

HMCS

Heterogeneous Mixtures & Combustion Systems



National  
Technical  
University of  
Athens

**ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΚΥΚΛΟΥ ΖΩΗΣ  
ΣΤΗΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΥΠΟΚΑΤΑΣΤΑΤΟΥ  
ΦΥΣΙΚΟΥ ΑΕΡΙΟΥ ΣΤΗΝ ΗΠΕΙΡΩΤΙΚΗ  
ΕΛΛΑΔΑ**

**Διπλωματική εργασία**

**Επιβλέπουσα καθηγήτρια  
Φούντη Μαρία, Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.**

**Γκάτσος Νικόλαος  
Οκτώβριος 2015, ΑΘΗΝΑ**

## Ευχαριστίες

Η παρούσα εργασία είναι αποτέλεσμα εκτενούς δουλειάς που έγινε το ακαδημαϊκό έτος 2014-2015 στο εργαστήριο Ετερογενών Μειγμάτων και Συστημάτων Καύσης της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών του Ε.Μ.Π. και έχει αντικείμενο την «Εφαρμογή Ανάλυσης Κύκλου Ζωής στην Παραγωγή Υποκατάστατου Φυσικού Αερίου στην ηπειρωτική Ελλάδα». Επιβλέφθηκε από τη διευθύντρια του εργαστηρίου και Καθηγήτρια Μαρία Φούντη και συνεπιβλέφθηκε από το Διδάκτορα και μέλος ΕΔΙΠ Δημήτρη Γιαννόπουλο.

Για την ευκαιρία εκπόνησης της διπλωματικής εργασίας θα ήθελα να ευχαριστήσω την κ. Μαρία Φούντη και για την άψογη συνεργασία το Δημήτρη Γιαννόπουλο, χωρίς την βοήθεια του οποίου δεν θα ήταν δυνατή η διεκπεραίωσή της. Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους όσους με στήριξαν στα φοιτητικά μου χρόνια και ιδιαίτερα την μητέρα μου Σύρμω και τον αδερφό μου Σπύρο για την αμέριστη και έμπρακτη συμπαράστασή τους.

*Στην μνήμη του πατέρα μου Ηλία*

## Πίνακας περιεχομένων

Περίληψη.....	4
Abstract .....	5

### Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή 6

1.1 Αγορά και μεταφορά Φυσικού Αερίου στην Ελλάδα .....	6
1.2 Εισαγωγή στην παραγωγή Υποκατάστατου Φυσικού Αερίου .....	10

### Κεφάλαιο 2: Συμβατικές αλυσίδες παραγωγής Φυσικού Αερίου 11

2.1 Χερσαία μεταφορά Φυσικού Αερίου μέσω μεγάλων αγωγών.....	11
2.1.1 Εξαγωγή Φυσικού Αερίου .....	11
2.1.2 Επεξεργασία Φυσικού Αερίου .....	18
2.1.3 Μεταφορά Φυσικού Αερίου .....	25
2.1.4 Αποθήκευση Φυσικού Αερίου .....	33
2.1.5 Διανομή Φυσικού Αερίου .....	39
2.2 Θαλάσσια μεταφορά Υγροποιημένου Φυσικού Αερίου-LNG με δεξαμενόπλοια.....	41
2.2.1 Παραγωγή υγροποιημένου φυσικού αερίου-LNG.....	42
2.2.2 Αποθήκευση υγροποιημένου φυσικού αερίου-LNG .....	45
2.2.3 Μεταφορά υγροποιημένου φυσικού αερίου-LNG .....	46
2.2.4 Επαναεριοποίηση υγροποιημένου φυσικού αερίου-LNG.....	47

### Κεφάλαιο 3. Παραγωγή Υποκατάστατου Φυσικού Αερίου (Substitute Natural Gas) 48

3.1 Περιγραφή της διαδικασίας.....	50
3.1.1 Μεθανοποίηση.....	51
3.1.2 Ηλεκτρόλυση .....	53
3.1.3 Δέσμευση και διαχωρισμός διοξειδίου του άνθρακα .....	68

### Κεφάλαιο 4. Περιβαλλοντική Ανάλυση Κύκλου Ζωής-AKZ 72

4.1 Η Μεθοδολογία της Ανάλυσης Κύκλου Ζωής-AKZ.....	74
4.1.1 Σκοπός και Πλαίσιο της Ανάλυσης Κύκλου Ζωής-AKZ .....	75

### Κεφάλαιο 5: Εφαρμογή Ανάλυσης Κύκλου Ζωής 78

5.1 Μεταφορά Φυσικού Αερίου με αγωγούς υψηλής πίεσης .....	80
5.1.1 Εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου κατά την μεταφορά φυσικού αερίου με αγωγούς υψηλής πίεσης.....	81
5.1.2 Κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας για την μεταφορά φυσικού αερίου με αγωγούς υψηλής πίεσης.....	83
5.2 Εθνικός ενεργειακός σχεδιασμός.....	85
5.2.1 Εξέλιξη της ηλεκτροπαραγωγής για την ηπειρωτική Ελλάδα.....	87
5.2.2 Εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου και καταναλώσεις πρωτογενούς ενέργειας σε κάθε	

σενάριο ηλεκτροπαραγωγής στην ηπειρωτική Ελλάδα .....	90
5.3 Δέσμευση, διαχωρισμός και συμπίεση CO <sub>2</sub> .....	94
5.3.1 Εφαρμογή σε βιομηχανική μονάδα .....	94
5.3.2 Εφαρμογή σε λιγνιτική μονάδα .....	98
5.3.3 Εφαρμογή σε μονάδα βιομάζας.....	101
5.4 Παραγωγή υποκατάστατου φυσικού αερίου-SNG .....	104
5.4.1 Παραγωγή SNG από βιομηχανική μονάδα .....	107
5.4.2 Παραγωγή SNG από λιγνιτική μονάδα.....	110
5.4.3 Παραγωγή SNG από μονάδα βιομάζας.....	112
5.5 Σύγκριση των εξεταζόμενων εφαρμογών .....	115
5.5.1 Σύγκριση αποτελεσμάτων για τον διαχωρισμό και την συμπίεση CO <sub>2</sub> .....	115
5.5.2 Σύγκριση των εξεταζόμενων εφαρμογών για την παραγωγή SNG .....	116

## **Κεφάλαιο 6: Συμπεράσματα    119**

Βιβλιογραφία.....	120
Παράρτημα.....	123

## Περίληψη

Η διπλωματική εργασία που ακολουθεί έχει στόχο την εφαρμογή Ανάλυσης Κύκλου Ζωής στην παραγωγή Υποκατάστατου Φυσικού Αερίου (Substitute Natural Gas – SNG) στην ηπειρωτική Ελλάδα. 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 ανανεώσιμης ενέργειας. Μια τέτοια τεχνολογία έχει ως αποτέλεσμα την 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.

Για να γίνει η εκτίμηση του ενεργειακού και περιβαλλοντικού αποτυπώματος μιας τέτοιας επένδυσης σε μονάδα παραγωγής Υποκατάστατου Φυσικού Αερίου όπως προostάζει η Ανάλυση Κύκλου Ζωής, έγινε προσομοίωση τέτοιων μονάδων με τη χρήση του λογισμικού Simapro 7,0. Προσομοιώνονται συστήματα για διάφορα σενάρια παραγωγής φυσικού καυσίμου με την κύρια διαφορά να έγκειται, στην παραγωγή του με ποσότητες διοξειδίου του άνθρακα προερχόμενες κάθε φορά από διαφορετικές πηγές-μονάδες. Κατά την μελέτη της εργασίας παρουσιάζονται και οι διαφορές σε ενεργειακές απαιτήσεις και εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου του παραγόμενου υποκατάστατου φυσικού αερίου σε βάθος χρόνου και ανάλογα με τις εκτιμήσεις που λαμβάνονται για το ενεργειακό μίγμα της ηπειρωτικής Ελλάδας. Ακολουθεί παραμετρική ανάλυση όλων των αποτελεσμάτων και σύγκριση των μονάδων παραγωγής υποκατάστατου φυσικού αερίου καταλήγοντας σε εκείνη την εφαρμογή που έχει τον μικρότερο περιβαλλοντικό αντίκτυπο. Ενώ και μια άλλη σύγκριση που γίνεται είναι μεταξύ της υφιστάμενης πολιτικής μεταφοράς φυσικού αερίου, με τις εξεταζόμενες μονάδες παραγωγής υποκατάστατου φυσικού αερίου στην ηπειρωτική Ελλάδα.

Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται μια εισαγωγή και εξηγούνται έννοιες για την παραγωγή και την μεταφορά συμβατικού Φυσικού Αερίου από τον τόπο εξόρυξής του, παρουσιάζεται η τεχνολογία παραγωγής Υποκατάστατου Φυσικού Αερίου, ενώ αναφέρονται και κάποια απ' τα πλεονεκτήματά της. Στο δεύτερο κεφάλαιο γίνεται μια θεωρητική ανασκόπηση των συμβατικών αλυσίδων παραγωγής και μεταφοράς φυσικού αερίου από τις χώρες προέλευσής του στην ηπειρωτική Ελλάδα. Η διεργασία της παραγωγής υποκατάστατου φυσικού αερίου αναλύεται εκτενώς στο τρίτο κεφάλαιο. Παρουσιάζονται οι επιμέρους διεργασίες για την παραγωγή του όπως είναι η μεθανοποίηση, η ηλεκτρόλυση και η δέσμευση και ο διαχωρισμός εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα από τα καυσάερια. Στο τέταρτο κεφάλαιο διατυπώνεται η μεθοδολογία της Ανάλυσης Κύκλου Ζωής (ΑΚΖ) η οποία χρησιμοποιήθηκε για την εξαγωγή των αποτελεσμάτων κατά την εφαρμογή μας. Στο πέμπτο κεφάλαιο στοιχειοθετείται το σενάριο συμβατικής μεταφοράς Φυσικού Αερίου στην ηπειρωτική Ελλάδα με αγωγούς υψηλής πίεσης καθώς και εφαρμογές μονάδων παραγωγής Υποκατάστατου Φυσικού Αερίου, εφαρμόζεται σε αυτές η μεθοδολογία της ΑΚΖ. Ακολουθούν τα αποτελέσματα της παραμετρικής ανάλυσης και στη συνέχεια η σύγκρισή τους. Στο τελευταίο κεφάλαιο συνοψίζονται τα συμπεράσματα που αντλούνται από την πραγματοποιηθείσα προσομοίωση λειτουργίας και την παραμετρική ανάλυση. Στο παράρτημα υπάρχουν οι πίνακες που εξήχθησαν από το λογισμικό Simapro 7,0 και χρησιμοποιήθηκαν για τα διαγράμματα της εργασίας.

## Abstract

The present thesis implements the methodology of Life Cycle Analysis in the production of Substitute Natural Gas in mainland Greece. The production of substitute natural gas is an emerging technology that provides the ability to produce substitute fuel, creating the potential to transform the existing market of natural gas, which is used for heating, electricity production, transport, etc. Possible penetration of this technology promotes the energy and economic independence and provides the ability to store discarded renewable energy. This technology has the effect of reducing the imported quantities of Natural Gas due to its replacement by the domestically produced Substitute Natural Gas.

In order to assess the energy and environmental footprint Substitute Natural Gas plants implementing the Life Cycle Analysis methodology, with the use of the LCA software Simapro 7,0. Various scenarios were examined, considering different production quantities of carbon dioxide derived each time by different sources-units.

This thesis evaluates the differences in energy requirements and greenhouse gas emissions by the produced substitute natural gas over time and utilizes the estimates for the energy mix of mainland Greece. It follows a parametric analysis of all the results and comparison of substitute natural gas production units, resulting in that application which has the smallest environmental impact over time. Another comparison is made between the existing policy of natural gas transportation and the considered substitute natural gas production units in mainland Greece.

The first chapter includes an explanation of all concepts for the production and the conventional natural gas transportation from the place of mining, the introduced technology of substitute natural gas, and some advantages of this technology. The second section is a theoretical review of conventional production and transport of natural gas from the countries of origin to the mainland Greece. The process of producing substitute natural gas is analyzed in detail in the third section, containing the required individual processes for it's production such as methanation, electrolysis, and the separation of carbon dioxide from the emissions. The fourth chapter sets out the methodology of Life Cycle Analysis (LCA) which was used exporting results in our application. The fifth chapter contains a scenario of conventional transport of Natural Gas in mainland Greece with high pressure pipelines and applications of Substitute Natural Gas production units, there are given the results of this simulation LCA method. Here also are the results of the parametric analysis and the comparison between the applications. In the final chapter are provided the conclusions from this simulation method and the parametric analysis. In the Annex there are tables exported from the software Simapro 7,0 which have been used for the graphs in this thesis.

# Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή

## 1.1 Αγορά και μεταφορά Φυσικού Αερίου στην Ελλάδα

### Σχετικά με το Φυσικό Αέριο

#### Χημική σύσταση

Βασικό συστατικό του φυσικού αερίου είναι το μεθάνιο, συνυπάρχουν όμως σε αυτό και σημαντικές ποσότητες αιθάνιου, προπανίου και βουτανίου, καθώς και διοξείδιο του άνθρακα, άζωτο, ήλιο και θειικό οξύ σε μικρότερες ποσότητες.



### Τυπική σύσταση εισαγόμενου Φυσικού Αερίου στην Ελλάδα

Περιεκτικότητα (% κ.ο.) σε :

	<b>ΡΩΣΙΚΟ ΦΥΣΙΚΟ ΑΕΡΙΟ</b>	<b>ΑΛΓΕΡΙΝΟ ΦΥΣΙΚΟ ΑΕΡΙΟ</b>
Μεθάνιο (C1)	98	91,2
Αιθάνιο (C2)	0,6	6,5
Προπάνιο (C3)	0,2	1,1
Βουτάνιο (C4)	0,2	0,2
Πεντάνιο (C5 ) και βαρύτερα	0,1	-
Άζωτο (N2)	0,8	1,0
Διοξείδιο του άνθρακα (CO2)	0,1	-
Ανωτέρα Θερμογόνος Δύναμη	8,600 - 9,200 kcal/Nm <sup>3</sup>	9.640-10.650 kcal/Nm <sup>3</sup>

<b>Συστατικά</b>	<b>% κατά όγκο σύσταση</b>
Μεθάνιο (CH <sub>4</sub> )	70-90
Αιθάνιο (C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> )	5-15
Προπάνιο (C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> ) και Βουτάνιο (C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> )	<5
CO <sub>2</sub> , N <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> S, κτλ.	

Το φυσικό αέριο που είναι απαλλαγμένο από τους υδρογονάνθρακες πέραν του μεθανίου, δηλαδή το καθαρό μεθάνιο, συχνά αποκαλείται και ξηρό φυσικό αέριο. Αντίστοιχα, το φυσικό αέριο που συμπεριλαμβάνει και άλλους υδρογονάνθρακες εκτός από το μεθάνιο, αποκαλείται και υγρό φυσικό αέριο. (Πηγή:<http://www.promitheas.org.gr/default.asp?pid=415&langid=18&>)<sup>[29]</sup>

### **Οικογένειες αερίων καυσίμων**

Το φυσικό αέριο είναι μείγμα υδρογονανθράκων σε αέρια κατάσταση. Αποτελείται κυρίως από μεθάνιο (CH<sub>4</sub>) και ανήκει στη 2η Οικογένεια των αερίων καυσίμων.

Στην 1η Οικογένεια ανήκουν τα βιομηχανικά αέρια (ιδιαίτερα τοξικά), που παρασκευάζονται με πυρόλυση ή απόσταξη προϊόντων άνθρακα και με αποικοδόμηση και σχάση προϊόντων πετρελαίου ή φυσικών αερίων.

Στην 3η Οικογένεια ανήκουν το υγραέριο (LPG), που παράγεται από την κλασματική απόσταξη του πετρελαίου, ενώ βρίσκεται και σε ορισμένα κοιτάσματα φυσικού αερίου, από το οποίο διαχωρίζεται.

Μια 4η Οικογένεια τείνουν να αποτελέσουν τα μείγματα υγραερίων με αέρα. Το φυσικό αέριο αποτελεί το κατεξοχήν φυσικό προϊόν από τα αέρια καύσιμα.

Για τα φυσικά αέρια έχει οριστεί μια κατάσταση αναφοράς που καλείται “κανονική” κατάσταση και σε αυτή ανάγονται οι ποσότητές τους. Αυτή είναι οι 273,15K (0 °C) για τη θερμοκρασία και 1,01325 bar για την πίεση. Ο όγκος ενός κυβικού μέτρου αερίου σε κανονική κατάσταση αποτελεί ένα “κανονικό κυβικό μέτρο” αερίου (1Nm<sup>3</sup>).

Το φυσικό αέριο είναι ελαφρύτερο από τον αέρα με σχετική πυκνότητα 0,55. Σε περίπτωση διαρροής, διαφεύγει προς την ατμόσφαιρα σε αντίθεση προς το υγραέριο (LPG) που είναι βαρύτερο από τον αέρα με σχετική πυκνότητα 1,8.

Η Ανώτερη Θερμογόνος Δύναμη (ΑΘΔ) του φυσικού αερίου κυμαίνεται από 9.000 – 11.000 Kcal/Nm<sup>3</sup> στην εργασία χρησιμοποιήθηκε και η μετατροπή της σε 39 MJ/m<sup>3</sup>. Ενώ η ΑΘΔ του υγραερίου είναι σημαντικά υψηλότερη, από 23.000 – 30.000 Kcal/Nm<sup>3</sup>.

