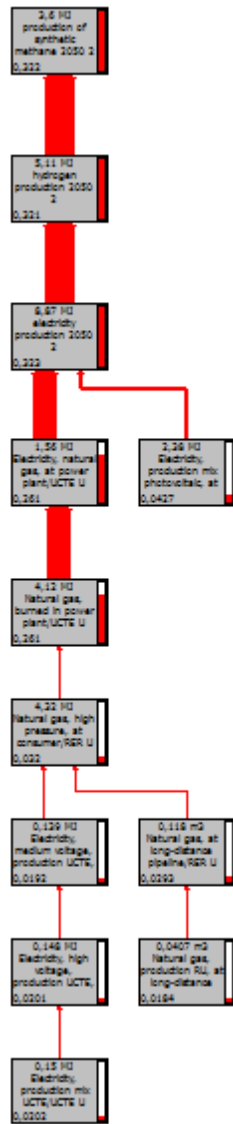


Διάγραμμα 1: Εκπομπές CO<sub>2</sub> για την αποθήκευση 1kWh από την ηλεκτροπαραγωγή του 2017(σενάριο 1).

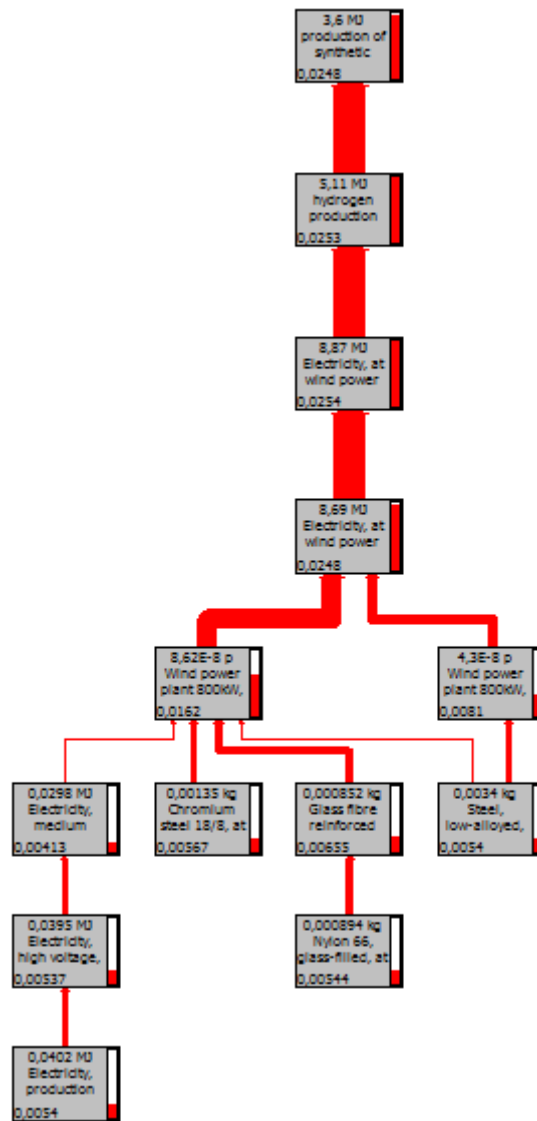


Διάγραμμα 2: Εκπομπές CO<sub>2</sub> για την αποθήκευση 1kWh από την ηλεκτροπαραγωγή του 2050 για το σενάριο ΥΦ(Σενάριο 1) .