Τα όρια ανάφλεξης του φυσικού αερίου είναι 4,5% - 15%. Δηλαδή, η καύση δεν μπορεί να συντηρηθεί εάν η περιεκτικότητα του αέρα σε φυσικό αέριο είναι εκτός αυτών των ορίων. Για το υγραέριο τα αντίστοιχα όρια ανάφλεξης είναι 2% - 9,3%.<sup>[29]</sup>

### **Ιδιότητες**

Το φυσικό αέριο είναι άχρωμο και άοσμο. Η χαρακτηριστική του οσμή δίνεται τεχνικά ώστε να γίνεται αντιληπτό σε τυχόν διαρροές. Ανήκει στη δεύτερη οικογένεια των αερίων καυσίμων. Είναι ελαφρύτερο από τον αέρα: έχει ειδικό βάρος ίσο με 0,59. Η καύση του φυσικού αερίου, σε σχέση με αυτή άλλων καυσίμων όπως ο γαιάνθρακας ή το λάδι, έχει λιγότερο επιβλαβείς συνέπειες για το περιβάλλον. Παράγει, για παράδειγμα, μικρότερες ποσότητες διοξειδίου του άνθρακα για κάθε μονάδα παραγόμενης ενέργειας.<sup>[29]</sup>



## **Ιστορικά**

Η άσφαλτος και τα βιτουμένια, τα πιο παλιά γνωστά προϊόντα του πετρελαίου, όπως και ενδείξεις για διαρροές φυσικού αερίου πρωτοβρέθηκαν μεταξύ 6000 και 2000 π.Χ. στην περιοχή που σήμερα βρίσκεται το Ιράν. Η χρήση του φυσικού αερίου αναφέρεται στην Κίνα το 900 π.Χ. περίπου, όπου ανοίχθηκαν γύρω στα 900-1100 φρέατα και το αέριο μεταφερόταν με αγωγούς από μπαμπού. Στην Ευρώπη αυτές οι επιτεύξεις ήταν άγνωστες και το φυσικό αέριο δεν ανακαλύφθηκε παρά το 1659 μ.Χ. στην Αγγλία. Το αέριο από απόσταξη ανθράκων ανακαλύφθηκε το 1670 και άρχισε να χρησιμοποιείται το 1790, γιατί ήταν πιο εύκολη η μεταφορά, η αποθήκευση και η χρησιμοποίησή του στις μηχανές εσωτερικής καύσεως και στον φωτισμό δρόμων και σπιτιών. Το 1821 η πόλη Φριντόνια (Fredonia) στην περιφέρεια της Νέας Υόρκης φωτιζόταν με φυσικό αέριο. Αλλά η χρησιμοποίηση του φυσικού αερίου εξακολουθούσε να είναι περιορισμένη, γιατί δεν υπήρχε τρόπος μεταφοράς του σε μεγάλες αποστάσεις και επί έναν αιώνα το φυσικό αέριο παρέμεινε στο περιθώριο της βιομηχανικής εξέλιξης, που βασίστηκε στον άνθρακα, το πετρέλαιο και τον ηλεκτρισμό. Η μέθοδος μεταφοράς φυσικού αερίου με αγωγούς αναπτύχθηκε στη δεκαετία του 1920 και αποτέλεσε ένα σημαντικό στάδιο στη χρήση του αερίου. Μετά τον Β' Παγκόσμιο Πόλεμο ακολούθησε μια περίοδος τεράστιας κατανάλωσης, που συνεχίζεται μέχρι σήμερα. Το 1960 η παγκόσμια παραγωγή φυσικού αερίου ήταν 470 δισεκατομμύρια κυβικά μέτρα και το 1979 ήταν 1,459 τρισεκατομμύρια κυβικά μέτρα. Το 1950 το φυσικό αέριο αποτελούσε το 12% της καταναλισκόμενης παγκοσμίως ενέργειας, ένα ποσοστό που αυξήθηκε σε 14,6% το 1960 και σε 25% το 1980. Σύμφωνα με τις εκτιμήσεις του Διεθνούς Οργανισμού Ενέργειας (ΔΟΕ) η κατανάλωση φυσικού αερίου θα υπερβεί την κατανάλωση άνθρακα το 2010 και το φυσικό αέριο θα καλύπτει το 1/4 των παγκόσμιων ενεργειακών αναγκών το 2030. <sup>[29]</sup>

## **Εξαγωγή και μεταφορά**

Το φυσικό αέριο είναι καύσιμο και πρώτη ύλη της χημικής βιομηχανίας. Εξάγεται από υπόγειες κοιλάτες στις οποίες βρίσκεται υπό υψηλή πίεση. Σε αυτές τις κοιλάτες το φυσικό αέριο σχηματίστηκε με τρόπο παρόμοιο με τον τρόπο σχηματισμού του πετρελαίου. Μεταφέρεται προς τους τόπους όπου πρόκειται να χρησιμοποιηθεί όπως είναι, χωρίς την ανάγκη περαιτέρω επεξεργασίας. Τα κοιτάσματα φυσικού αερίου βρίσκονται συνήθως μακριά από τα κύρια κέντρα καταναλώσεως· συνεπώς πρέπει να μεταφερθεί, αν και οι βιομηχανίες χημικής επεξεργασίας είναι συχνά εγκατεστημένες στην περιοχή της παραγωγής. Η μεταφορά του φυσικού αερίου εξαρτάται από την κατάστασή του. Σε αέρια κατάσταση μεταφέρεται με αγωγούς υπό υψηλή πίεση, ενώ σε υγρή κατάσταση μεταφέρεται με πλοία. Οι μεγάλοι αγωγοί υψηλής πίεσης καθιστούν δυνατή τη μεταφορά του αερίου σε απόσταση χιλιάδων χιλιομέτρων. Παραδείγματα τέτοιων αγωγών είναι οι αγωγοί της Βόρειας Αμερικής, που εκτείνονται από το Τέξας και τη Λουϊζιάνα μέχρι τη βορειοανατολική ακτή και από την Αλμπέρτα ως τον Ατλαντικό. Αγωγοί επίσης εκτείνονται από τη Σιβηρία μέχρι την Κεντρική και Δυτική Ευρώπη. Οι έρευνες για πετρέλαιο έχουν αποκαλύψει την ύπαρξη μεγάλων κοιτασμάτων αερίου στην Αφρική, Μέση Ανατολή, Αλάσκα και αλλού. Η μεταφορά από τέτοιες περιοχές γίνεται με πλοία. Το αέριο υγροποιείται στους -160 βαθμούς Κελσίου και μεταφέρεται, όπως το πετρέλαιο, με δεξαμενόπλοια ειδικά κατασκευασμένα για τον σκοπό αυτό.

Ένα κυβικό μέτρο υγρού φυσικού αερίου αντιστοιχεί σε 600 κυβικά μέτρα αερίου σε ατμοσφαιρική πίεση. Το ειδικό βάρος του υγρού αερίου είναι σχετικά χαμηλό (περίπου 0,55). Η Ελλάδα προμηθεύεται φυσικό αέριο από την Ρωσική εταιρία Gazprom-export η εισαγωγή του ρωσικού φυσικού αερίου στην Ελλάδα άρχισε τον Φεβρουάριο του 2000, και την Αλγερία, το Αλγερινό αέριο μεταφέρεται υγροποιημένο με ειδικό δεξαμενόπλοιο στις εγκαταστάσεις της νήσου Ρεβουθούσας, στον κόλπο των Μεγάρων. Η εισαγωγή του Αλγερινού φυσικού αερίου άρχισε τον Φεβρουάριο του 2000. <sup>[29]</sup>

### **Χρήσεις**

- Αποτελεί βασική πηγή παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.
  - Χρησιμοποιείται στην παραγωγή υδρογόνου.
  - Ως καύσιμο οχημάτων (οικολογικά οχήματα). Το 2005, οι χώρες με τον μεγαλύτερο αριθμό οικολογικών οχημάτων ήταν η Αργεντινή, η Βραζιλία, το Πακιστάν, η Ιταλία, το Ιράν και οι Η.Π.Α..
  - Οικιακή χρήση (μαγειρική, θέρμανση κ.α.)
- Άλλες χρήσεις (παραγωγή γυαλιού, υφασμάτων, ατσαλιού, πλαστικών, ειδών χρωματισμού και άλλων προϊόντων) <sup>[29]</sup>

### **Το φυσικό αέριο στον βιομηχανικό τομέα**

Τα χαρακτηριστικά του φυσικού αερίου που ευνοούν τη χρήση του στον βιομηχανικό τομέα είναι κυρίως τα εξής:

- Είναι εφικτή η συνεχής παροχή καυσίμου. Κάτι τέτοιο εξασφαλίζει απρόσκοπτη λειτουργία και αποδεσμεύει κεφάλαια που σε άλλες περιπτώσεις απαιτούνται για τη διατήρηση αποθεμάτων και αποθηκευτικών χώρων
- Έχει μειωμένες, σε σχέση με άλλα καύσιμα, εκπομπές ρύπων. Έτσι η χρήση του συμβάλλει στο καθαρότερο περιβάλλον και στην καταπολέμηση του φαινομένου του θερμοκηπίου
- Έχει μειωμένο λειτουργικό κόστος διαχείρισης καυσίμου και συντήρησης
- Αυξημένη ενεργειακή απόδοση και οικονομία
- Βελτίωση της ποιότητας των προϊόντων
- Ευχέρεια χειρισμού και ελέγχου
- Αποκέντρωση θερμικών χρήσεων <sup>[29]</sup>

## 1.2 Εισαγωγή στην παραγωγή Υποκατάστατου Φυσικού Αερίου

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 καθώς και της παρούσας πολιτικής αγοράς και μεταφοράς Φυσικού Αερίου με αγωγούς υψηλής πίεσης στην ηπειρωτική Ελλάδα.

## Κεφάλαιο 2: Συμβατικές αλυσίδες παραγωγής Φυσικού Αερίου

### 2.1 Χερσαία μεταφορά Φυσικού Αερίου μέσω μεγάλων αγωγών

#### 2.1.1 Εξαγωγή Φυσικού Αερίου

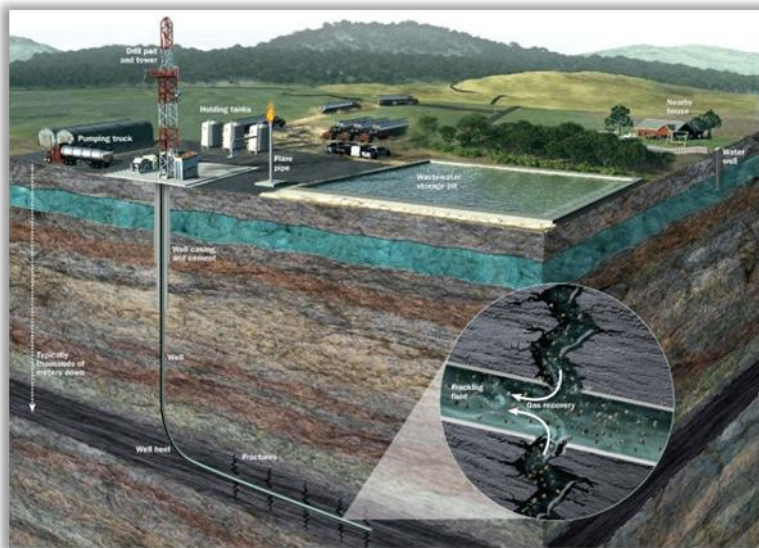
Οι εξελίξεις στην τεχνολογία έχουν συμβάλει τα μέγιστα στην αύξηση του ποσοστού απόδοσης και του ρυθμού επιτυχίας για την διάνοιξη πηγαδιών φυσικού αερίου. Εφόσον η ομάδα των γεωφυσικών προσδιορίσει την ακριβή θέση για ένα πηγάδι, είναι αναγκαίο για την εταιρεία γεώτρησης να εξασφαλίσει ότι καλύπτει όλα τα απαραίτητα μέτρα έτσι ώστε να μπορούν να τρυπήσουν νόμιμα στην εν λόγω περιοχή. Αυτό συνήθως περιλαμβάνει την εξασφάλιση των αδειών για τις εργασίες γεώτρησης, την εγκατάσταση ενός νομικού μηχανισμού για να επιτραπεί στην εταιρεία φυσικού αερίου να εξάγει και να πουλά τους πόρους που προβλέπονται σε μια δεδομένη περιοχή και ένα σχέδιο για την συγκέντρωση γραμμών που θα συνδέουν το πηγάδι με τον αγωγό. (Πηγή: [www.education.nationalgeographic.com/encyclopedia/natural\\_gas](http://www.education.nationalgeographic.com/encyclopedia/natural_gas))<sup>[2]</sup>

#### Χερσαία Γεώτρηση (On Shore Drilling)

##### Οριζόντια Γεώτρηση.

Αν και στην επιφάνεια μοιάζει με κατακόρυφο πηγάδι κάτω από την επιφάνεια, το πηγάδι παίρνει κλίση τέτοια ώστε να παραλληλοποιείται με τους σχηματισμούς του φυσικού αερίου. Η οριζόντια γεώτρηση επιτρέπει στο πηγάδι να επεκτείνεται υπογείως και να τρυπά σε πολλές διαφορετικές πηγές φυσικού αερίου. Ακόμη επιτρέπει στο πηγάδι να έρχεται σε επαφή με ευρύτερες περιοχές παραγωγικών σχηματισμών.

Ως αποτέλεσμα της προέλασης της οριζόντιας γεώτρησης, οι πηγές φυσικού αερίου σε κοιλάτητες με σχιστόλιθο είναι πιο εύκολα προσβάσιμες σε περισσότερο διαφοροποιημένες πηγές.



Σχήμα 2-01: Χερσαία γεώτρηση (On Shore drilling)  
(Πηγή: [www.greenplug.nu/hydraulic-fracturing-what-is-hydraulic-fracturing/](http://www.greenplug.nu/hydraulic-fracturing-what-is-hydraulic-fracturing/))<sup>[6]</sup>

Σε συνδυασμό με άλλες τεχνολογίες, όπως η σεισμική απεικόνιση η οριζόντια γεώτρηση συμβάλλει στην μείωση του οριακού κόστους λειτουργίας και κεφαλαίου, και κατά συνέπεια επιτρέπει στους παραγωγούς εξαγωγή φυσικού αερίου με πιο οικονομικούς πόρους. (Πηγή: [www.naturalgas.org](http://www.naturalgas.org))<sup>[3]</sup>

Η οριζόντια γεώτρηση επίσης επιτρέπει την ανάπτυξη φυσικών πόρων με ελάχιστες υπέρβιες διαταραχές, μειώνοντας το περιβαλλοντικό αποτύπωμα των επιχειρήσεων εξόρυξης και το κόστος και την πιθανή όχληση των υπαρχόντων δρόμων ή άλλων υποδομών. Η οριζόντια γεώτρηση χρησιμοποιεί μια τεχνική γνωστή ως υδραυλική ρωγμάτωση με σκοπό την εξαγωγή φυσικού αερίου από γεωλογικούς σχηματισμούς.<sup>[3]</sup>

Η υδραυλική ρωγμάτωση δημιουργεί κατάγματα στα πετρώματα, τα οποία διεγείρουν την ροή του φυσικού αερίου, αυξάνοντας τις ποσότητες που μπορούν να ανακτηθούν. Τα κατάγματα δημιουργούνται από την άντληση μεγάλων ποσοτήτων ρευστών σε υψηλή πίεση κάτω από το φρεάτιο γεώτρησης και εντός του σχηματισμού πετρώματος που είναι ο στόχος μας. Το υγρό της υδραυλικής ρωγμάτωσης συνήθως αποτελείται από νερό, λάσπη και χημικά πρόσθετα που ανοίγουν και μεγεθύνουν τα κατάγματα στο πλαίσιο του πετρώματος. Αυτά τα κατάγματα μπορούν να επεκταθούν αρκετές εκατοντάδες πόδια μακριά από το φρεάτιο γεώτρησης. Η λάσπη, τα κεραμικά σφαιρίδια ή άλλα μικρά ασυμπίεστα σωματίδια κρατούν ανοικτά τα νεοσύστατα κατάγματα. (Πηγή: [www2.epa.gov/hydraulicfracturing/process-hydraulic-fracturing](http://www2.epa.gov/hydraulicfracturing/process-hydraulic-fracturing))<sup>[4]</sup>

Μόλις η διαδικασία έγχυσης ολοκληρωθεί, η εσωτερική πίεση του πετρώματος προκαλεί το υγρό να επιστρέψει στην επιφάνεια διαμέσου του φρεατίου γεώτρησης. Αυτό το υγρό είναι γνωστό ως "flowback" και μπορεί να περιέχει τα εγχυμένα χημικά και φυσικά υλικά όπως μέταλλα, ραδιονουκλίδια και υδρογονάνθρακες. Το "flowback" και το παραγόμενο νερό συνήθως αποθηκεύονται επί τόπου σε δεξαμενές πριν από την επεξεργασία, διάθεση ή ανακύκλωση.

(Πηγή: [www.netl.doe.gov/research/oil\\_and\\_gas](http://www.netl.doe.gov/research/oil_and_gas))<sup>[5]</sup>

## **Υπεράκτια γεώτρηση (Off Shore Drilling)**

Οι υπεράκτιες γεωτρήσεις για φυσικό αέριο, σε ορισμένες περιπτώσεις, εκατοντάδες χιλιόμετρα μακριά από την στεριά, θέτουν μια σειρά από διαφορετικές προκλήσεις απ' ότι οι γεωτρήσεις στην ξηρά. Ο πραγματικός μηχανισμός γεωτρήσεων που θα χρησιμοποιούνται για να τρυπήσουν τον πυθμένα της θάλασσας είναι σχεδόν ο ίδιος με μια χερσαία εξέδρα. Ωστόσο, μια υπεράκτια γεώτρηση στο βυθό της θάλασσας μπορεί μερικές φορές να είναι χιλιάδες μέτρα κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας. Ως εκ τούτου, ενώ στις χερσαίες γεωτρήσεις το έδαφος αποτελεί μια πλατφόρμα από την οποία γίνεται η διάτρηση, στη θάλασσα πρέπει να σχεδιαστεί μια τεχνητή πλατφόρμα γεωτρήσεων. Αυτή η τεχνητή πλατφόρμα μπορεί να λάβει πολλές μορφές, ανάλογα με τα χαρακτηριστικά της γεώτρησης, συμπεριλαμβανομένου πόσο μακριά (σε βάθος) είναι ο στόχος της γεώτρησης.