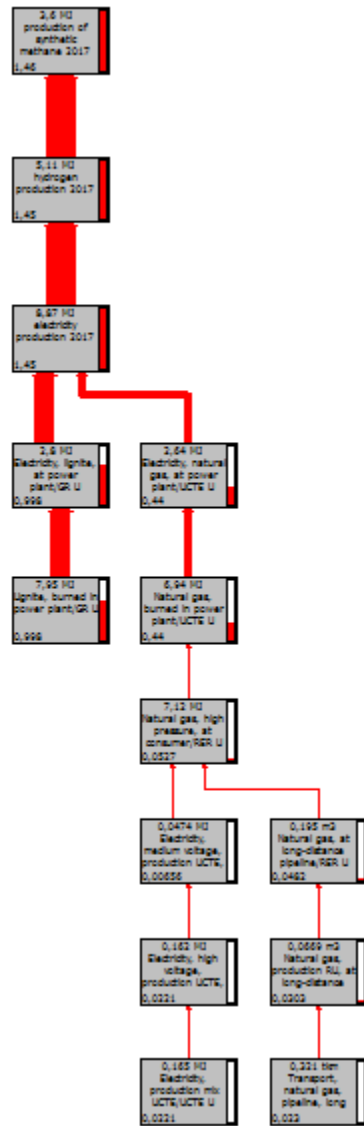




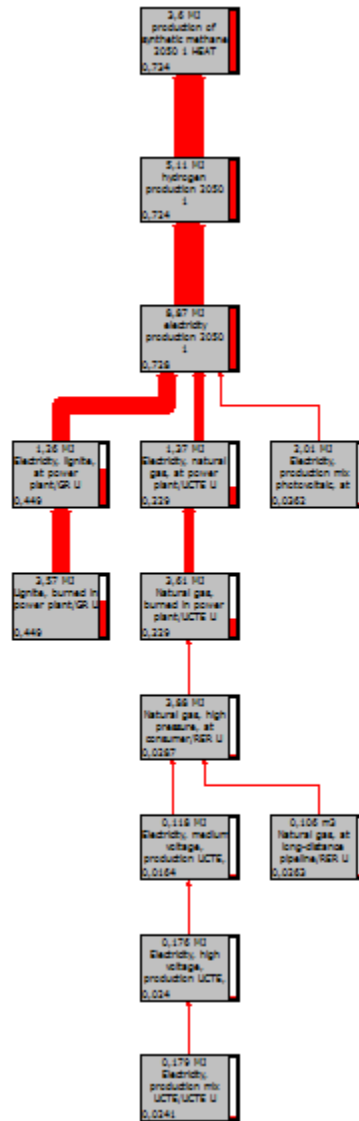
Διάγραμμα 3: Εκπομπές CO<sub>2</sub> για την αποθήκευση 1kWh από την ηλεκτροπαραγωγή του 2050 για το σενάριο ΠΕΚ 70% (Σενάριο 1).



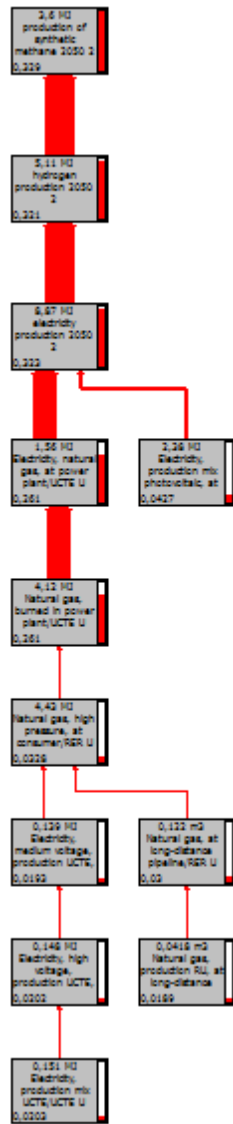
Διάγραμμα 4: Εκπομπές CO<sub>2</sub> για την αποθήκευση 1kWh από αιολική παραγωγή(Σενάριο 1)



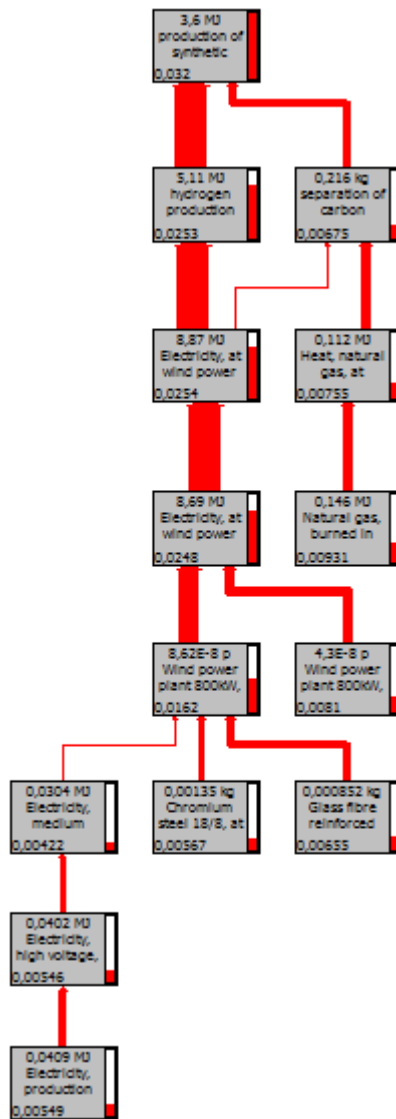
Διάγραμμα 5: Εκπομπές CO<sub>2</sub> για την αποθήκευση 1kWh από την ηλεκτροπαραγωγή του 2017(Σενάριο ).



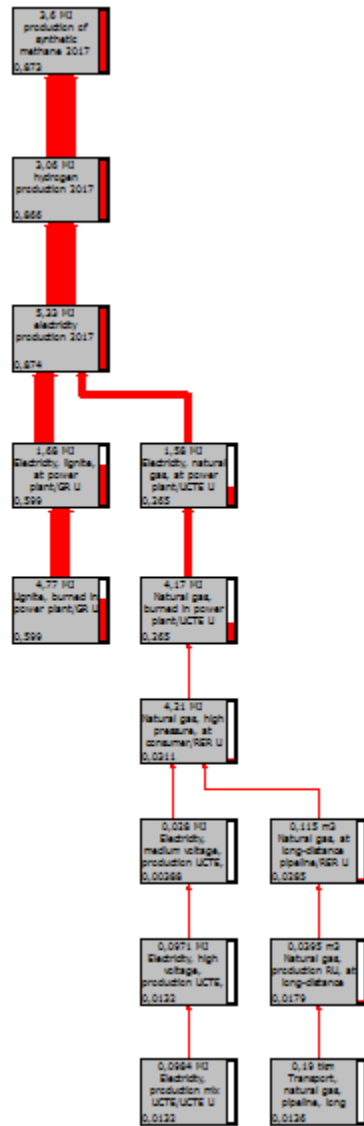
Διάγραμμα 6: Εκπομπές CO<sub>2</sub> για την αποθήκευση 1kWh από την ηλεκτροπαραγωγή του 2050 για το σενάριο ΥΦ(Σενάριο 2) .