(Πηγή: [dspace.lib.uom.gr/bitstream/2159/15651/6/GrompanopoulosStratisMsc2013.pdf](http://dspace.lib.uom.gr/bitstream/2159/15651/6/GrompanopoulosStratisMsc2013.pdf))<sup>[1]</sup>

### **Κινητές Υπεράκτιες Εξέδρες Διάτρησης**

Υπάρχουν δυο βασικοί τύποι των υπεράκτιων γεωτρύπανων: αυτές που μπορούν να μετακινούνται από τόπο σε τόπο, επιτρέποντας γεωτρήσεις σε πολλές περιοχές και οι εξέδρες που είναι μονίμως τοποθετημένες. Οι κινητές εξέδρες συχνά χρησιμοποιούνται για σκοπούς διερεύνησης, επειδή είναι πολύ φθηνότερες απ' ότι η χρήση μόνιμων βάσεων. Μόλις βρεθούν μεγάλα κοιτάσματα υδρογονανθράκων, θα κατασκευαστεί μια μόνιμη πλατφόρμα για να επιτρέψει την εξαγωγή τους. <sup>[1]</sup>

### **Φορηγίδες Διάτρησης (Drilling Barges).**

Οι φορηγίδες διάτρησης χρησιμοποιούνται ως επί το πλείστον για τις εσωτερικές αβαθείς γεωτρήσεις. Αυτό συμβαίνει συνήθως σε λίμνες, βάλτους, ποτάμια και διώρυγες. Οι φορηγίδες γεώτρησης είναι μεγάλες, πλωτές εξέδρες, οι οποίες πρέπει να ρυμουλκούνται με ρυμουλκό από τοποθεσία σε τοποθεσία. Κατάλληλες για ρηχά, στάσιμα νερά, ενώ δεν είναι κατάλληλες για συνθήκες κίνησης νερού και για ανοικτές θάλασσες. <sup>[1]</sup>

### **Εξέδρες Ανυψούμενου Γεωτρύπανου (Jack-Up Rigs).**

Τα αυτο-ανυψούμενα γεωτρύπανα είναι παρόμοια με τις φορηγίδες διάτρησης, με μια διαφορά. Μόλις ένα ανυψούμενο γεωτρύπανο σύρεται στο χώρο τρεις ή τέσσερις "πυλώνες" αφήνονται έως ότου ακουμπήσουν στο βυθό της θάλασσας. Αυτό επιτρέπει στην πλατφόρμα εργασίας να ξεκουραστεί πάνω στην επιφάνεια του νερού, σε αντίθεση με μια πλωτή φορηγίδα. Ωστόσο τα ανυψούμενα γεωτρύπανα είναι κατάλληλα για πιο ρηχά νερά, καθώς η επέκταση αυτών των πυλώνων πολύ βαθιά θα ήταν ανέφικτη. Αυτές οι εξέδρες είναι τυπικώς ασφαλέστερες στην λειτουργία τους από τις φορηγίδες, καθώς η εξέδρα εργασίας είναι πιο πάνω από την στάθμη του νερού. <sup>[1]</sup>

### **Υποβρύχιες Εξέδρες (Submersible Rigs).**

Οι υποβρύχιες εξέδρες, επίσης κατάλληλες για ρηχά νερά, είναι σαν εξέδρες ανυψούμενων γεωτρύπανων, δεδομένου ότι έρχονται σε επαφή με την θάλασσα ή τον πυθμένα της λίμνης. Αυτές αποτελούνται από εξέδρες πλατφόρμες με δυο κύτη τοποθετημένα το ένα πάνω στο άλλο. Το ανώτερο κύτος περιέχει τους χώρους διαμονής του πληρώματος, καθώς και την πλατφόρμα γεώτρησης. Το κατώτερο τμήμα του κύτους λειτουργεί σαν εξωτερικό κύτος σε ένα υποβρύχιο. Όταν η πλατφόρμα κινείται από το ένα μέρος στο άλλο, το κατώτερο τμήμα του κύτους είναι γεμάτο με αέρα-ώστε να καταστήσει ολόκληρη την εξέδρα πλεύσιμη. Όταν η εξέδρα είναι τοποθετημένη πάνω από τον χώρο της διάτρησης, ο αέρας αφήνεται από το κατώτερο τμήμα του κύτους και η εξέδρα βυθίζεται στο βυθό της θάλασσας ή της λίμνης. Αυτό το είδος της εξέδρας έχει το πλεονέκτημα της κινητικότητας στο νερό, όμως και πάλι η χρήση της περιορίζεται σε ρηχές περιοχές ύδατος. <sup>[1]</sup>

### **Ημι-υποβρύχιες Εξέδρες (Semi-submersible Rigs).**

Οι ημι-υποβρύχιες εξέδρες είναι ο πιο κοινός τύπος υπεράκτιων γεωτρήσεων, που συνδυάζει τα πλεονεκτήματα των υποβρύχιων εξεδρών με την ικανότητα να τρυπούν σε βαθιά νερά. Μια διάταξη ημι-υποβρύχιας εξέδρας λειτουργεί με την ίδια αρχή της υποβρύχιας εξέδρας: από το "φούσκωμα" και το "ξεφούσκωμα" του κάτω κύτους. Η κύρια διαφορά με μια ημι-υποβρύχια εξέδρα, είναι ότι όταν αφήνεται ο αέρας του κατώτερου τμήματος του κύτους, η εξέδρα δεν βυθίζεται στον βυθό της θάλασσας.

Αντ' αυτού, η εξέδρα είναι μερικώς βυθισμένη, αλλά εξακολουθεί να επιπλέει πάνω από το σημείο διάτρησης. Κατά το τρύπημα, το χαμηλότερο σκάφος που είναι γεμάτο με νερό, παρέχει σταθερότητα στην εξέδρα. Οι ημι-υποβρύχιες εξέδρες συγκρατούνται στην θέση τους από τις τεράστιες άγκυρες, που η καθεμιά ζυγίζει πάνω από 10 τόνους. Αυτές οι άγκυρες, σε συνδυασμό με το βυθισμένο τμήμα της εξέδρας, εξασφαλίζουν την σταθερότητα της πλατφόρμας και την ασφάλεια για να χρησιμοποιηθεί σε ταραχώδη υπεράκτια ύδατα.<sup>[1]</sup>



Σχήμα 2-02: Υπεράκτια γεώτρηση (Off Shore Drilling)  
(Πηγή: <http://snmevents.com/zhoushan-changhong-buys-6-semi-submersible-rigs-from-transocean/>)<sup>[16]</sup>

### **Πλωτά Γεωτρύπανα (Drilling Ships).**

Τα πλωτά γεωτρύπανα είναι ακριβώς όπως ακούγονται: πλοία που έχουν σχεδιασθεί για την εκτέλεση γεωτρήσεων. Αυτά τα πλοία είναι ειδικά σχεδιασμένα για να μεταφέρουν εξέδρες γεώτρησης σε τοποθεσίες μεγάλου βάθους. Ένα τυπικό πλωτό γεωτρύπανο θα είναι εξοπλισμένο, εκτός από όλο τον εξοπλισμό που συνήθως βρίσκεται σε ένα μεγάλο υπερωκεάνιο πλοίο, με μια πλατφόρμα γεώτρησης και έναν πύργο γεώτρησης που βρίσκεται στην μέση του καταστρώματος. Επιπλέον, τα πλωτά γεωτρύπανα περιέχουν μια οπή, που βρίσκεται δεξιά του πλοίου και φτάνει κάτω διαμέσου του κύτους, το οποίο επιτρέπει στο γεωτρύπανο να επεκταθεί μέσα από το σκάφος κάτω και εντός του νερού.<sup>[1]</sup>



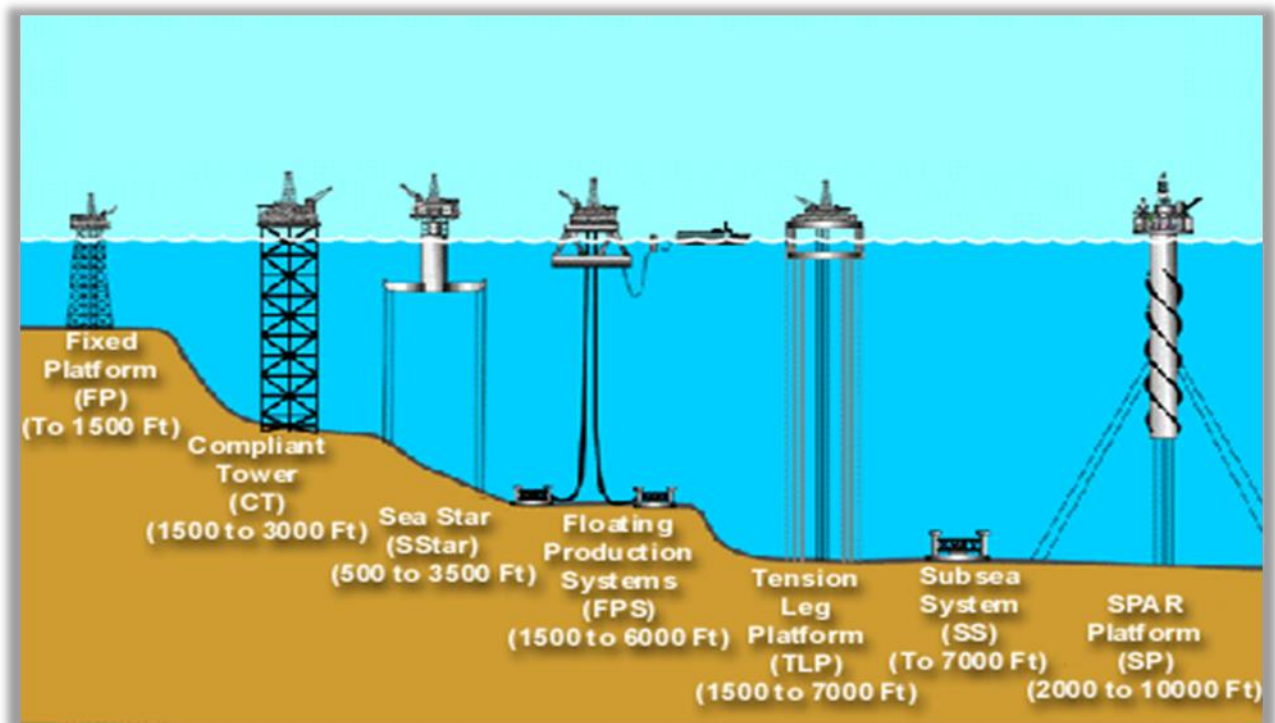
Σχήμα 2-03: Πλωτά Γεωτρύπανα (Drilling Ships)  
(Πηγή: [www.shetlandtimes.co.uk/2010/09/21/environmentalists-taraet-drilling-ship-in-protest-at-west-of-shetland-work](http://www.shetlandtimes.co.uk/2010/09/21/environmentalists-taraet-drilling-ship-in-protest-at-west-of-shetland-work))<sup>[7]</sup>

Τα πλωτά γεωτρύπανα χρησιμοποιούνται συχνά για την διάνοιξη σε πολύ βαθιά νερά, τα οποία μπορεί συχνά να είναι ταραχώδη. Τα πλωτά γεωτρύπανα χρησιμοποιούν αυτό που είναι γνωστό ως σύστημα "δυναμικής τοποθέτησης". Είναι εξοπλισμένα με ηλεκτρικούς κινητήρες στην κάτω πλευρά του κύτους του πλοίου, ικανούς για την πρόωση του πλοίου σε οποιαδήποτε κατεύθυνση. Αυτοί οι κινητήρες έχουν ενσωματωθεί στο σύστημα υπολογιστή του πλοίου, το οποίο χρησιμοποιεί σύστημα εντοπισμού μέσω δορυφόρου, σε συνδυασμό με τους αισθητήρες που βρίσκονται στον χώρο διάτρησης, ώστε να εξασφαλίζεται ότι το πλοίο είναι ακριβώς πάνω από τον χώρο ανά πάσα στιγμή.<sup>[1]</sup>

### **Υπεράκτιες Γεωτρήσεις και Πλατφόρμες**

Όπως αναφέρθηκε, οι κινητές εξέδρες χρησιμοποιούνται συνήθως για την διάνοιξη διερευνητικών γεωτρήσεων. Σε ορισμένες περιπτώσεις, όταν οι διερευνητικές γεωτρήσεις βρίσκουν εμπορικά κοιτάσματα φυσικού αερίου, είναι πιο οικονομικό να κατασκευαστεί μια μόνιμη πλατφόρμα από την οποία μπορεί να γίνει παραγωγή και εξόρυξη. Αυτές οι μεγάλες, μόνιμες πλατφόρμες είναι εξαιρετικά ακριβές και γενικά απαιτούν μεγάλα αναμενόμενα κοιτάσματα υδρογονανθράκων ώστε να είναι οικονομική η κατασκευή τους.<sup>[1]</sup>





Σχήμα 2-04: Υπεράκτιες Γεωτρήσεις και Πλατφόρμες <sup>[1]</sup>

Μερικές από τις μεγαλύτερες υπεράκτιες πλατφόρμες βρίσκονται στη Βόρεια Θάλασσα, όπου λόγω των δυσμενών καιρικών συνθηκών, οι δομές της εξέδρας είναι σε θέση να αντέξουν ισχυρούς ανέμους και μεγάλα κύματα. Μια τυπική μόνιμη πλατφόρμα στην Βόρεια Θάλασσα θα πρέπει να είναι σε θέση να αντέχει ταχύτητες ανέμου πάνω από 90 κόμβους και κύματα πάνω από 60 πόδια. Αντίστοιχα, οι πλατφόρμες αυτές είναι από τις μεγαλύτερες δομές που δημιουργήθηκαν από τον άνθρωπο. Υπάρχει ένας αριθμός από διαφορετικούς τύπους μόνιμων πλατφόρμων, χρήσιμοι για ένα συγκεκριμένο βάθος. Αυτή η απεικόνιση των υπεράκτιων γεωτρήσεων δίνει μια ιδέα του πόσο μεγάλες είναι αυτές οι υπεράκτιες εξέδρες. <sup>[1]</sup>

Η σταθερή πλατφόρμα είναι συνήθως όχι περισσότερο από 1700 πόδια, ενώ το ύψος λίγο κάτω από 730 πόδια. Λόγω του μεγέθους τους, οι μόνιμες υπεράκτιες εξέδρες άντλησης κατασκευάζονται στην ξηρά, σε κομμάτια. Καθώς ολοκληρωθούν τα κομμάτια της εξέδρας, αυτά μεταφέρονται στην θέση διάτρησης. <sup>[1]</sup>

### **Fixed Platforms.**

Στην σταθερή πλατφόρμα τα "πόδια" κατασκευάζονται από σκυρόδεμα ή χάλυβα, που εκτείνεται κάτω από την πλατφόρμα και είναι στερεωμένα στον βυθό. Υπάρχουν πολλά υποδείγματα γι' αυτές τις σταθερές, μόνιμες πλατφόρμες. Τα κύρια πλεονεκτήματα αυτών των τύπων είναι η σταθερότητά τους, καθώς είναι στερεωμένα στον βυθό της θάλασσας και υπάρχει περιορισμένη έκθεση σε κίνηση λόγω των ανέμων και των υδάτινων δυνάμεων. Ωστόσο, αυτές οι πλατφόρμες δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε βαθιά νερά, γιατί απλά δεν είναι οικονομικό να κατασκευάζονται πόδια-πυλώνες για μεγάλο χρονικό διάστημα. <sup>[1]</sup>

### ***Compliant Towers.***

Οι συμβατικοί πύργοι είναι πολύ σταθεροί, όπως οι πλατφόρμες. Κάθε ένας αποτελείται από ένα σταθερό πύργο, που συνδέεται σε μια βάση πάνω στον πυθμένα της θάλασσας και καταλήγει μέχρι την πλατφόρμα. Αυτός ο πύργος είναι ευέλικτος, σε αντίθεση με τα σχετικά άκαμπτα σκέλη της σταθερής πλατφόρμας. Αυτή η ευελιξία επιτρέπει να λειτουργεί σε πολύ βαθύτερα νερά, καθώς μπορεί να "απορροφήσει" πολύ από την πίεση που ασκείται πάνω του από τον άνεμο και την θάλασσα. Παρά την ευελιξία τους οι συμβατικοί πύργοι είναι αρκετά ισχυροί για να αντέχουν σε συνθήκες τυφώνα.<sup>[1]</sup>

### ***Seastar Platform.***

Η πλατφόρμα αποτελείται από μια πλωτή εξέδρα, σαν τον τύπο ημι-υποβρύχιας εξέδρας. Το κάτω κύτος είναι γεμάτο με νερό κατά το τρύπημα, το οποίο αυξάνει την σταθερότητα της πλατφόρμας απέναντι στην κίνηση του ανέμου και της κυκλοφορίας του νερού. Αυτοί οι πυλώνες διατηρούνται υπό σταθερή τάση, και δεν επιτρέπουν οποιαδήποτε προς τα πάνω ή προς τα κάτω κίνηση της πλατφόρμας. Ωστόσο, η ευελιξία της επιτρέπει την πλευρική κίνηση, η οποία βοηθάει την πλατφόρμα για να αντέχει την δύναμη του ωκεανού και του ανέμου, χωρίς να σπάσει τα μακριά πόδια. Οι πλατφόρμες Seastar χρησιμοποιούνται συνήθως για μικρότερα κοιτάσματα που βρίσκονται σε βαθιά νερά, όταν δεν είναι οικονομικό να κατασκευαστεί μια μεγαλύτερη πλατφόρμα. Μπορούν να λειτουργούν σε βάθη νερού ως 3500 πόδια.<sup>[1]</sup>