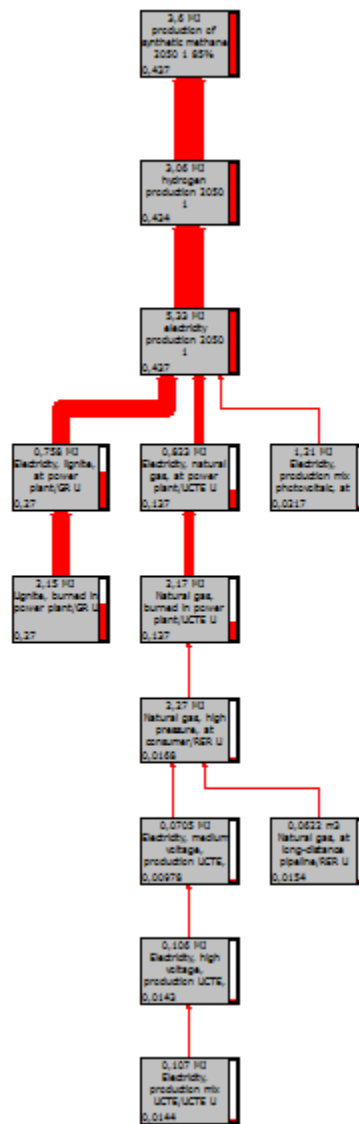
Διάγραμμα 7: Εκπομπές CO<sub>2</sub> για την αποθήκευση 1kWh από την ηλεκτροπαραγωγή του 2050 για το σενάριο ΠΕΚ 70% (Σενάριο 2).



Διάγραμμα 8: Εκπομπές CO<sub>2</sub> για την αποθήκευση 1kWh από αιολική παραγωγή(Σενάριο 2).

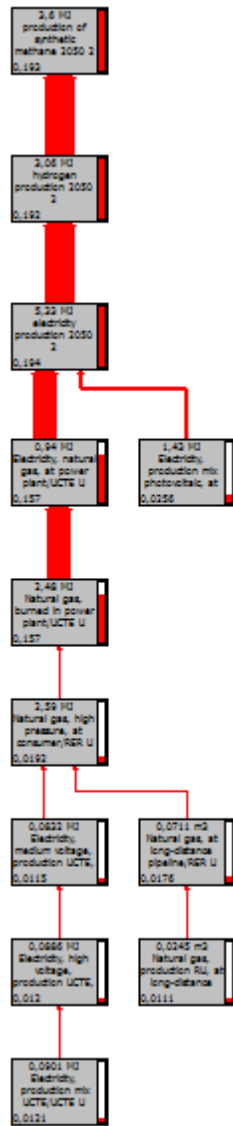


Διάγραμμα9: Εκπομπές CO<sub>2</sub> για την αποθήκευση ενέργειας από την ηλεκτροπαραγωγή του 2017 (Σενάριο 3).

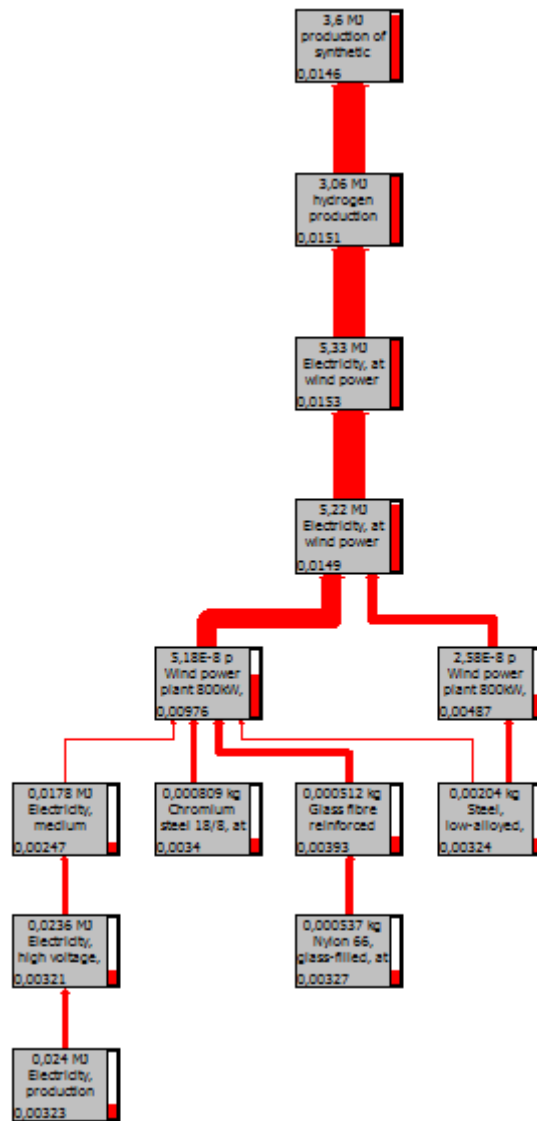


Διάγραμμα 10: Εκπομπές CO<sub>2</sub> για την αποθήκευση ενέργειας από την ηλεκτροπαραγωγή του 2050 για το σενάριο ΥΦ(Σενάριο 3) .