### ***Floating Production Systems.***

Τα επιπλέοντα συστήματα παραγωγής είναι ουσιαστικά ημι-υποβρύχια γεωτρήματα εκτός από το ότι περιέχουν εξοπλισμό παραγωγής πετρελαίου και εξοπλισμό γεώτρησης. Τα πλοία μπορούν επιπλέον να χρησιμοποιηθούν ως επιπλέοντα συστήματα παραγωγής. Οι πλατφόρμες μπορούν να διατηρούνται στη θέση τους με μεγάλες, βαριές άγκυρες, ή μέσω του δυναμικού συστήματος εντοπισμού θέσης που διαθέτουν τα πλοία-γεωτρήματα. Σε ένα σύστημα κυμαινόμενων παραγωγής, η κεφαλή του φρεατίου είναι στην πραγματικότητα που συνδέεται με τον πυθμένα αφού η γεώτρηση έχει ολοκληρωθεί, αντί να συνδέεται στην πλατφόρμα. Το εξαγόμενο αέριο μεταφέρεται αμέσως στην ημι-υποβρύχια πλατφόρμα. Αυτά τα συστήματα παραγωγής μπορούν να λειτουργήσουν σε βάθη έως και 6000 πόδια.<sup>[1]</sup>

### ***Tension Leg Platforms.***

Αυτού του είδους οι πλατφόρμες είναι ουσιαστικά μεγαλύτερες εκδόσεις της πλατφόρμας Seastar. Τα μακριά, εύκαμπτα "πόδια" συνδέονται με τον πυθμένα της θάλασσας και καταλήγουν μέχρι την πλατφόρμα. Όπως και με την πλατφόρμα Seastar, τα σκέλη αυτά επιτρέπουν σημαντική πλευρική κίνηση (έως 20 πόδια), με μικρή κατακόρυφη κίνηση. Αυτές οι εξέδρες μπορούν να λειτουργούν σε περίπου 7000 πόδια βάθος.<sup>[1]</sup>

### ***Subsea System.***

Τα υποθαλάσσια συστήματα παραγωγής (Subsea Systems) είναι κατασκευές που βρίσκονται στον πυθμένα της θάλασσας και όχι στην επιφάνεια της θάλασσας. Το φυσικό αέριο εξάγεται στο βυθό, και στη συνέχεια συνδέεται σε μια ήδη υπάρχουσα πλατφόρμα παραγωγής. Γίνεται η διάτρηση του

κοιτάσματος από μια κινητή εξέδρα και αντί για την κατασκευή μιας πλατφόρμας παραγωγής γι' αυτό το κοιτάσμα, το εξαγόμενο φυσικό αέριο μεταφέρεται με σωλήνες ανύψωσης ή ακόμα και υποβρύχια με μεγάλες σωληνώσεις σε μια κοντινή πλατφόρμα παραγωγής. Αυτό επιτρέπει μια στρατηγικά τοποθετημένη πλατφόρμα παραγωγής να εξυπηρετεί πολλά κοιτάσματα σε μια αρκετά μεγάλη περιοχή. Αυτά τα υποθαλάσσια συστήματα χρησιμοποιούνται σε βάθη των 7000 ποδιών ή περισσότερο και δεν έχουν την ικανότητα γεώτρησης αλλά μόνο εξαγωγής και μεταφοράς. <sup>[1]</sup>

### **Spar Platforms.**

Οι Spar πλατφόρμες είναι μια από τις μεγαλύτερες εξέδρες ανοιχτής θαλάσσης. Αυτές οι τεράστιες πλατφόρμες αποτελούνται από ένα μεγάλο κύλινδρο που υποστηρίζεται από μια τυπική σταθερή εξέδρα. Ο κύλινδρος δεν εκτείνεται σε όλη τη διαδρομή προς τον θαλάσσιο πυθμένα, αλλά αντίθετα είναι συνδεδεμένος με τον πυθμένα από μια σειρά καλωδίων και σωληνώσεων. Ο μεγάλος κύλινδρος εξυπηρετεί στο να σταθεροποιεί την πλατφόρμα μέσα στο νερό και να επιτρέπει την κίνησή της και να απορροφά την δύναμη των δυνητικών τυφώνων. <sup>[1]</sup>

## **2.1.2 Επεξεργασία Φυσικού Αερίου**

Το φυσικό αέριο, όπως υπάρχει υπόγεια, δεν είναι ακριβώς το ίδιο με το φυσικό αέριο που έρχεται μέσω των αγωγών στα σπίτια και τις επιχειρήσεις μας. Το φυσικό αέριο, όπως το χρησιμοποιούμε, είναι σχεδόν εξ ολοκλήρου μεθάνιο. Ωστόσο, όταν βρούμε υπογείως φυσικό αέριο, βρίσκεται σε συνδυασμό με μια ποικιλία από άλλες ενώσεις, ιχνοστοιχεία και αέρια, καθώς και λάδι και νερό, τα οποία πρέπει να αφαιρεθούν. Το φυσικό αέριο που μεταφέρεται μέσω των αγωγών πρέπει να πληροί προδιαγραφές καθαρότητας για να επιτραπεί η διάθεσή του. <sup>[3]</sup>



*Σχήμα 2-05: Μονάδα επεξεργασίας Φυσικού Αερίου  
(Πηγή: [www.volcanic-heater.com/natural-gas-processing-market.php](http://www.volcanic-heater.com/natural-gas-processing-market.php)) <sup>[8]</sup>*

Αυτή η ενότητα περιγράφει την διαδικασία της λήψης ακατέργαστου φυσικού αερίου από υπόγειους σχηματισμούς και την επεξεργασία του σε αέριο ποιότητας, έτοιμο για μεταφορά. <sup>[3]</sup>

Το ακατέργαστο φυσικό αέριο βρίσκεται σε 3 τύπους πηγαδιών: πηγάδια πετρελαίου, πηγάδια αερίου και πηγάδια συμπυκνωμάτων. Το φυσικό αέριο που προέρχεται από πηγάδια πετρελαίου ονομάζεται "associated gas". Αυτό το αέριο μπορεί να υπάρχει ξεχωριστά από το πετρέλαιο στον σχηματισμό του, ή διαλυμένο σε ακατέργαστο πετρέλαιο. Το φυσικό αέριο στα πηγάδια αερίου και συμπυκνωμάτων, στο οποίο υπάρχει μικρή ως καθόλου ποσότητα ακατέργαστου πετρελαίου,

ονομάζεται "nonassociated gas". Τα πηγάδια φυσικού αερίου παράγουν το ακατέργαστο φυσικό αέριο από μόνο του, ενώ τα πηγάδια συμπυκνωμάτων παράγουν ελεύθερο φυσικό αέριο μαζί με ένα συμπύκνωμα ημι-υγρών υδρογονανθράκων. Όποια και αν είναι η πηγή του φυσικού αερίου, όταν διαχωρίζεται από το αργό πετρέλαιο (αν υπάρχει), είναι συνήθως σε μίγματα με άλλους υδρογονάνθρακες όπως αιθάνιο, προπάνιο, βουτάνιο και πεντάνια. Επιπλέον το ακατέργαστο φυσικό αέριο περιέχει υδρατμούς, υδρόθειο, ήλιο, άζωτο και άλλες ενώσεις. <sup>[3]</sup>

Η επεξεργασία του φυσικού αερίου αποτελείται από τον διαχωρισμό όλων των διαφόρων υδρογονανθράκων και υγρών από το καθαρό φυσικό αέριο, για να παραχθεί αυτό που λέμε ξηρό φυσικό αέριο ποιότητας αγωγών. Οι κύριοι αγωγοί μεταφοράς, συνήθως επιβάλλουν περιορισμούς στην "διόρθωση" του φυσικού αερίου που επιτρέπεται σε αγωγό. Αυτό σημαίνει ότι πριν μεταφερθεί, πρέπει να καθαριστεί. Ενώ το αιθάνιο, προπάνιο, βουτάνιο και πεντάνιο πρέπει να αφαιρεθούν από το φυσικό αέριο, χωρίς αυτό να σημαίνει ότι είναι όλα απόβλητα. <sup>[3]</sup>

Στην πραγματικότητα, οι συνδεδεμένοι υδρογονάνθρακες, γνωστοί και ως "υγρά φυσικού αερίου", (το NGL) μπορεί να είναι πολύ πολύτιμα υποπροϊόντα της επεξεργασίας του φυσικού αερίου. Τα NGL περιλαμβάνουν αιθάνιο, προπάνιο, βουτάνιο, ισοβουτάνιο και φυσική βενζίνη. Αυτά τα NGL πωλούνται χωριστά και έχουν μια ποικιλία από διαφορετικές χρήσεις, συμπεριλαμβανομένης της ενίσχυσης της ανάκτησης πετρελαίου στις πετρελαιοπηγές, παροχή πρώτων υλών για τα διυλιστήρια πετρελαίου ή εργοστάσια πετροχημικών και ως πηγές ενέργειας.

Οι τέσσερις κύριες διεργασίες για την αφαίρεση των διαφόρων προσμείξεων είναι :

- Αφαίρεση πετρελαίου και συμπυκνωμάτων
- Απομάκρυνση νερού
- Διαχωρισμός NGL
- Αφαίρεση θείου και διοξειδίου του άνθρακα <sup>[3]</sup>

## **Αφαίρεση Πετρελαίου και Συμπυκνωμάτων**

Η διαδικασία που χρησιμοποιείται για τον διαχωρισμό του πετρελαίου από το φυσικό αέριο, καθώς και ο εξοπλισμός που χρησιμοποιείται, μπορεί να ποικίλει ευρέως. Αν και το ξηρό φυσικό αέριο ποιότητας αγωγών είναι σχεδόν πανομοιότυπο σε διαφορετικές γεωγραφικές περιοχές, το ακατέργαστο από διαφορετικές περιοχές αέριο μπορεί να έχει διαφορετικές συνθέσεις και απαιτήσεις διαχωρισμού. Σε πολλές περιπτώσεις το φυσικό αέριο διαλύεται σε πετρέλαιο υπογείως, κυρίως λόγω της πίεσης που έχει ο σχηματισμός υπογείως. Σε αυτές τις περιπτώσεις ο διαχωρισμός του φυσικού αερίου και του πετρελαίου είναι εύκολος, και έπειτα οι δυο υδρογονάνθρακες αποστέλλονται χωριστά για περαιτέρω επεξεργασία. Ο πιο βασικός τύπος διαχωριστή είναι γνωστός ως συμβατικός διαχωριστής. Αποτελείται από μια απλή κλειστή δεξαμενή, όπου η δύναμη της βαρύτητας χρησιμοποιείται για να διαχωριστούν τα βαρύτερα υγρά όπως το πετρέλαιο, από τα ελαφρύτερα όπως το φυσικό αέριο. <sup>[3]</sup>

Σε ορισμένες περιπτώσεις είναι απαραίτητος ειδικός εξοπλισμός για τον διαχωρισμό του φυσικού αερίου από το πετρέλαιο. Παράδειγμα αυτού του τύπου εξοπλισμού είναι ο διαχωριστής χαμηλής θερμοκρασίας. Αυτός χρησιμοποιείται συχνά για φρεάτια παραγωγής αερίου υψηλής πίεσης, μαζί

με ελαφρύ ακατέργαστο πετρέλαιο ή συμπύκνωμα. Αυτοί οι διαχωριστές χρησιμοποιούν την διαφορά πίεσης για να ψύξουν το υγρό φυσικό αέριο και να διαχωρίσουν το πετρέλαιο και το συμπύκνωμα. Το υγρό αέριο εισέρχεται στον διαχωριστή, και ψύχεται ελαφρά από έναν εναλλάκτη θερμότητας. Το αέριο στην συνέχεια κινείται διαμέσου ενός υγρού "knockout" υψηλής πίεσης, το οποίο χρησιμεύει στην απομάκρυνση τυχών υγρών σε διαχωριστή χαμηλής θερμοκρασίας. Το αέριο στη συνέχεια ρέει σε αυτόν τον διαχωριστή χαμηλής θερμοκρασίας μέσω ενός μηχανισμού τσόκ, ο οποίος διευρύνει το αέριο καθώς αυτό εισέρχεται στο διαχωριστή. Αυτή η ταχεία διαστολή του αερίου επιτρέπει την μείωση της θερμοκρασίας στον διαχωριστή. Μετά την αφαίρεση των υγρών, το ξηρό αέριο, στη συνέχεια ταξιδεύει πίσω διαμέσου του εναλλάκτη θερμότητας και θερμαίνεται από το εισερχόμενο υγρό αέριο. Μεταβάλλοντας την πίεση του αερίου σε διάφορα τμήματα του διαχωριστή, είναι δυνατό να μεταβάλλεται η θερμοκρασία, η οποία προκαλεί το πετρέλαιο και λίγο νερό να συμπυκνωθούν από το αέριο ρεύμα του υγρού. Αυτή η βασική σχέση θερμοκρασίας-πίεσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί και αντίστροφα. <sup>[3]</sup>

## **Απομάκρυνση νερού**

Η απομάκρυνση των υδρατμών που υπάρχουν στο φυσικό αέριο απαιτούν μια πιο πολύπλοκη λύση. Συνίσταται αφυδάτωση του φυσικού αερίου, η οποία περιλαμβάνει συνήθως μια από τις δυο μεθόδους: είτε απορρόφηση, είτε προσρόφηση. Απορρόφηση συμβαίνει όταν ο υδρατμός έχει ληφθεί από έναν παράγοντα αφυδάτωσης. Η προσρόφηση λαμβάνει χώρα όταν ο υδρατμός συμπυκνώνεται και συλλέγεται στην επιφάνεια. <sup>[3]</sup>

### **Glycol dehydration**

Σε αυτήν τη διαδικασία ένας υγρός αποξηραντής χρησιμεύει για να απορροφήσει υδρατμό από το ρεύμα του αερίου. Η γλυκόλη, ο κύριος παράγοντας στην διαδικασία αυτή, έχει χημική συγγένεια με το νερό. Αυτό σημαίνει ότι, όταν έρχεται σε επαφή με ένα ρεύμα του φυσικού αερίου που περιέχει νερό, η γλυκόλη θα χρησιμεύσει για να κλέψει το νερό από το ρεύμα αερίου. Μόλις απορροφηθεί, τα σωματίδια γλυκόλης γίνονται βαρύτερα και βυθίζονται στον πυθμένα του ρελέ, όπου αφαιρούνται. Το φυσικό αέριο, αφού αφαιρεθεί το μεγαλύτερο μέρος της περιεκτικότητας του νερού, στη συνέχεια μεταφέρεται από τον αποξηραντή. Το διάλυμα γλυκόλης που φέρει όλο το νερό, απομακρύνεται από το φυσικό αέριο και τίθεται μέσω ενός εξειδικευμένου λέβητα σχεδιασμένου για να εξατμίζει μόνο το νερό έξω από το διάλυμα. Ενώ το νερό έχει ένα σημείο βρασμού από 212 βαθμούς Fahrenheit, η γλυκόλη δεν βράζει μέχρι τους 400 βαθμούς. Αυτή η διαφορά στο σημείο ζέσεως καθιστά σχετικά εύκολη την απομάκρυνση του νερού από το διάλυμα γλυκόλης, επιτρέποντας να επαναχρησιμοποιηθεί στη διαδικασία της αφυδάτωσης. <sup>[3]</sup>

### **Solid-Desiccant Dehydration**

Είναι η πρωταρχική μορφή της αφυδάτωσης του φυσικού αερίου με την χρήση προσρόφησης, και συνήθως αποτελείται από δυο ή περισσότερους πύργους προσρόφησης, οι οποίοι είναι γεμάτοι με έναν στέρεο αποξηραντή. Τυπικοί αποξηραντές περιλαμβάνουν ενεργοποιημένα αλουμίνια ή ένα

κοκκώδες υλικό πυριτικής σύστασης. Υγρό φυσικό αέριο διέρχεται μέσα από αυτούς τους πύργους, από πάνω προς τα κάτω. Καθώς το υγρό αέριο περνά γύρω από τα σωματίδια του αποξηραντή, το νερό συγκρατείται στην επιφάνεια αυτού του υλικού. Περνώντας μέσα από το σύνολο της κλίνης του ξηραντικού μέσου, το σύνολο σχεδόν του νερού προσροφάται επάνω στο αποξηραντικό υλικό, αφήνοντας το ξηρό αέριο να βγει από το κάτω μέρος του πύργου. Αυτή η μέθοδος είναι πιο αποτελεσματική από την προηγούμενη, γιατί οι τύποι συστημάτων αφυδάτωσης που χρησιμοποιούνται είναι οι πλέον κατάλληλοι για μεγάλους όγκους αερίου υπό πολύ υψηλή πίεση, και έτσι συνήθως βρίσκονται σε έναν αγωγό κατάντη του σταθμού συμπίεσης. Δυο ή περισσότεροι πύργοι απαιτούνται λόγω του γεγονότος ότι μετά από μεγάλο διάστημα χρήσης, το αποξηραντικό σε ένα συγκεκριμένο πύργο γίνεται κορεσμένο με νερό.<sup>[3]</sup>

## **Διαχωρισμός NGL**

Υπάρχουν δύο κύριες τεχνικές για την αφαίρεση του NGL από το φυσικό αέριο ρεύμα: τη μέθοδο της απορρόφησης και την κρυογονική διαδικασία επέκτασης. Σύμφωνα με την Ένωση Επεξεργαστών αερίου, αυτές οι δύο διαδικασίες αντιπροσωπεύουν περίπου το 90 τοις εκατό του συνολικού φυσικού αερίου υγρών παραγωγής.<sup>[3]</sup>

### **The Absorption Method**

Η μέθοδος απορρόφησης για εξαγωγή του NGL είναι πολύ παρόμοια με τη χρήση απορρόφησης για αφυδάτωση. Η κύρια διαφορά είναι ότι, στην απορρόφηση NGL, ένα απορροφητικό πετρέλαιο χρησιμοποιείται σε αντίθεση με την γλυκόλη. Αυτό το πετρέλαιο έχει απορροφητική "συγγένεια" με το NGL με τον ίδιο τρόπο όπως η γλυκόλη έχει συγγένεια με το νερό. Πριν στο πετρέλαιο εισχωρήσει κανένα NGL, έχει ονομαστεί "ελαφρύ" πετρέλαιο απορρόφησης. Καθώς το φυσικό αέριο περνά διαμέσου ενός πύργου απορρόφησης, έρχεται σε επαφή με το πετρέλαιο απορρόφησης που απορροφά ένα μεγάλο ποσοστό του NGL. Το "πλούσιο" πετρέλαιο απορρόφησης, που περιέχει τώρα το NGL, εξέρχεται από τον πύργο απορρόφησης από το κάτω μέρος. Είναι πλέον ένα μίγμα απορρόφησης από πετρέλαιο, προπάνιο, βουτάνια, πεντάνια και άλλους βαρύτερους υδρογονάνθρακες. Το πλούσιο πετρέλαιο τροφοδοτείται σε ισχνούς αποστακτήρες πετρελαίου, όπου το μίγμα θερμαίνεται σε μια θερμοκρασία πάνω από το σημείο ζέσεως του NGL, αλλά κάτω από εκείνη του πετρελαίου. Αυτή η διαδικασία επιτρέπει την ανάκτηση της τάξης του 75 τοις εκατό από βουτάνια, και 85 έως 90 τοις εκατό από πεντάνια και βαρύτερα μόρια από το φυσικό αέριο ρεύμα.<sup>[3]</sup>

Η βασική διαδικασία απορρόφησης παραπάνω μπορεί να τροποποιηθεί ώστε να βελτιωθεί η αποτελεσματικότητά της, ή για να στοχεύσει στην εξαγωγή συγκεκριμένων NGL. Στη μέθοδο απορρόφησης πετρελαίου, όπου το ελαφρύ πετρέλαιο ψύχεται μέσω ψύξης, η ανάκτηση προπανίου μπορεί να είναι πάνω από 90 τοις εκατό, και περίπου 40 τοις εκατό του αιθανίου μπορεί να εξαχθεί από το φυσικό αέριο ρεύμα. Εξαγωγή άλλων, βαρύτερων NGL μπορεί να είναι κοντά στο 100 τοις εκατό, χρησιμοποιώντας αυτή τη διαδικασία.<sup>[3]</sup>

### **The Cryogenic Expansion Process**

Κρυογονικές διεργασίες χρησιμοποιούνται επίσης για την εξαγωγή του NGL από το φυσικό αέριο. Ενώ οι μέθοδοι απορρόφησης μπορεί να εξάγουν το σύνολο σχεδόν των βαρύτερων NGL, οι ελαφρύτεροι υδρογονάνθρακες, όπως αιθάνιο, είναι συχνά πιο δύσκολο να ανακάμψουν από το ρεύμα φυσικού αερίου. Σε ορισμένες περιπτώσεις, είναι οικονομικότερο να αφήσουν απλά τα ελαφρύτερα NGL στο ρεύμα φυσικού αερίου. Ωστόσο, αν και είναι οικονομικά να εξαγάγεται το αιθάνιο και άλλοι ελαφρύτεροι υδρογονάνθρακες, οι κρυογονικές διαδικασίες απαιτούνται για υψηλά ποσοστά ανάκτησης. Ουσιαστικά, κρυογονικές διεργασίες αποτελούνται από πτώση της θερμοκρασίας του αερίου ρεύματος σε περίπου -120 βαθμούς Fahrenheit.<sup>[3]</sup>

Υπάρχει ένας αριθμός διαφορετικών τρόπων της ψύξης του αερίου σε αυτές τις θερμοκρασίες, αλλά ένας από τους πιο αποτελεσματικούς είναι γνωστός ως διαδικασία turbo διαστολέα. Σε αυτή τη διαδικασία, οι εξωτερικές ψύκτρες χρησιμοποιούνται για την ψύξη του ρεύματος του φυσικού αερίου. Στη συνέχεια, ένας στρόβιλος εκτόνωσης χρησιμοποιείται για να επεκτείνουν ταχύως τα κρύα αέρια, τα οποία προκαλούν τη θερμοκρασία να πέσει σημαντικά. Αυτή η ταχεία πτώση της θερμοκρασίας συμπυκνώνει το αιθάνιο και άλλους υδρογονάνθρακες στο ρεύμα του αερίου, ενώ διατηρεί το μεθάνιο σε αέρια μορφή. Αυτή η διαδικασία επιτρέπει την ανάκτηση περίπου 90 έως 95 τοις εκατό του αιθανίου αρχικά στο αέριο ρεύμα. Επιπλέον, η τουρμπίνα διαστολής είναι σε θέση να μετατρέψει κάποια από την ενέργεια που απελευθερώνεται όταν το ρεύμα του φυσικού αερίου επεκτείνεται σε επανασυμπίεση των αερίων εκροής του μεθανίου, εξοικονομώντας έτσι ενεργειακό κόστος που συνδέεται με την εξόρυξη αιθανίου.<sup>[3]</sup>

Η εξαγωγή των NGL από το ρεύμα του φυσικού αερίου παράγει καθαρότερο φυσικό αέριο όπως επίσης και πολύτιμους υδρογονάνθρακες όπως είναι τα NGL από μόνα τους.<sup>[3]</sup>

### **Natural Gas Liquid Fractionation.**

Μόλις το NGL αφαιρεθεί από το ρεύμα του φυσικού αερίου, θα πρέπει να αναλυθεί σε βασικές συνιστώσες του για να είναι χρήσιμο. Δηλαδή, το μικτό ρεύμα διαφορετικών NGL πρέπει να διαχωριστεί. Η διαδικασία που χρησιμοποιείται για να εκπληρώσουμε την αποστολή αυτή ονομάζεται κλασματοποίηση. Κλασματοποίηση έργων που βασίζονται σε διαφορετικά σημεία βρασμού των διαφόρων υδρογονανθράκων στο ρεύμα NGL. Ουσιαστικά, η κλασμάτωση λαμβάνει χώρα σε στάδια που αποτελούνται από το βρασμό υδρογονανθράκων μία προς μία. Το όνομα ενός συγκεκριμένου κλασματοποιητή δίνει μια ιδέα ως προς το σκοπό του. Η όλη διαδικασία κλασματοποίησης είναι κατανεμημένη σε βήματα, αρχίζοντας με την απομάκρυνση των ελαφρύτερων NGL από το ρεύμα. Οι ειδικότεροι κλασματοποιητές χρησιμοποιούνται με την ακόλουθη σειρά:

- Deethanizer - αυτό το βήμα χωρίζει το αιθάνιο από το ρεύμα NGL.
- Depropanizer - το επόμενο βήμα χωρίζει το προπάνιο.
- Debutanizer - αυτό το βήμα βράζει μακριά τα βουτάνια, αφήνοντας τα πεντάνια και τους βαρύτερους υδρογονάνθρακες στο ρεύμα NGL.
- Butane Splitter ή Deisobutanizer - αυτό το βήμα χωρίζει το ISO και το κανονικό βουτάνιο.

Προχωρώντας από τους ελαφρύτερους υδρογονάνθρακες στους βαρύτερους, είναι δυνατόν να διαχωριστούν τα διάφορα NGL πιο εύκολα.<sup>[3]</sup>

## Αφαίρεση θείου και διοξειδίου του άνθρακα

Εκτός από το νερό, το πετρέλαιο, και την απομάκρυνση του NGL, ένα από τα πιο σημαντικά μέρη της επεξεργασίας του φυσικού αερίου περιλαμβάνει την αφαίρεση του θείου και διοξειδίου του άνθρακα. Το φυσικό αέριο από μερικά φρεάτια περιέχει σημαντικές ποσότητες θείου και διοξειδίου του άνθρακα. Αυτό το φυσικό αέριο, λόγω της σάπιας μυρωδιάς που παρέχεται από το περιεχόμενό του σε θείο, ονομάζεται "όξινο φυσικό αέριο". Το όξινο αέριο είναι ανεπιθύμητο επειδή οι ενώσεις θείου που περιέχει μπορεί να είναι εξαιρετικά επιβλαβείς, ακόμη και θανατηφόρες, όταν αναπνέονται.



Σχήμα 2-06: Μονάδα αφαίρεσης θείου και διοξειδίου του άνθρακα<sup>[3]</sup>

Το όξινο αέριο μπορεί επίσης να είναι εξαιρετικά διαβρωτικό. Επιπλέον, το θείο που υπάρχει στο ρεύμα του φυσικού αερίου μπορεί να εξαχθεί και να διατεθεί στο εμπόριο από μόνο του. Στην πραγματικότητα, σύμφωνα με το USGS, στις Η.Π.Α. η παραγωγή θείου από τις μονάδες επεξεργασίας φυσικού αερίου αντιπροσωπεύει περίπου το 15 τοις εκατό της συνολικής παραγωγής θείου.<sup>[3]</sup>

Το θείο υπάρχει στο φυσικό αέριο ως υδρόθειο ( $H_2S$ ), και το αέριο θεωρείται συνήθως όξινο εάν η περιεκτικότητα σε υδρόθειο υπερβαίνει τα 5,7 χιλιοστόγραμμα  $H_2S$  ανά κυβικό μέτρο του φυσικού αερίου. Η διαδικασία για την απομάκρυνση του υδρόθειου από το όξινο αέριο αναφέρεται συνήθως ως "γλύκανση" του αερίου.<sup>[3]</sup>

Η κύρια μέθοδος για τη γλύκανση του όξινου φυσικού αερίου είναι αρκετά παρόμοια με τις διαδικασίες αφυδάτωσης γλυκόλης και απορρόφηση NGL. Σε αυτή την περίπτωση, ωστόσο, αμίνες διαλύματα χρησιμοποιούνται για την απομάκρυνση του υδρόθειου. Αυτή η διαδικασία είναι γνωστή απλά ως "διαδικασία αμίνης", ή εναλλακτικά ως διαδικασία Girdler, και χρησιμοποιείται σε 95 τοις εκατό των διαδικασιών γλύκανσης αερίων στις Η.Π.Α. Το όξινο αέριο διευθύνεται μέσω ενός πύργου, ο οποίος περιέχει το διάλυμα αμίνης. Αυτή η λύση έχει μια συγγένεια με το θείο, και απορροφά πολύ όπως η γλυκόλη απορροφά νερό. Υπάρχουν δύο βασικές λύσεις αμίνης που χρησιμοποιούνται, μονοαιθανολαμίνη (MEA) και διαιθανολαμίνη (DEA). Το εξερχόμενο αέριο είναι σχεδόν απαλλαγμένο από θειούχες ενώσεις, και ως εκ τούτου χάνει την όξινη κατάσταση του φυσικού αερίου. Όπως η διαδικασία για την εξαγωγή και την αφυδάτωση NGL με γλυκόλη, το διάλυμα αμίνης που χρησιμοποιείται μπορεί να αναγεννηθεί (δηλαδή, το απορροφούμενο θείο απομακρύνεται), επιτρέποντας να επαναχρησιμοποιηθεί για τη θεραπεία πιο όξινου αερίου.<sup>[3]</sup>

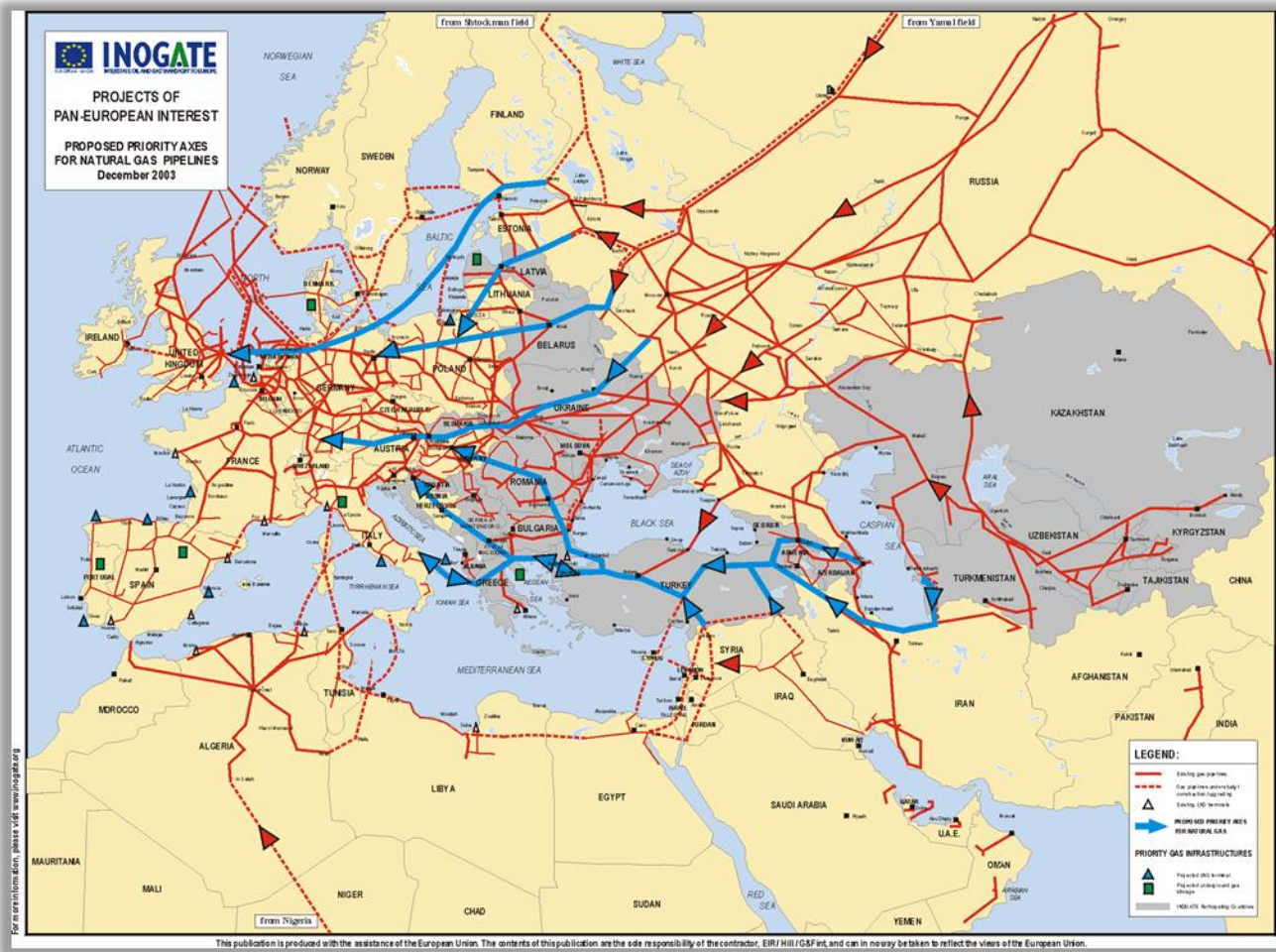


Αν και τα περισσότερα όξινα γλυκαντικά αέρια περιλαμβάνουν τη διαδικασία απορρόφησης αμίνης, είναι επίσης δυνατόν να χρησιμοποιηθούν στερεά αφυγραντικά σαν σφουγγάρια σιδήρου για την αφαίρεση του σουλφιδίου και διοξειδίου του άνθρακα.<sup>[3]</sup>

Το θείο μπορεί να πωληθεί και να χρησιμοποιηθεί, εάν μειωθεί σε στοιχειακή μορφή. Το στοιχειακό θείο είναι μια φωτεινή κίτρινη σκόνη σαν υλικό, και μπορεί συχνά να εμφανιστεί σε μεγάλους σωρούς κοντά σε μονάδες επεξεργασίας φυσικού αερίου. Για την ανάκτηση του στοιχειακού θείου από το εργοστάσιο επεξεργασίας φυσικού αερίου, το θείο που περιέχει απαλλαγή από την γλύκανση αερίου πρέπει να υποστεί περαιτέρω επεξεργασία. Η διαδικασία που χρησιμοποιείται για την ανάκτηση του θείου είναι γνωστή ως διαδικασία Claus, και περιλαμβάνει τη χρησιμοποίηση θερμικών και καταλυτικών αντιδράσεων για την εκχύλιση του στοιχειακού θείου από το διάλυμα σουλφιδίου του υδρογόνου.<sup>[3]</sup>

Συνολικά, η διαδικασία Claus είναι συνήθως σε θέση να ανακτήσει το 97 τοις εκατό του θείου που έχει αφαιρεθεί από το ρεύμα του φυσικού αερίου. Δεδομένου ότι είναι μια τέτοια ρυπογόνα και επιβλαβής ουσία, περαιτέρω φιλτράρισμα, αποτέφρωση, και «απαερίωση» εξασφαλίζει ότι πάνω από το 98 τοις εκατό της περιεκτικότητας σε θείο ανακτάται.<sup>[3]</sup>

## 2.1.3 Μεταφορά Φυσικού Αερίου



Σχήμα 2-07: Δίκτυο διακρατικής μεταφοράς Φυσικού Αερίου

(Πηγή: <http://www.mappery.com/map-of/Europe-Proposed-Natural-Gas-Pipelines-Map>)<sup>[9]</sup>

Η αποδοτική και αποτελεσματική μεταφορά του φυσικού αερίου από τις περιοχές παραγωγής στις περιοχές κατανάλωσης, απαιτεί ένα εκτεταμένο και πολύπλοκο δίκτυο μεταφοράς. Σε πολλές περιπτώσεις, το φυσικό αέριο που παράγεται από ένα συγκεκριμένο πηγάδι, χρειάζεται να καλύψει μεγάλη απόσταση μέχρι το σημείο χρήσης του. Το σύστημα μεταφοράς του φυσικού αερίου αποτελείται από ένα σύνθετο δίκτυο αγωγών, σχεδιασμένο για γρήγορη και αποτελεσματική μεταφορά του φυσικού αερίου από την προέλευσή του σε περιοχές υψηλής ζήτησης. Η μεταφορά του φυσικού αερίου είναι στενά συνδεδεμένη με την αποθήκευσή του: θα πρέπει το φυσικό αέριο που μεταφέρεται αλλά δεν απαιτείται άμεση χρήση του, να τοποθετείται σε εγκαταστάσεις αποθήκευσης μέχρι να χρειαστεί.<sup>[3]</sup>