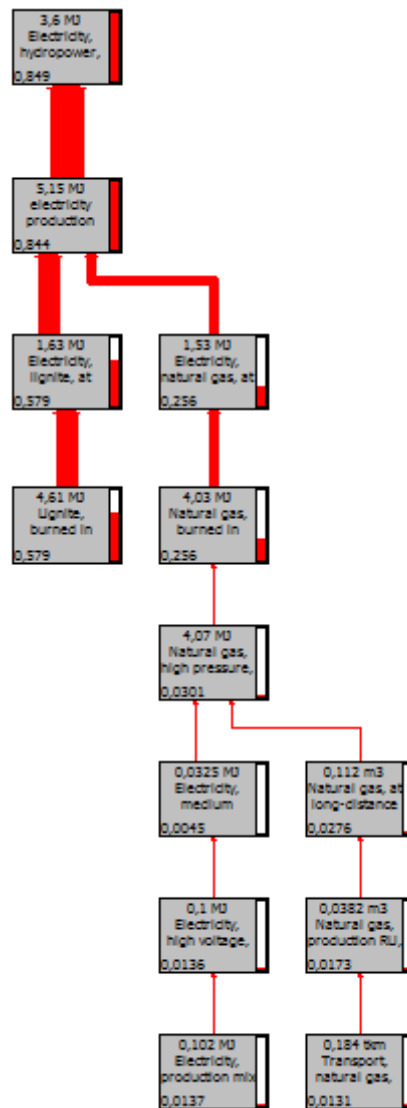


Διάγραμμα 11: Εκπομπές CO<sub>2</sub> για την αποθήκευση ενέργειας από την ηλεκτροπαραγωγή του 2050 για το σενάριο ΠΕΚ 70% (Σενάριο 3).

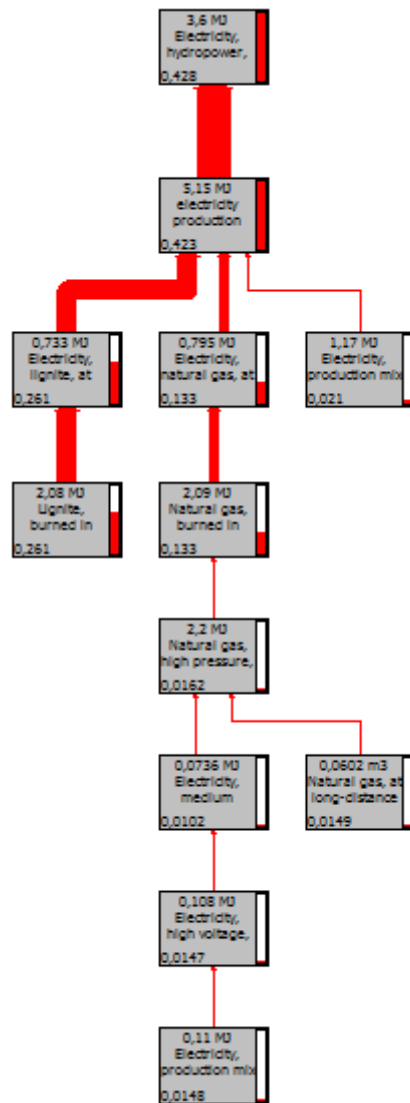


Διάγραμμα 12: Εκπομπές CO<sub>2</sub> για την αποθήκευση ενέργειας από αιολική παραγωγή(Σενάριο 3).

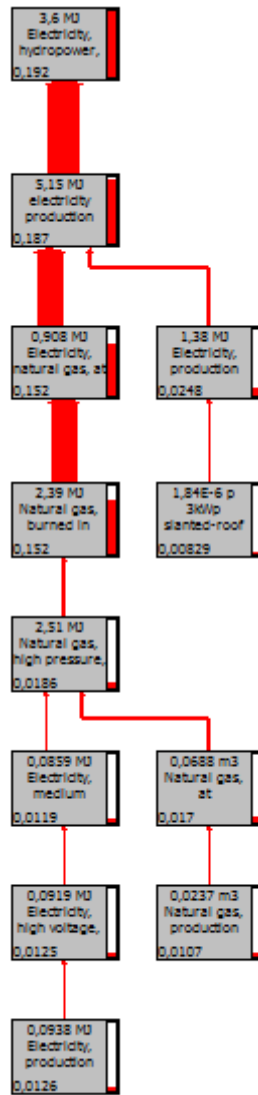
Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα διαγράμματα για τις εκπομπές της τεχνολογίας PHS:



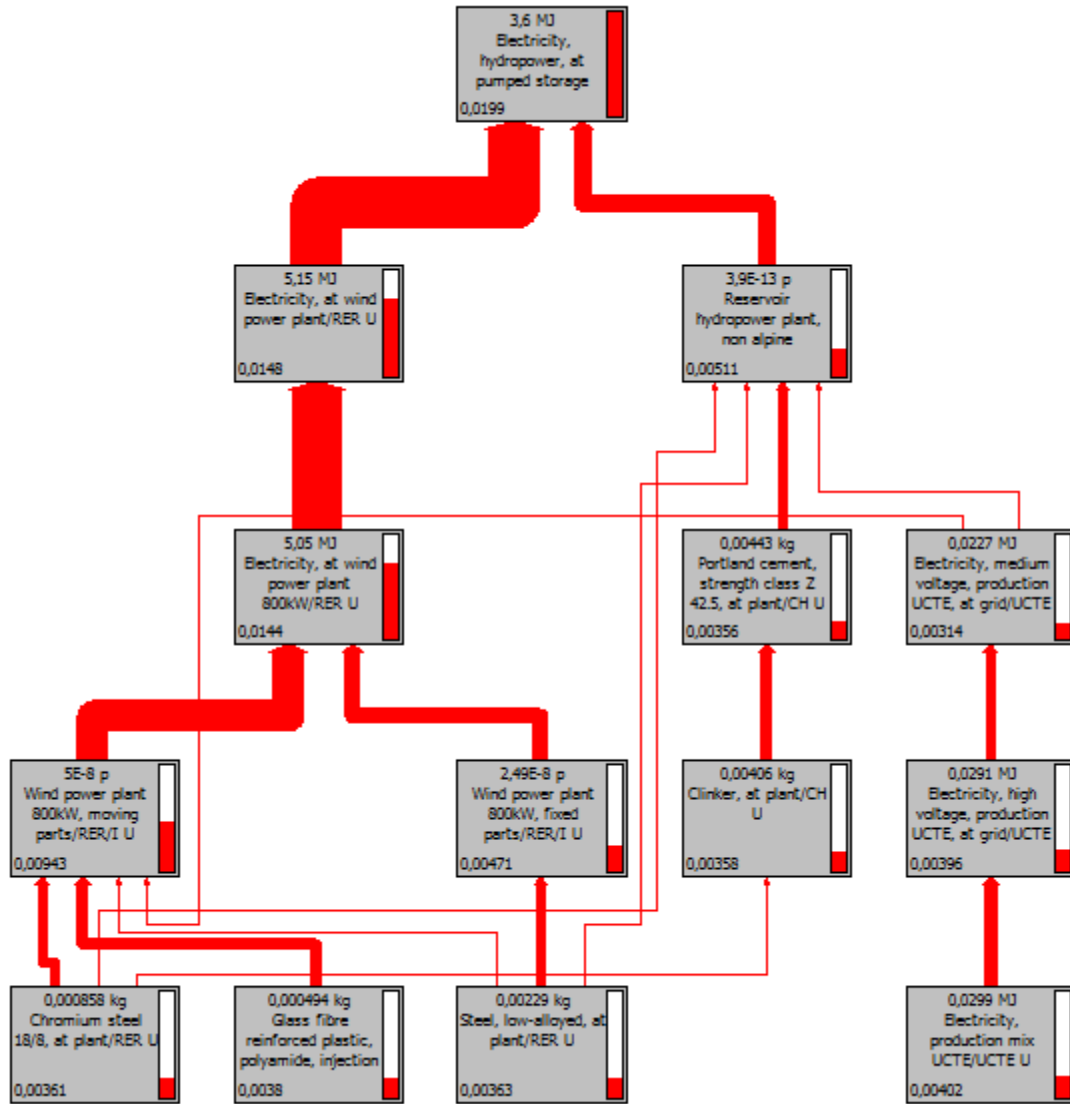
Διάγραμμα 13: Εκπομπές CO<sub>2</sub> για την αποθήκευση 1kWh από την ηλεκτροπαραγωγή του 2017(Βαθμός απόδοσης 70%).



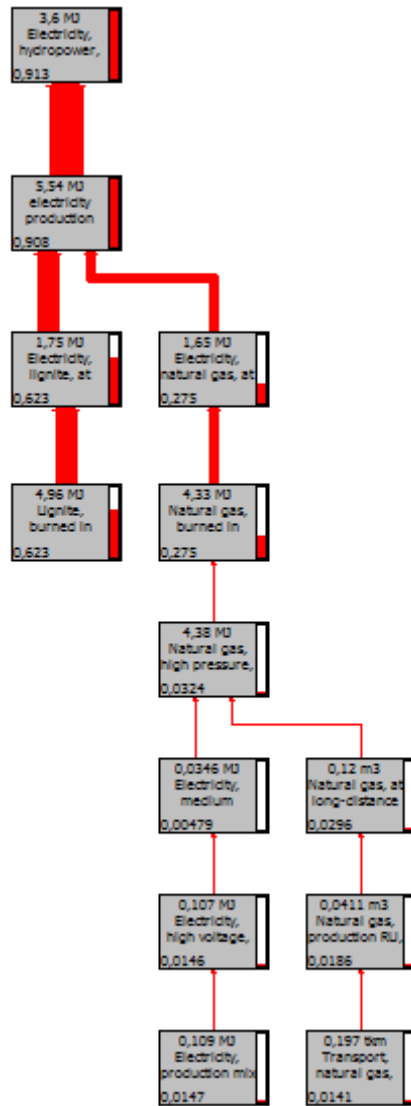
Διάγραμμα 14: Εκπομπές CO<sub>2</sub> για την αποθήκευση 1kWh από την ηλεκτροπαραγωγή του 2050 για το σενάριο ΥΦ(Βαθμός απόδοσης 70%).



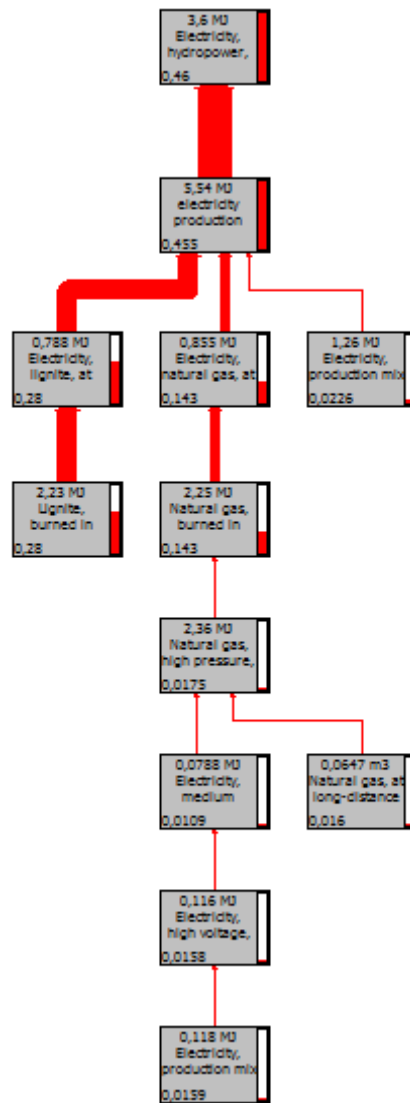
Διάγραμμα 15: Εκπομπές CO<sub>2</sub> για την αποθήκευση 1kWh από την ηλεκτροπαραγωγή του 2050 για το σενάριο ΠΕΚ 70% (Βαθμός απόδοσης 70%).



Διάγραμμα 16: Εκπομπές CO<sub>2</sub> για την αποθήκευση 1kWh από αιολική παραγωγή (Βαθμός απόδοσης 70%).

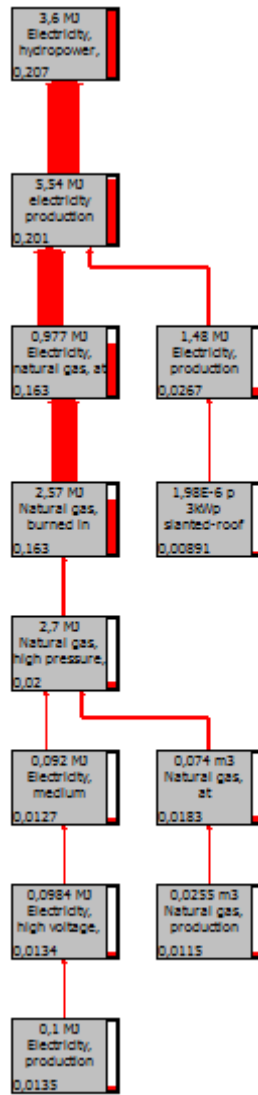


Διάγραμμα 17: Εκπομπές CO<sub>2</sub> για την αποθήκευση 1kWh από την ηλεκτροπαραγωγή του 2017(Βαθμός απόδοσης 65%).