Υπάρχουν τρεις τύποι αγωγών κατά μήκος της διαδρομής μεταφοράς: το σύστημα συγκέντρωσης, το διακρατικό σύστημα αγωγών και το σύστημα διανομής. Το σύστημα συγκέντρωσης αποτελείται από αγωγούς χαμηλής πίεσης, μικρής διαμέτρου που μεταφέρουν το ακατέργαστο φυσικό αέριο από την κεφαλή του φρέατος στο εργοστάσιο επεξεργασίας. Σε περίπτωση που το φυσικό αέριο από ένα συγκεκριμένο πηγάδι έχει υψηλή περιεκτικότητα σε θείο και διοξείδιο του άνθρακα, πρέπει να

εγκατασταθεί μια εξειδικευμένη σωλήνα περισυλλογής του όξινου αερίου. Το όξινο αέριο είναι διαβρωτικό, έτσι η μεταφορά του από το φρεάτιο στο εργοστάσιο "γλύκανσης" πρέπει να γίνεται με προσοχή.<sup>[3]</sup>

## **Διακρατικό δίκτυο αγωγών**

Το διακρατικό δίκτυο αγωγών μεταφέρει επεξεργασμένο φυσικό αέριο, απ' τις μονάδες επεξεργασίας, σε παραγωγικές περιοχές με μεγάλες απαιτήσεις σε φυσικό αέριο όπως μεγάλες πυκνοκατοικημένες αστικές περιοχές. Οι διακρατικοί αγωγοί είναι οι "αυτοκινητόδρομοι" της μεταφοράς του φυσικού αερίου. Το φυσικό αέριο που μεταφέρεται μέσω διακρατικών αγωγών ταξιδεύει σε υψηλή πίεση στον αγωγό, σε πιέσεις από 200 έως 1500 psi. Αυτό μειώνει τον όγκο του φυσικού αερίου που μεταφέρεται μέσω των αγωγών έως 600 φορές.<sup>[3]</sup>

## **Εξαρτήματα του αγωγού**

Οι διακρατικοί αγωγοί αποτελούνται από έναν αριθμό στοιχείων που εξασφαλίζουν την αποτελεσματικότητα και την αξιοπιστία ενός συστήματος που παρέχει τέτοια σημαντική πηγή ενέργειας όλο τον χρόνο, 24 ώρες την ημέρα, και περιλαμβάνει ένα αριθμό εξαρτημάτων.<sup>[3]</sup>

## **Αγωγοί Μεταφοράς**

Οι αγωγοί μεταφοράς έχουν διάμετρο από 6 ίντσες ως 48 ίντσες, ανάλογα με την λειτουργία τους. Ορισμένα τμήματα σωλήνων μπορούν ακόμη και να αποτελούνται από σωλήνες μικρής διαμέτρου, τόσο μικροί όσο 0,5 ίντσες σε διάμετρο. Ωστόσο αυτοί οι σωλήνες μικρής διαμέτρου, χρησιμοποιούνται συνήθως μόνο σε συστήματα συλλογής και διανομής. Οι κύριοι σωλήνες μεταφοράς σ' ένα συγκεκριμένο σύστημα είναι συνήθως από 16 ως 48 ίντσες σε διάμετρο. Οι πλευρικοί σωλήνες, οι οποίοι μεταφέρουν το φυσικό αέριο από και προς τους κύριους σωλήνες, έχουν συνήθως διάμετρο από 6 ως 16 ίντσες. Οι περισσότεροι μεγάλοι διακρατικοί σωλήνες έχουν διάμετρο από 24 ως 36 ίντσες. Ο πραγματικός αγωγός, που συνήθως ονομάζεται "line pipe", αποτελείται από ασάλινο υλικό με ισχυρό χάλυβα, κατασκευασμένο να πληροί τις προδιαγραφές του API (American Petroleum Institute). Σε αντίθεση οι σωλήνες διανομής είναι κατασκευασμένοι από εξαιρετικά προηγμένο πλαστικό, λόγω της ανάγκης ευελιξίας και της ευκολίας αντικατάστασης.<sup>[3]</sup>

Οι αγωγοί μεταφοράς παράγονται σε χαλυβουργεία, που μερικές φορές είναι ειδικευμένα μόνο γι' αυτόν το σκοπό. Υπάρχουν δυο διαφορετικές τεχνικές παραγωγής, μια για σωλήνες μικρής διαμέτρου και μια για μεγάλες. Για αγωγούς μεγάλης διαμέτρου, από 20 ως 42 ίντσες, οι αγωγοί φτιάχνονται από φύλλα μετάλλου, τα οποία είναι διπλωμένα σε σχήμα σωλήνα, με τα άκρα τους να συγκολλούνται μεταξύ τους για να σχηματιστεί έτσι ένα τμήμα σωλήνα. Απ' την άλλη πλευρά, οι σωλήνες μικρής διαμέτρου, μπορούν να παραχθούν χωρίς ραφή. Αυτό περιλαμβάνει τη θέρμανση μιας μεταλλικής πλάκας σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες, και έπειτα την έμπληξη μιας οπής στη μέση της ράβδου για να παραχθεί ένας κοίλος σωλήνας.<sup>[3]</sup>

Οι σωλήνες καλύπτονται από μια εξειδικευμένη επικάλυψη για να εξασφαλιστεί ότι δεν διαβρώνονται μόλις τοποθετηθούν στο έδαφος. Ο σκοπός της επικάλυψης είναι να προστατεύσει το

σωλήνα από υγρασία, η οποία προκαλεί διάβρωση και σκουριά. Υπάρχουν πολλές διαφορετικές τεχνικές επικάλυψης. Στο παρελθόν οι αγωγοί επικαλύφθηκαν από σμάλτο λιθανθρακόπισσας. Σήμερα οι σωλήνες συχνά προστατεύονται μ' αυτό που είναι γνωστό ως εποξική συγκόλληση με τήξη, η οποία δίνει στον σωλήνα ένα μπλε χρώμα. Επιπλέον, καθοδική προστασία χρησιμοποιείται συχνά, η οποία είναι μια τεχνική για τη λειτουργία ενός λειτουργικού ρεύματος μέσω του σωλήνα για να αποκρούσει τη διάβρωση και τη σκουριά.<sup>[3]</sup>

### Σταθμοί Συμπίεσης

Όπως αναφέρθηκε το φυσικό αέριο είναι σε υψηλή πίεση καθώς ταξιδεύει μέσω διακρατικών αγωγών. Για να εξασφαλιστεί ότι το φυσικό αέριο που ρέει διαμέσου κάθε αγωγού παραμένει υπό πίεση, η συμπίεσή του είναι απαραίτητη περιοδικά κατά μήκος του σωλήνα. Αυτό επιτυγχάνεται με σταθμούς συμπίεσης, τοποθετημένοι συνήθως σε διαστήματα των 65km ως 160km κατά μήκος του αγωγού. Το φυσικό αέριο εισέρχεται στους σταθμούς όπου συμπιέζεται είτε από στρόβιλο ή κινητήρα.<sup>[3]</sup>



Σχήμα 2-08: Σταθμοί συμπίεσης Φυσικού αερίου  
(Πηγή: [www.endlessmtnlifestyles.com/?p=1134](http://www.endlessmtnlifestyles.com/?p=1134))<sup>[10]</sup>

Οι στροβιλοσυμπιεστές κερδίζουν την ενέργειά τους χρησιμοποιώντας μια μικρή ποσότητα του φυσικού αερίου που συμπιέζουν. Η ίδια η τουρμπίνα χρησιμεύει για να λειτουργήσει ένας φυγοκεντρικός συμπιεστής, ο οποίος περιέχει ένας είδος ανεμιστήρα, που συμπιέζει και αντλεί το φυσικό αέριο μέσω του αγωγού. Μερικοί σταθμοί συμπίεσης λειτουργούν με την χρήση ενός ηλεκτρικού κινητήρα για να εκκινήσει

τον ίδιο τύπο φυγοκεντρικού συμπιεστή. Αυτό το είδος συμπίεσης δεν απαιτεί την χρήση ποσότητας φυσικού αερίου απ' το σωλήνα, ωστόσο απαιτεί μια αξιόπιστη πηγή ηλεκτρικής ενέργειας σε κοντινή απόσταση. Εμβολοφόροι κινητήρες με φυσικό αέριο χρησιμοποιούνται για να τροφοδοτήσουν τους σταθμούς συμπίεσης.<sup>[3]</sup>

Εκτός απ' τη συμπίεση του φυσικού αερίου, οι σταθμοί συμπίεσης συνήθως περιέχουν κάποιο είδος υγρού διαχωριστή, σαν αυτούς που χρησιμοποιούνται για την αφυδάτωση του φυσικού αερίου κατά τη διάρκεια της επεξεργασίας του. Συνήθως αυτοί οι διαχωριστές αποτελούνται από φίλτρα που "συλλαμβάνουν" οποιαδήποτε υγρά ή άλλα ανεπιθύμητα σωματίδια του φυσικού αερίου στον αγωγό. Παρά το γεγονός ότι το φυσικό αέριο μέσω των αγωγών θεωρείται "στεγνό"

αέριο, δεν είναι ασυνήθιστο για μια ποσότητα νερού και υδρογονανθράκων, να συμπυκνωθούν έξω απ' το ρεύμα αέρα κατά τη μεταφορά. <sup>[3]</sup>

### **Μετρητικοί Σταθμοί**

Εκτός από τη συμπίεση του φυσικού αερίου την μείωση του όγκου του και την ώθησή του διαμέσω του σωλήνα, οι σταθμοί μέτρησης τοποθετούνται περιοδικά κατά μήκος των διακρατικών αγωγών του φυσικού αερίου. Οι σταθμοί αυτοί επιτρέπουν στις εταιρείες αγωγών την παρακολούθηση του φυσικού αερίου, μέσα στους σωλήνες. Ουσιαστικά, αυτοί οι μετρητικοί σταθμοί, μετρούν την ροή του αερίου κατά μήκος του σωλήνα και επιτρέπουν στις εταιρείες των αγωγών να παρακολουθούν το φυσικό αέριο καθώς ρέει στους σωλήνες. Αυτοί οι μετρητικοί σταθμοί χρησιμοποιούν εξειδικευμένα μέτρα για την μέτρηση της ροής του αερίου χωρίς να εμποδίζουν την κίνησή του. <sup>[3]</sup>

### **Βαλβίδες**

Οι διακρατικοί αγωγοί περιλαμβάνουν έναν μεγάλο αριθμό βαλβίδων σε όλο το μήκος τους. Οι βαλβίδες αυτές λειτουργούν σαν δίοδοι: συνήθως είναι ανοικτές και επιτρέπουν την ελεύθερη ροή του αερίου, ή μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να σταματήσει η ροή του αερίου κατά μήκος ενός ορισμένου τμήματος του σωλήνα. Υπάρχουν πολλοί λόγοι για τους οποίους ένας αγωγός μπορεί να χρειαστεί να περιορίσει την ροή του αερίου σε ορισμένους τομείς. Για παράδειγμα, εάν ένα τμήμα του σωλήνα απαιτεί αντικατάσταση ή συντήρηση, οι βαλβίδες σε κάθε άκρο του τμήματος του σωλήνα μπορούν να κλείσουν, και έτσι να επιτραπεί στους μηχανικούς και τα συνεργεία ασφαλούς πρόσβαση. Αυτές οι μεγάλες βαλβίδες μπορούν να τοποθετούνται και 65km έως 160km κατά μήκος του αγωγού, και υπόκεινται σε ρύθμιση με κώδικες ασφαλείας. <sup>[3]</sup>

## Σταθμοί ελέγχου και συστήματα SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition)

Οι εταιρείες αγωγών φυσικού αερίου έχουν πελάτες και στις δυο άκρες του αγωγού-απ' την μια τους παραγωγούς και τους "μεταποιητές" που εισάγουν το φυσικό αέριο στους αγωγούς και απ' την άλλη τους καταναλωτές και τις τοπικές επιχειρήσεις διανομής αερίου που αντλούν φυσικό αέριο απ' τον αγωγό. Για την διαχείριση του φυσικού αερίου που εισέρχεται στον αγωγό, για να διασφαλιστεί ότι όλοι οι πελάτες λαμβάνουν έγκαιρη παράδοση του μεριδίου τους απ' το αέριο, απαιτούνται εξελιγμένα συστήματα ελέγχου για



Σχήμα 2-09: Σταθμοί ελέγχου και συστήματα SCADA  
(Πηγή: [www.electrical-engineering-portal.com/detecting-cyber-intrusion-in-scada-system](http://www.electrical-engineering-portal.com/detecting-cyber-intrusion-in-scada-system))<sup>[11]</sup>

να παρακολουθούν το αέριο καθώς αυτό ταξιδεύει απ' όλα τα τμήματα του μακροσκελούς δικτύου αγωγών. Για να επιτευχθεί αυτό το έργο της παρακολούθησης και του ελέγχου του φυσικού αερίου που διέρχεται απ' τον αγωγό, κεντρικοί σταθμοί ελέγχου συλλέγουν, αφομοιώνουν και διαχειρίζονται δεδομένα που λαμβάνονται απ' τους σταθμούς παρακολούθησης και τους σταθμούς συμπίεσης σε όλο το μήκος του σωλήνα.<sup>[3]</sup>

Τα περισσότερα δεδομένα λαμβάνονται απ' τα συστήματα SCADA. Τα συστήματα αυτά είναι ουσιαστικά εξελιγμένα συστήματα επικοινωνιών που λαμβάνουν μετρήσεις και συλλογή δεδομένων κατά μήκος του αγωγού (συνήθως σε μετρητικούς σταθμούς ή σταθμούς συμπίεσης και βαλβίδες) και τα διαβιβάζουν στον κεντρικό σταθμό ελέγχου. Ο ρυθμός της ροής διαμέσου του αγωγού, η επιχειρησιακή κατάσταση, η πίεση και η θερμοκρασία μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την εκτίμηση της κατάστασης του αγωγού σε οποιαδήποτε στιγμή. Τα συστήματα αυτά λειτουργούν σε πραγματικό χρόνο, πράγμα που σημαίνει ότι υπάρχει μικρή χρονική υστέρηση μεταξύ των μετρήσεων που λαμβάνονται κατά μήκος του αγωγού και τη διαβίβασή τους στον σταθμό ελέγχου. Τα δεδομένα μεταδίδονται σε έναν κεντρικό σταθμό ελέγχου, επιτρέποντας στους μηχανικούς του αγωγού να γνωρίζουν ακριβώς τι συμβαίνει κατά μήκος του αγωγού ανά πάσα στιγμή. Αυτό επιτρέπει γρήγορες αντιδράσεις σε δυσλειτουργίες του εξοπλισμού, διαρροές ή οποιαδήποτε άλλη ασυνήθιστη δραστηριότητα κατά μήκος του αγωγού. Ορισμένα συστήματα SCADA ενσωματώνουν επίσης την ικανότητα να λειτουργεί εξ' αποστάσεως ορισμένος εξοπλισμός κατά μήκος του αγωγού, συμπεριλαμβανομένων των σταθμών συμπίεσης, επιτρέποντας στους μηχανικούς, σε κεντρικό κέντρο ελέγχου, την άμεση και εύκολη ρύθμιση των ποσοστών ροής στον αγωγό.<sup>[3]</sup>

## Κατασκευή Αγωγών

Καθώς αυξάνεται η χρήση του φυσικού αερίου, αυξάνεται και η ανάγκη για διάθεση υποδομών μεταφοράς, για να καλύπτουν την ζήτηση. Αυτό σημαίνει ότι οι εταιρείες των αγωγών αξιολογούν συνεχώς τη ροή του φυσικού αερίου, και τη δημιουργία αγωγών για να είναι δυνατή η μεταφορά φυσικού αερίου σε αυτές τις περιοχές που είναι υποεξυπηρετούμενες.<sup>[3]</sup>

Η κατασκευή των αγωγών φυσικού αερίου απαιτεί πολύ προγραμματισμό και προετοιμασία. Εκτός από την κατασκευή των αγωγών, πρέπει να ολοκληρωθούν και κάποιες ρυθμιστικές διαδικασίες. Σε πολλές περιπτώσεις, πριν από την έναρξη της αδειοδότησης και τις διαδικασίες πρόσβασης στη γη, οι εταιρίες αγωγών φυσικού αερίου προετοιμάζουν μια ανάλυση σκοπιμότητας για να εξασφαλιστεί ότι υπάρχει μια αποδεκτή διαδρομή του αγωγού που επιφέρει τις λιγότερες επιπτώσεις στο περιβάλλον και τις δημόσιες υποδομές που ήδη υπάρχουν.<sup>[3]</sup>



Σχήμα 2-10: Τοποθέτηση αγωγών Φυσικού Αερίου  
(Πηγή: [https://en.wikipedia.org/wiki/NEL\\_pipeline](https://en.wikipedia.org/wiki/NEL_pipeline))<sup>[50]</sup>

Εάν υποθεθεί ότι η εταιρεία των αγωγών λαμβάνει όλες τις απαιτούμενες άδειες και πληροί το σύνολο των κανονιστικών απαιτήσεων, η κατασκευή του αγωγού μπορεί να ξεκινήσει. Εκτεταμένη τοπογράφηση πρέπει να ολοκληρωθεί, τόσο εναέρια όσο και χερσαία, για να διασφαλιστεί ότι δεν θα έχουμε καμία έκπληξη "ξεκουμπώματος" κατά τη διάρκεια συναρμολόγησης του αγωγού.<sup>[3]</sup>

Η εγκατάσταση ενός αγωγού είναι πιο πολύ μια διαδικασία γραμμής συναρμολόγησης, με τα κομμάτια να ολοκληρώνονται σε τμήματα. Πρώτον, η διαδρομή του αγωγού καθαρίζεται από εμπόδια συμπεριλαμβανομένων των δέντρων, πετρών και οτιδήποτε άλλο μπορεί να εμποδίσει την κατασκευή. Μόλις διασφαλιστεί ότι η διαδρομή του αγωγού έχει επαρκώς καθαριστεί για να επιτρέψει στον κατασκευαστικό εξοπλισμό να πάρει θέση, τα τμήματα των αγωγών εκτείνονται κατά μήκος της διαδρομής που διατίθεται. Αυτά τα τμήματα του σωλήνα έχουν συνήθως μήκος από 40 έως 80 πόδια και είναι συγκεκριμένα για τον προορισμό τους. Δηλαδή ορισμένες περιοχές έχουν διαφορετικές απαιτήσεις για το υλικό επικάλυψης και το πάχος του σωλήνα.<sup>[3]</sup>