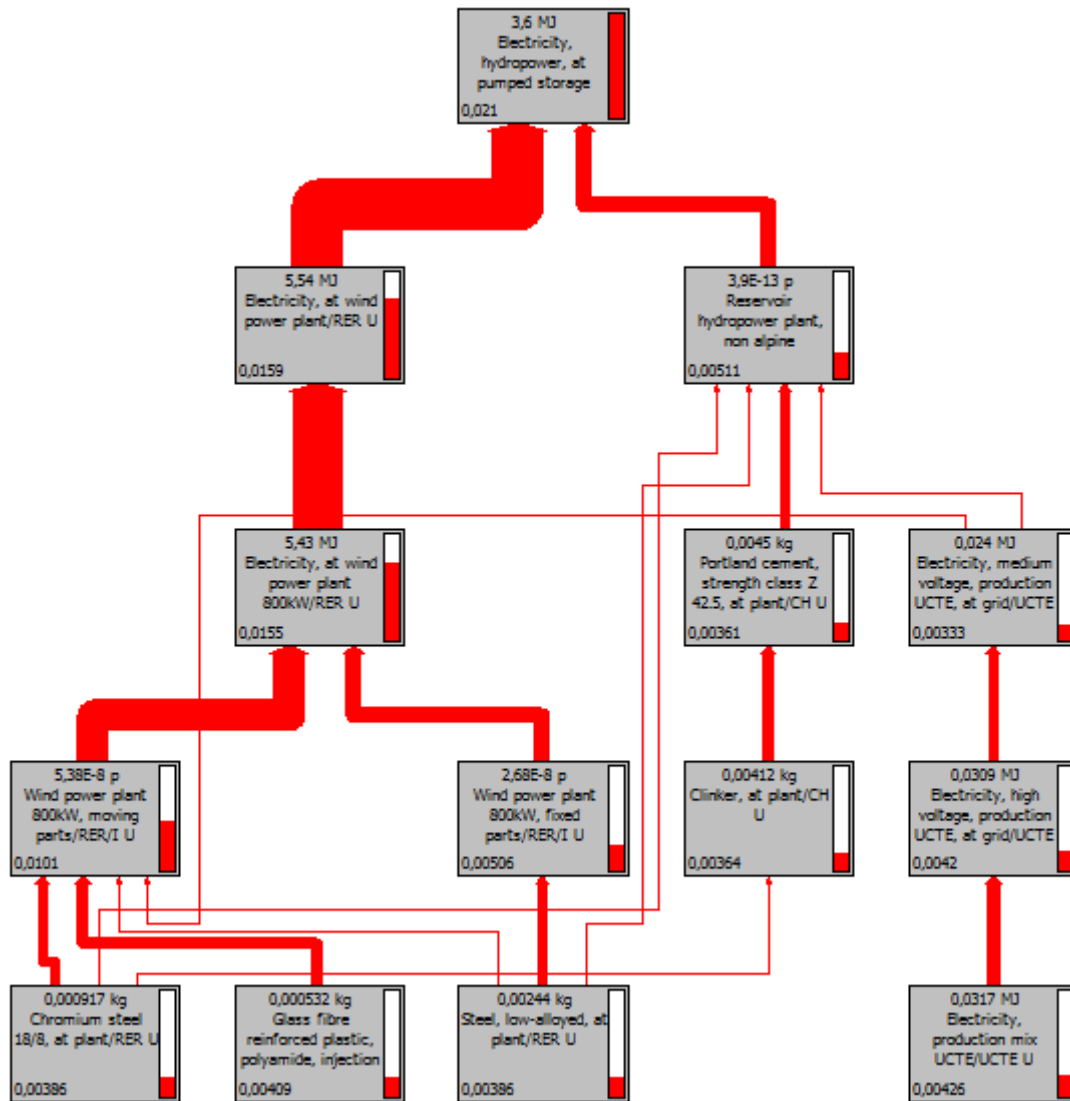


Διάγραμμα 18: Εκπομπές CO<sub>2</sub> για την αποθήκευση 1kWh από την ηλεκτροπαραγωγή του 2050 για το σενάριο ΥΦ(Βαθμός απόδοσης 65%).

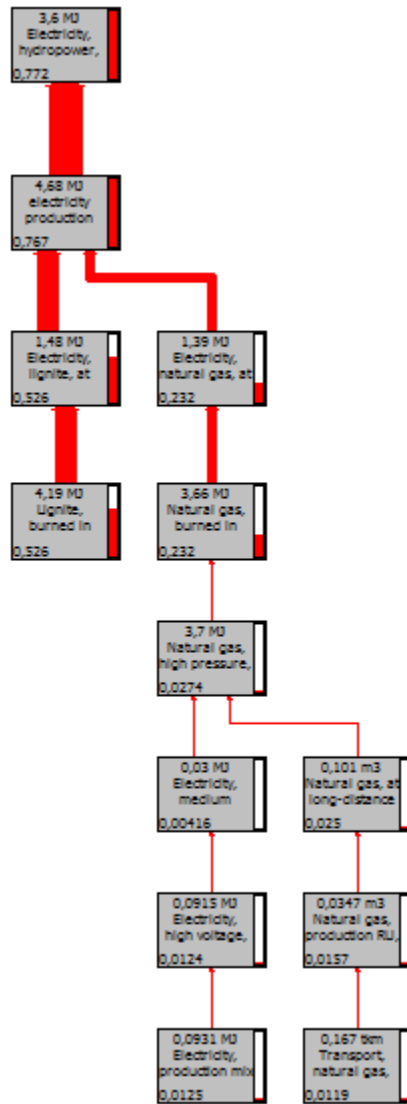




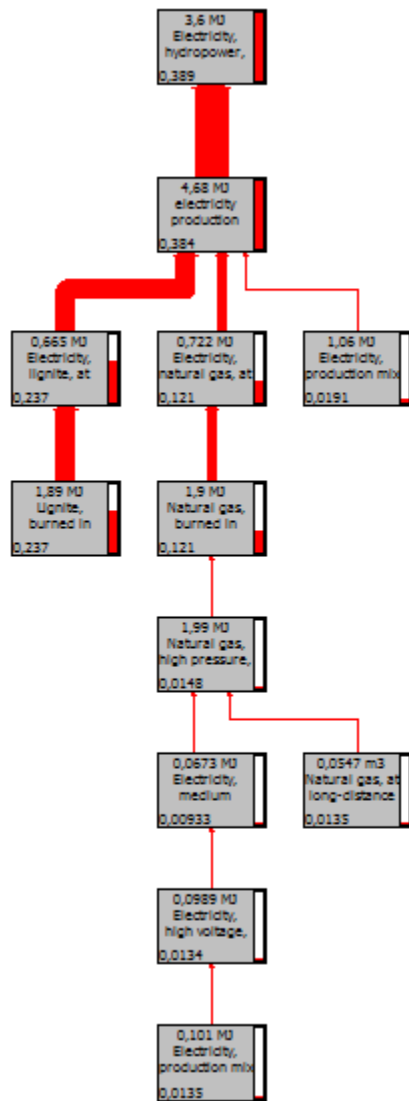
Διάγραμμα 19: Εκπομπές CO<sub>2</sub> για την αποθήκευση 1kWh από την ηλεκτροπαραγωγή του 2050 για το σενάριο ΠΕΚ 70% (Βαθμός απόδοσης 65%).



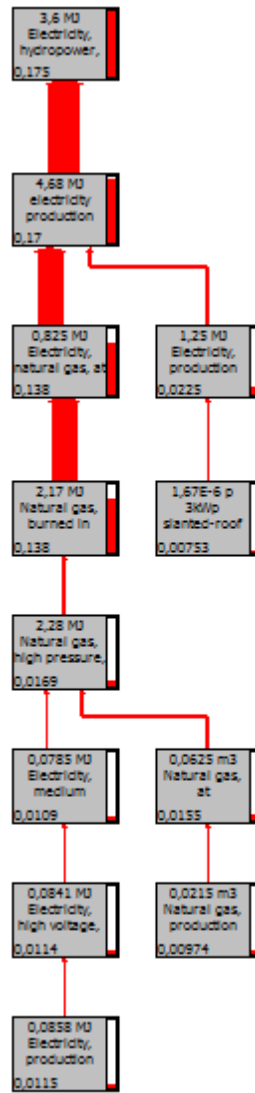
Διάγραμμα 20: Εκπομπές CO<sub>2</sub> για την αποθήκευση 1kWh από αιολική παραγωγή (Βαθμός απόδοσης 65%).



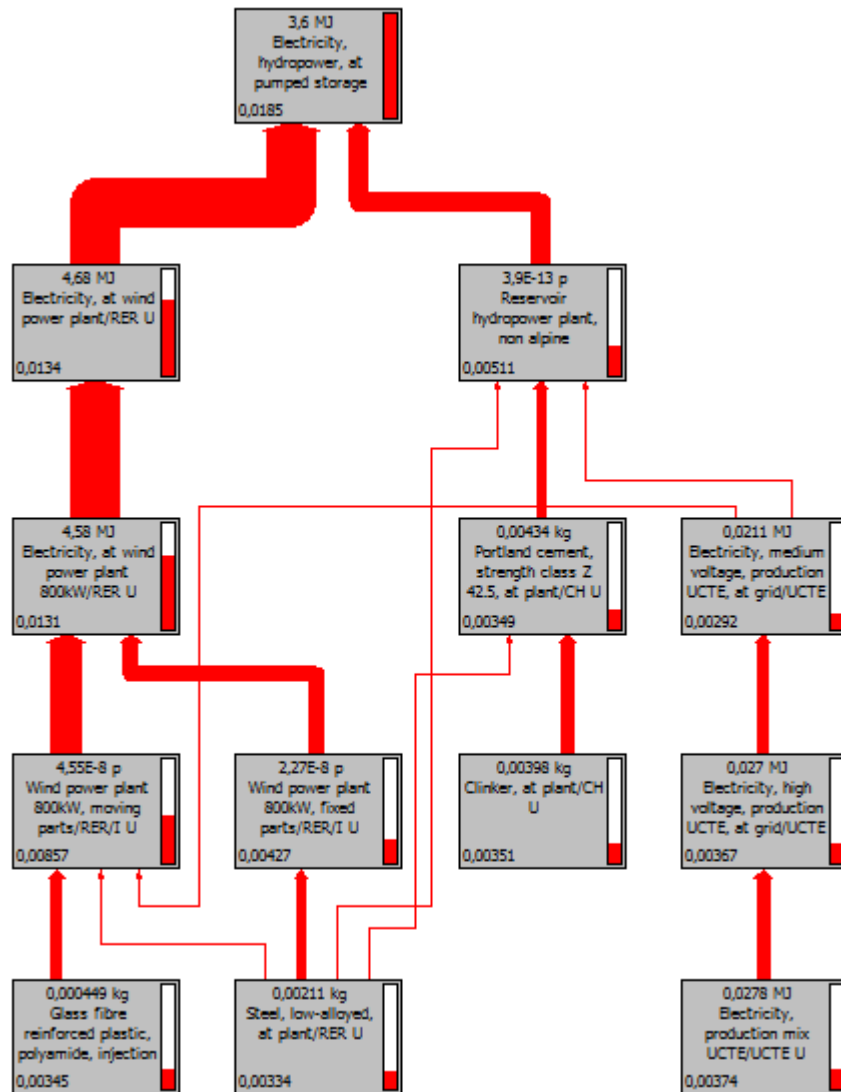
Διάγραμμα 21: Εκπομπές CO<sub>2</sub> για την αποθήκευση 1kWh από την ηλεκτροπαραγωγή του 2017(Βαθμός απόδοσης 77%).



Διάγραμμα 22: Εκπομπές CO<sub>2</sub> για την αποθήκευση 1kWh από την ηλεκτροπαραγωγή του 2050 για το σενάριο ΥΦ(Βαθμός απόδοσης 77%).



Διάγραμμα 23: Εκπομπές CO<sub>2</sub> για την αποθήκευση 1kWh από την ηλεκτροπαραγωγή του 2050 για το σενάριο ΠΕΚ 70% (Βαθμός απόδοσης 77%).



Διάγραμμα 24: Εκπομπές CO<sub>2</sub> για την αποθήκευση 1kWh από αιολική παραγωγή (Βαθμός απόδοσης 77%).