Όταν ο σωλήνας έχει τοποθετηθεί, τάφροι σκάβονται παράλληλα για κάθε ορισμένο σωλήνα. Αυτές οι τάφροι είναι συνήθως πέντε με έξι πόδια βάθος, καθώς οι κανονισμοί απαιτούν τον σωλήνα να είναι τουλάχιστον 30 εκατοστά κάτω από την επιφάνεια. Σε ορισμένες περιοχές ωστόσο, ο σωλήνας είναι θαμμένος ακόμα πιο βαθιά. Αφού διανοιγούν τα χαρακώματα, ο σωλήνας

Όταν ο σωλήνας έχει τοποθετηθεί, τάφροι σκάβονται παράλληλα για κάθε ορισμένο σωλήνα. Αυτές οι τάφροι είναι συνήθως πέντε με έξι πόδια βάθος, καθώς οι κανονισμοί απαιτούν τον σωλήνα να είναι τουλάχιστον 30 εκατοστά κάτω από την επιφάνεια. Σε ορισμένες περιοχές ωστόσο, ο σωλήνας είναι θαμμένος ακόμα πιο βαθιά. Αφού διανοιγούν τα χαρακώματα, ο σωλήνας

συναρμολογείται και καλοσχηματίζεται. Αυτό περιλαμβάνει την συγκόλληση των τμημάτων του σωλήνα, και κάμψη ελαφρώς, αν χρειαστεί, για να ταιριάζει με το περίγραμμα της διαδρομής. Επικάλυψη εφαρμόζεται στα άκρα των σωλήνων. Η επικάλυψη εφαρμόζεται σε μύλο επικάλυσης που αφήνει τα άκρα του αγωγού καθαρά ούτως ώστε να μην παρεμβαίνουν με συγκόλληση. Τέλος, ολόκληρη η διαδικασία της επικάλυσης του σωλήνα, ελέγχεται ώστε να διασφαλίζεται ότι είναι απαλλαγμένη από ελαττώματα. <sup>[3]</sup>

Μόλις ο σωλήνας συγκολληθεί, λυγιστεί, επικαλυφθεί και επιθεωρηθεί, μπορεί να τοποθετηθεί στις σκαμμένες τάφρους. Αυτό γίνεται με εξειδικευμένο εξοπλισμό που ενεργεί για την άρση του σωλήνα κατά τρόπο επίπεδο και έπειτα γίνεται η τοποθέτηση στην τάφρο. Μόλις χαμηλωθεί στο έδαφος, η τάφρος γεμίζεται προσεκτικά για να εξασφαλιστεί ότι ο σωλήνας και η επίστρωση διατηρούν την ακεραιότητά τους. Το τελευταίο βήμα για την κατασκευή του αγωγού είναι η υδραυλική δοκιμή. Αυτή πραγματοποιείται σε νερό, σε πιέσεις υψηλότερες απ' ότι απαιτούνται για την μεταφορά του φυσικού αερίου, σε όλο το μήκος του σωλήνα. Αυτό χρησιμεύει ως μια δοκιμή για να εξασφαλιστεί ότι ο αγωγός είναι αρκετά ισχυρός και απουσιάζουν τυχόν διαρροές από ρωγμές. <sup>[3]</sup>

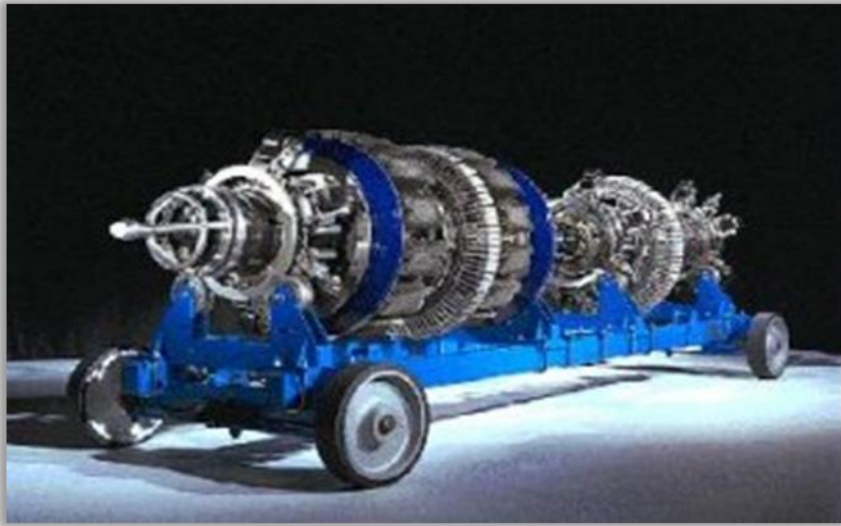
Τοποθέτηση σωλήνα διαμέσω ρευμάτων ή ποταμιών μπορεί να επιτευχθεί με δυο τρόπους. Ανοικτή περικοπή διέλευσης περιλαμβάνει την εκσκαφή των τάφρων στο πάτωμα του ποταμιού για να στεγάσουν τον σωλήνα. Όταν γίνει αυτό ο ίδιος ο σωλήνας είναι συνήθως εξοπλισμένος με μια συγκεκριμένη θήκη, που εξασφαλίζει ότι παραμένει στον πυθμένα και προσθέτει μια συγκεκριμένη επικάλυση, για πρόληψη διαρροών φυσικού αερίου μέσα στο νερό. Εναλλακτικά, μπορεί να χρησιμοποιηθεί μια μορφή γεώτρησης όπου ένα τούνελ διανοίγεται κάτω από τον ποταμό, μέσω του οποίου διέρχεται ο σωλήνας. <sup>[3]</sup>

Αφού έχει εγκατασταθεί ο αγωγός και επικαλυφθεί, λαμβάνονται εκτεταμένες προσπάθειες για την αποκατάσταση της οδού του αγωγού στην αρχική κατάσταση ή να μετριάσουν τυχόν περιβαλλοντικές ή άλλες επιπτώσεις που μπορεί να έχουν συμβεί κατά τη διάρκεια της διαδικασίας κατασκευής. <sup>[3]</sup>



## Επιθεώρηση και ασφάλεια αγωγών

Προκειμένου να εξασφαλιστεί η αποτελεσματική και ασφαλής λειτουργία του εκτεταμένου δικτύου αγωγών φυσικού αερίου, οι εταιρείες αγωγών επιθεωρούν τακτικά τους αγωγούς για διάβρωση και ελαττώματα. Αυτό γίνεται με χρήση εξελιγμένου εξοπλισμού γνωστού ως "smart pigs". Οι "smart pigs" είναι ευφυείς ρομποτικές συσκευές που προωθούνται στους αγωγούς για να ελέγξουν το εσωτερικό τους. Οι "smart pigs" μπορούν να ελέγξουν το πάχος των σωληνώσεων, την στρογγυλάδα, για σημάδια διάβρωσης, για ανίχνευση διαρροών και οποιοδήποτε άλλο ελάττωμα κατά μήκος του εσωτερικού του αγωγού, που μπορεί είτε να εμποδίζει τη ροή του αερίου ή να αποτελεί κίνδυνο για την ασφάλεια της λειτουργίας του αγωγού.<sup>[3]</sup>



Σχήμα 2-10: Smart pigs για την επιθεώρηση των αγωγών<sup>[3]</sup>

Εκτός από την επιθεώρηση με "smart pigs", υπάρχουν μια σειρά από προληπτικά μέτρα και διαδικασίες ασφαλείας για την ελαχιστοποίηση του κινδύνου ατυχημάτων. Στην πραγματικότητα, η μεταφορά του φυσικού αερίου είναι ένας από τους ασφαλέστερους τρόπους μεταφοράς ενέργειας.<sup>[3]</sup>

Μερικές από τις προφυλάξεις ασφαλείας που συνδέονται με τους αγωγούς φυσικού αερίου περιλαμβάνουν:

- Εναέριες περιπολίες: αεροπλάνα χρησιμοποιούνται για να διασφαλίσουν ότι δεν λαμβάνουν χώρα κατασκευαστικές δραστηριότητες πολύ κοντά στη διαδρομή του αγωγού, ιδίως σε κατοικημένες περιοχές. Αυθαίρετες κατασκευές και σκάψιμο είναι η κύρια απειλή για την ασφάλεια του αγωγού.
- Ανίχνευση διαρροών: εξοπλισμός ανίχνευσης φυσικού αερίου χρησιμοποιείται σε τακτά χρονικά διαστήματα από το προσωπικό στην επιφάνεια για έλεγχο διαρροών. Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό σε περιοχές όπου το φυσικό αέριο δεν έχει αποκτήσει οσμή.
- Δείκτες αγωγού: σημάδια στην επιφάνεια πάνω από τους αγωγούς φυσικού αερίου δείχνουν την παρουσία των υπόγειων αγωγών, για μείωση της πιθανότητας ενδεχόμενων εμποδίων με τον αγωγό.
- Δειγματοληψία αερίου: προγραμματισμένη δειγματοληψία του φυσικού αερίου μέσω αγωγών εξασφαλίζουν την ποιότητά του, και μπορεί επίσης να υποδεικνύουν διάβρωση του εσωτερικού του αγωγού ή την εισροή ρυπαντών.

- Προληπτική συντήρηση: αυτό περιλαμβάνει τον έλεγχο των βαλβίδων και την άρση εμποδίων στην επιφάνεια της επιθεώρησης των αγωγών.
- Αντιμετώπιση καταστάσεων έκτακτης ανάγκης: οι εταιρείες αγωγών έχουν ομάδες αντιμετώπισης έκτακτων αναγκών που τις εκπαιδεύουν για την αντιμετώπιση σε ένα ευρύ φάσμα πιθανών ατυχημάτων.<sup>[3]</sup>

#### 2.1.4 Αποθήκευση Φυσικού Αερίου

Το φυσικό αέριο όπως και άλλα προϊόντα μπορούν να αποθηκευτούν για αόριστη χρονική περίοδο. Η εξόρυξη, παραγωγή και μεταφορά του απαιτεί αρκετό χρόνο, με το φυσικό αέριο που φτάνει τελικά στον προορισμό του, να μην χρειάζεται να καταναλωθεί αμέσως, οπότε οδηγείται σε υπόγειες αποθηκευτικές εγκαταστάσεις.<sup>[3]</sup>

Το φυσικό αέριο είναι εποχικό καύσιμο. Αφού για παράδειγμα η ζήτηση προς αυτό είναι συνήθως υψηλότερη κατά τη διάρκεια του χειμώνα εξαιτίας του ότι χρησιμοποιείται κυρίως για θέρμανση οικιακών και βιομηχανικών κτισμάτων. Οι αποθηκευτικές εγκαταστάσεις παίζουν σημαντικό ρόλο στην εξασφάλιση απαραίτητων αποθεμάτων κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού ικανών να καλύψουν την αυξημένη ζήτηση κατά τη διάρκεια του χειμώνα. Ωστόσο, τα τελευταία χρόνια, με την χρήση του φυσικού αερίου ως καυσίμου για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, η ζήτηση προς αυτό αυξάνεται και τους καλοκαιρινούς μήνες. Το αποθηκευμένο φυσικό αέριο ακόμα εξυπηρετεί ως ασφάλεια ενάντια σε απρόβλεπτα ατυχήματα, φυσικές καταστροφές ή άλλα γεγονότα τα οποία μπορούν να επηρεάσουν την παραγωγή και παράδοση του φυσικού αερίου.<sup>[3]</sup>

Η αποθήκευση φυσικού αερίου δεν αποτελούσε κομμάτι της λειτουργικής διαδικασίας μιας εταιρείας φυσικού αερίου αλλά ο καθένας έχει την δυνατότητα να επενδύσει μόνο στην αποθήκευση φυσικού αερίου είτε για εμπορικούς λόγους, είτε λόγω των λειτουργικών απαιτήσεων της επιχείρησής του. Η αποθήκευση εξυπηρετεί ως ρυθμιστής μεταξύ της μεταφοράς και διανομής, ώστε να εξασφαλίζει επαρκείς ποσότητες αερίου σε εποχιακές μεταβολές στην ζήτηση όπως και σε απρόσμενες αιχμές ζήτησης. Η αποθήκευση μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για εμπορικούς λόγους αφού για παράδειγμα μπορεί να αποθηκευτούν ποσότητες φυσικού αερίου όταν η τιμή είναι αρκετά χαμηλή και εν συνεχεία η πώλησή του να γίνει όταν η τιμή του αυξηθεί. Αυτή τη στιγμή οι στόχοι και η χρήση της αποθήκευσης φυσικού αερίου είναι άμεσα συνδεδεμένα με τα περιβαλλοντικά πλαίσια και τους θεσμοθετημένους κανονισμούς.<sup>[3]</sup>

#### **Base Load vs Peak Load Storage.**

Οι ανάγκες για αποθηκευμένο φυσικό αέριο βασικά είναι δυο: εκείνες που καλύπτουν βασικό φορτίο ζήτησης και εκείνες που καλύπτουν το φορτίο αιχμής. Όπως αναφέρθηκε η αποθήκευση απαιτείται για δυο λόγους. Πρώτον, για την κάλυψη της εποχιακής ζήτησης και δεύτερον, ως ασφάλεια σε απρόβλεπτες διαταραχές στην παροχή.<sup>[3]</sup>

## **Base Load Storage**

Η αποθήκη βασικού φορτίου διαθέτει χωρητικότητα ικανή να καλύψει τις εποχιακές αυξήσεις στην ζήτηση φυσικού αερίου. Οι εγκαταστάσεις της διαθέτουν μεγάλες ποσότητες φυσικού αερίου που είναι δυνατόν να ικανοποιούν μακροπρόθεσμα τις απαιτήσεις σε φυσικό αέριο. Τυπικά ο κύκλος εργασιών σε αυτές τις εγκαταστάσεις είναι ένας χρόνος αφού η έγχυση φυσικού αερίου στις δεξαμενές γίνεται τους θερινούς μήνες συνήθως από τον Απρίλιο ως τον Οκτώβριο, ενώ η διάθεση του αποθηκευμένου του φυσικού αερίου γίνεται τους χειμερινούς μήνες από Νοέμβρη ως Μάρτιο. Οι δεξαμενές του είναι μεγάλες όμως η παράδοση φυσικού αερίου είναι συγκριτικά με το μέγεθος του πολύ μικρή κάτι που σημαίνει πως το φυσικό αέριο που μπορεί να εξαχθεί κάθε μέρα είναι περιορισμένο. Ωστόσο, αυτές οι εγκαταστάσεις παρέχουν παρατεταμένα και σε σταθερή ποσότητα φυσικό αέριο. Οι δεξαμενές εξαντλημένων κοιτασμάτων φυσικού αερίου είναι ο πιο κοινός τύπος εγκαταστάσεων κατά την αποθήκευση βασικού φορτίου ζήτησης. <sup>[3]</sup>

## **Peak Load Storage**

Οι εγκαταστάσεις για την αποθήκευση φορτίου αιχμής ζήτησης είναι σχεδιασμένες ώστε να παρέχουν υψηλή ποσότητα φυσικού αερίου σε σύντομο χρονικό διάστημα για την άμεση κάλυψη απρόσμενων και βραχυπρόθεσμων αυξήσεων της ζήτησης. Σε σύγκριση με τις εγκαταστάσεις βασικού φορτίου αυτές δεν μπορούν να αποθηκεύσουν μεγάλες ποσότητες φυσικού αερίου όμως έχουν τη δυνατότητα να παρέχουν μικρές ποσότητες φυσικού αερίου σε πολύ σύντομο χρονικό διάστημα και να αναπληρώνονται τακτικά. Ενώ οι εγκαταστάσεις βασικού φορτίου απαιτούν κύκλο εργασιών της τάξης του ενός έτους αφού η έγχυση και εξαγωγή φυσικού αερίου από αυτές γίνεται κατά τη διάρκεια του έτους, στις εγκαταστάσεις φορτίου αιχμής ο κύκλος εργασιών περιορίζεται σημαντικά αφού οι ανάγκες σε φυσικό αέριο μπορεί να είναι για λίγες ημέρες ή εβδομάδες. Σπήλαια άλατος χρησιμοποιούνται κυρίως ως μέσα για την αποθήκευση φορτίου αιχμής και σε ορισμένες περιπτώσεις υδροφόρα στρώματα. <sup>[3]</sup>

### **Τύποι υπόγειας αποθήκευσης:**

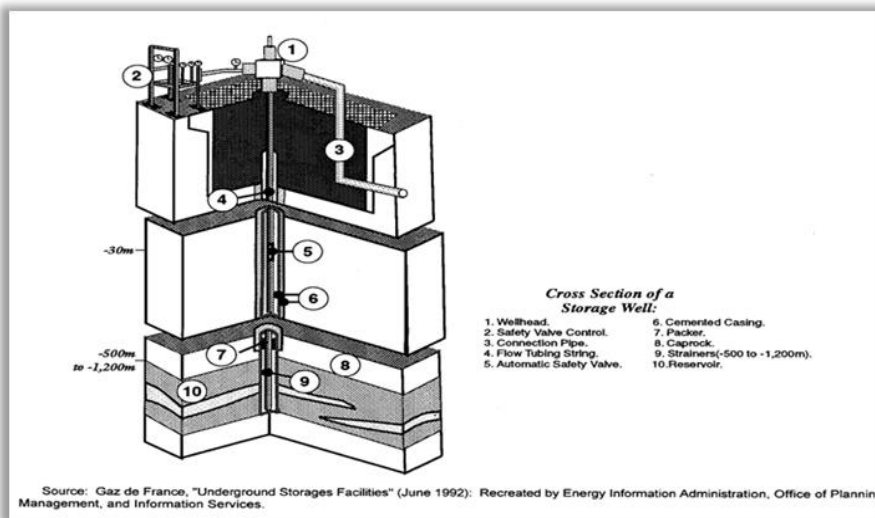
- δεξαμενές εξαντλημένων κοιτασμάτων
- υδροφόρα στρώματα
- σπήλαια άλατος

Ουσιαστικά οποιαδήποτε υπόγεια εγκατάσταση αποθήκευσης φυσικού αερίου είναι διαμορφωμένη έτσι ώστε να γίνει ένα υπόγειο "δοχείο" αποθήκευσης στο οποίο θα εισέλθει φυσικό αέριο. Το φυσικό αέριο εγχέεται στην κατασκευή δημιουργώντας υψηλή πίεση κατά την εισαγωγή του. Κατά αυτό τον τρόπο η υπόγεια αυτή κατασκευή γίνεται ένας είδος "δοχείου" αποθήκευσης συμπιεσμένου φυσικού αερίου. Με την εξέλιξη των γεωτρήσεων όσο υψηλότερη είναι η πίεση εντός της δεξαμενής αποθήκευσης, τόσο πιο εύκολη γίνεται η εξαγωγή του από αυτή. Από την στιγμή που η πίεση εντός της δεξαμενής γίνει μικρότερη σε σύγκριση με εκείνη της κεφαλής της γεώτρησης δεν

αναπτύσσεται ικανή διαφορά πίεσης μεταξύ των, προκειμένου να ωθήσει το φυσικό αέριο προς την έξοδο από την δεξαμενή. Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι σε οποιαδήποτε υπόγεια εγκατάσταση αποθήκευσης μια ποσότητα φυσικού αερίου δεν θα εξαχθεί ποτέ από αυτή. Αυτή η ποσότητα φυσικού αερίου ονομάζεται "physically unrecoverable gas" αφού είναι μονίμως ενσωματωμένο στην αποθηκευτική εγκατάσταση. Μαζί με το "physically unrecoverable gas" υπάρχουν στην εγκατάσταση ποσότητες φυσικού αερίου που είναι γνωστές ως "base gas" ή "cushion gas". Έτσι λέγεται ο όγκος φυσικού αερίου που είναι απαραίτητος εντός της δεξαμενής ώστε να δημιουργεί την απαιτούμενη συμπίεση για την εξαγωγή του φυσικού αερίου. Για την σωστή λειτουργία της δεξαμενής το "cushion gas" πρέπει να παραμένει εντός της, ωστόσο μια ποσότητα από αυτό μπορεί να εξαχθεί με τη χρήση ειδικού εξοπλισμού συμπίεσης αερίου στην κορυφή της γεώτρησης. "Working gas" ονομάζεται ο όγκος φυσικού αερίου στην δεξαμενή που μπορεί να εξαχθεί κατά τη διάρκεια της λειτουργίας της. Είναι στην ουσία το φυσικό αέριο που αποθηκεύεται και στην συνέχεια παρέχεται για την κάλυψη της ζήτησης. Η χωρητικότητα των δεξαμενών αντιστοιχεί στην χωρητικότητα "Working gas" εντός τους. Αρχικά κατά τη διαδικασία εξαγωγής φυσικού αερίου από τις δεξαμενές αποθήκευσης η πίεση αυτών βρίσκεται στην υψηλότερη τιμή της κάτι που σημαίνει ότι λαμβάνουμε φυσικό αέριο με πολύ γρήγορο ρυθμό. Όμως καθώς ο όγκος του φυσικού αερίου μειώνεται, μειώνεται και η πίεσή του κάνοντας τον ρυθμό εξαγωγής αργό. Κατά διαστήματα χειριστές της υπόγειας δεξαμενής μπορεί να επανατοποθετηθούν σε αυτή μέρος του "working gas" ως "cushion gas" αφού πρώτα έχει γίνει αξιολόγηση της λειτουργίας της. <sup>[3]</sup>

### Δεξαμενές Εξαντλημένων Κοιτασμάτων

Η πιο κοινή και εξέχουσα μορφή υπόγειας αποθήκευσης ΦΑ αποτελείται από δεξαμενές εξαντλημένου κοιτάσματος αερίου. Αυτές οι δεξαμενές αποθήκευσης χρησιμοποιούν τις υπόγειες κοιλότητες (πηγές) από τις οποίες έχει αξιοποιηθεί όλο το ΦΑ που διέθεταν, αφήνοντας ύστερα έναν κενό σχηματισμό γεωλογικά ικανό να συγκρατεί ΦΑ. Η χρήση του σχηματισμού αυτού για ανάγκες αποθήκευσης επιτρέπει την χρησιμοποίηση εξοπλισμού εξαγωγής και διανομής ΦΑ από την στιγμή που η πηγή ΦΑ ήταν ενεργή οπότε μειώνεται αισθητά το κόστος μετατροπής της εξαντλημένης πηγής ΦΑ σε δεξαμενή αποθήκευσης. Οι εξαντλημένες πηγές ΦΑ είναι ιδιαίτερα ελκυστικές για μετατροπή τους σε χώρους αποθήκευσης καθώς τα γεωλογικά χαρακτηριστικά είναι ήδη γνωστά από την πρώτη εξαγωγή από αυτές ποσοτήτων ΦΑ. Από τους τρεις



Σχήμα 2-11: Δεξαμενές Εξαντλημένων Κοιτασμάτων για αποθήκευση ΦΑ (Πηγή: [www.eia.gov/pub/oil\\_gas/natural\\_gas/analysis\\_publications/ngpipeline/undrgrnd\\_storage.hmt](http://www.eia.gov/pub/oil_gas/natural_gas/analysis_publications/ngpipeline/undrgrnd_storage.hmt))<sup>[12]</sup>

τύπους υπόγειας αποθήκευσης ΦΑ αυτή των δεξαμενών εξαντλημένων κοιτασμάτων είναι η φθινότερη και η ευκολότερη στην κατασκευή, λειτουργία και συντήρηση. [3]

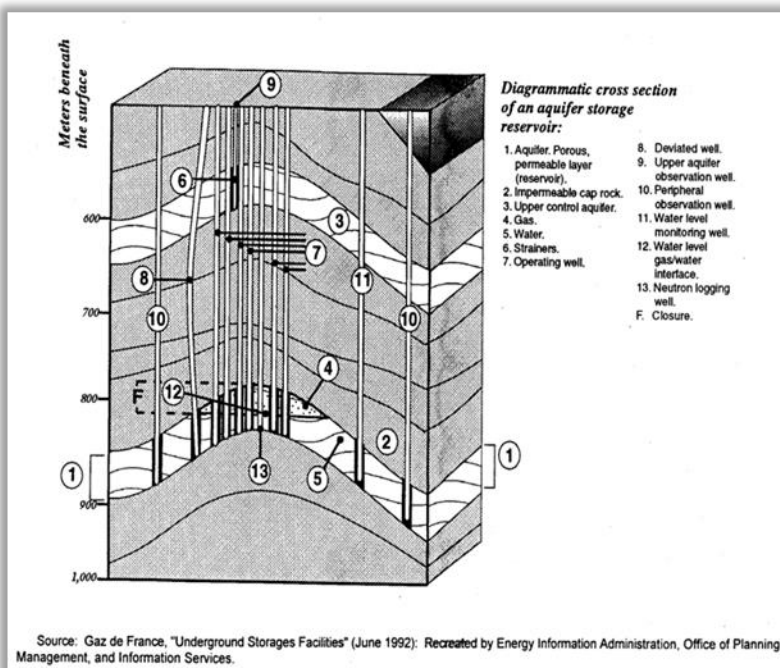
Οι παράγοντες που επηρεάζουν αν μια εξαντλημένη πηγή-δεξαμενή ΦΑ μπορεί να μετατραπεί σε κατάλληλη εγκατάσταση αποθήκευσης είναι γεωγραφικοί και γεωλογικοί. Γεωγραφικά οι εξαντλημένες πηγές-δεξαμενές πρέπει να βρίσκονται σχετικά κοντά σε καταναλωτικές περιοχές και σε υποδομές μεταφοράς ΦΑ συμπεριλαμβανομένου του κορμού του συστήματος αγωγών όπως και των συστημάτων διανομής. [3]

Γεωλογικά οι εξαντλημένες πηγές-δεξαμενές πρέπει να είναι πορώδεις και να έχουν υψηλή διαπερατότητα. Πορώδεις, ώστε να συγκρατούν μεγάλες ποσότητες ΦΑ, η διαπερατότητα τους καθορίζει το ρυθμό με τον οποίο το φυσικό αέριο ρέει μέσω του σχηματισμού, το οποίο με τη σειρά του καθορίζει τον ρυθμό έγχυσης και την εξαγωγή του working gas. [3]

Προκειμένου να διατηρηθεί η πίεση σταθερή στις εξαντλημένες πηγές-δεξαμενές, περίπου το 50% του ΦΑ μέσα στον σχηματισμό θα πρέπει να συγκρατείται ως cushion gas. Εντούτοις αυτές οι δεξαμενές ήταν γεμάτες με ΦΑ και υδρογονάνθρακες προγενέστερα οπότε δεν απαιτείται έγχυση σε αυτές ποσότητας 'φυσικά επανακτήσιμου καυσίμου' (physically unrecoverable gas) αφού αυτή η ποσότητα αερίου προϋπήρχε στη δεξαμενή. [3]

## Υδροφόρα Στρώματα

Είναι υπόγειες πορώδεις και διαπερατές πέτρινες κοιλότητες οι οποίες λειτουργούν ως δεξαμενές αποθήκευσης νερού. Ωστόσο, σε συγκεκριμένες περιπτώσεις αυτές οι κοιλότητες που περιέχουν νερό μπορούν να διαμορφωθούν έτσι ώστε να χρησιμοποιηθούν ως χώροι αποθήκευσης ΦΑ. Καθώς είναι πολύ ακριβός στο να αναπτυχθεί αυτός ο τύπος αποθήκευσης χρησιμοποιείται κυρίως σε περιοχές οι οποίες δεν βρίσκονται κοντά σε δεξαμενές εξαντλημένων κοιτασμάτων αερίου. Παραδοσιακά αυτού του τύπου η αποθήκευση λειτουργεί για την παροχή ΦΑ κατά την διάρκεια της χειμερινής περιόδου, ωστόσο μπορεί να προσφέρει ΦΑ για την κάλυψη των αναγκών σε περιόδους αιχμής της ζήτησης. [3]



Σχήμα 2-12: Υδροφόρα στρώματα για αποθήκευση ΦΑ [12]

Αυτή η μέθοδος αποθήκευσης είναι η πιο ακριβή και λιγότερο επιθυμητή από τις άλλες για πολλούς λόγους. Αρχικά τα γεωλογικά χαρακτηριστικά των υδροφόρων κοιλοτήτων δεν είναι πλήρως γνωστά όπως ήταν με τις εξαντλημένες πηγές-δεξαμενές προηγουμένως. Ένα σημαντικό μέρος χρημάτων και χρόνου πρέπει να δοθεί στην ανακάλυψη των χαρακτηριστικών του υδροφόρου

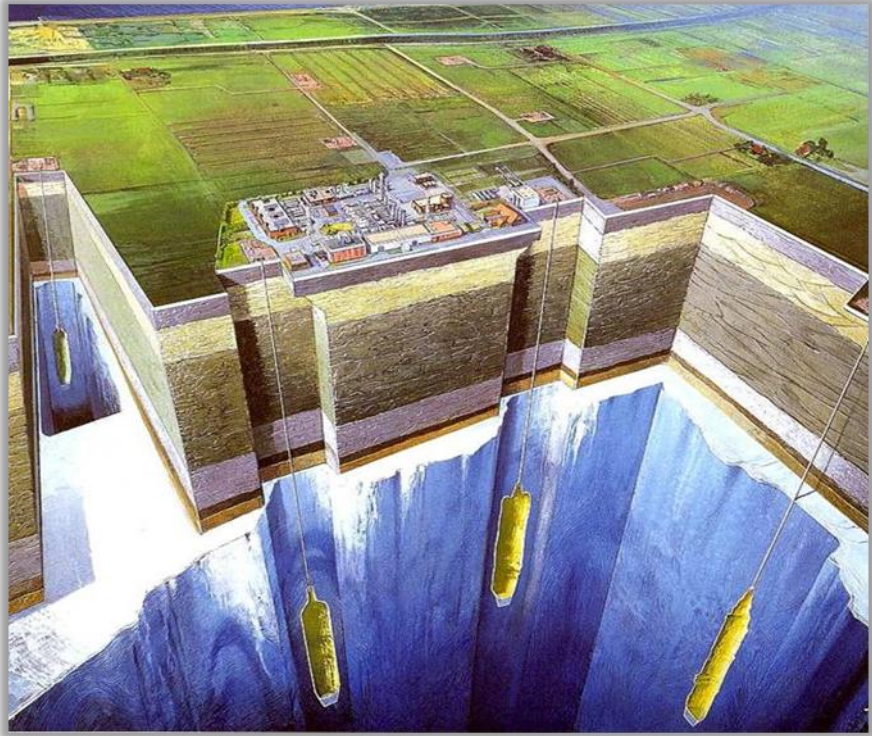
στρώματος και στην εξέταση της ικανότητας του να μετατραπεί σε εγκατάσταση αποθήκευσης ΦΑ. Πρέπει να πραγματοποιηθούν σεισμικές δοκιμές όπως έγιναν κατά την εξερεύνηση πιθανών θέσεων ύπαρξης ΦΑ. Η περιοχή της κατάλληλης κοιλότητας για την δημιουργία χώρου αποθήκευσης ΦΑ, η σύνθεση αυτής, το κατά πόσο είναι πορώδης και η πίεση εντός αυτής πρέπει όλα να έχουν ερευνηθεί πριν την δημιουργία δεξαμενής αποθήκευσης εντός της κοιλότητας.<sup>[3]</sup>

Προκειμένου να αναπτυχθεί ένας υδροφόρος σχηματισμός σε δεξαμενή αποθήκευσης ΦΑ θα πρέπει να γίνουν και οι σχετικές υποδομές συμπεριλαμβανομένου της εγκατάστασης γεώτρησης, εξοπλισμού εξαγωγής, δίκτυο αγωγών, εγκαταστάσεων αφυδάτωσης ίσως και εξοπλισμό συμπίεσης. Δεδομένου ότι αυτές οι κοιλότητες είναι γεμάτες με νερό σε μερικές περιπτώσεις ο ισχυρός εξοπλισμός έγχυσης πρέπει να χρησιμοποιηθεί για να επιτρέψει ικανοποιητική πίεση εγχύσεων που θα ωθήσουν το εναπομένον νερό προς τα κάτω και την αντικατάστασή του από φυσικό αέριο. Καθώς το ΦΑ έχει αποθηκευτεί πλέον εντός της κοιλότητας που εμπεριείχε νερό κατά την εξαγωγή του αργότερα από εκεί θα χρειαστεί να χρησιμοποιηθεί συγκεκριμένος εξοπλισμός ώστε να το αφυδατώσει προτού μεταφερθεί με αγωγούς στα κέντρα διανομής. Οι υδροφόρες δεξαμενές δεν έχουν την ίδια ικανότητα συγκράτησης του ΦΑ όπως των εξαντλημένων κοιτασμάτων. Αυτό σημαίνει ότι θα υπάρχει διαρροή από το αποθηκευμένο ΦΑ της υδροφόρας κοιλότητας το οποίο όμως θα συλλέξουν και θα εξάγουν ειδικά κατασκευασμένα φρεάτια-συλλέκτες.<sup>[3]</sup>

Επιπρόσθετα οι σχηματισμοί υδροφόρων στρωμάτων απαιτούν χαρακτηριστικά περισσότερο "cushion gas" από ότι των εξαντλημένων κοιτασμάτων. Αφού σε αυτόν τον σχηματισμό δεν προϋπήρχε ΦΑ για να το χρησιμοποιήσει κατά την διάρκειά της λειτουργίας εξαγωγής "working gas" οπότε θα εγχυθεί ποσότητα ΦΑ που θα χαρακτηριστεί ως "physically unrecoverable gas". Σε αυτή την περίπτωση οι απαιτήσεις σε "cushion gas" μπορεί να είναι τόσο υψηλές ως και 80% του συνολικού όγκου του ΦΑ. Ενώ στις δεξαμενές εξαντλημένων κοιτασμάτων είναι δυνατόν να εξαχθεί το "cushion gas" στα υδροφόρα στρώματα θα μπορούσε να έχει αρνητικά αποτελέσματα σε σημείο να προκύψει ζημιά σε όλο τον σχηματισμό. Επομένως το αέριο που εγχέεται εντός του σχηματισμού ως "cushion gas" μπορεί να παραμείνει ως μη επανακτήσιμο ακόμα και αν η όλη διαδικασία αποθήκευσης σταματήσει να λειτουργεί. Είναι γεγονός πως τέτοιου τύπου αποθήκευση ΦΑ αερίου έγινε σε περιόδους που η τιμή του ήταν αρκετά χαμηλή οπότε η ποσότητα "cushion gas" που στην ουσία χανόταν δεν τους επηρέαζε σημαντικά όμως όσο η τιμή του ΦΑ αυξανόταν αυτού του τύπου η αποθήκευση δεν έβρισκε χώρο να αναπτυχθεί.<sup>[3]</sup>

## Σπήλαια Άλατος

Αλατισμένοι σχηματισμοί σπηλαίων προσφέρουν μια άλλη επιλογή για τη φυσική αποθήκευση αερίου. Αυτοί οι σχηματισμοί ταιριάζουν καλά στη φυσική αποθήκευση αερίου, μόλις διαμορφωθούν, επιτρέπουν να διαφύγει μικρή ποσότητα αποθηκευμένου φυσικού αερίου εκτός του συγκεκριμένου εξαγόμενου ΦΑ. Οι τοίχοι ενός αλατισμένου σπηλαίου έχουν επίσης τη δομική δύναμη του χάλυβα, η οποία το καθιστά πολύ ανθεκτικό ενάντια στην υποβάθμιση της δεξαμενής κατά τη διάρκεια της ζωής της.<sup>[3]</sup>



Σχήμα 2-13: Σπήλαια άλατος για αποθήκευση ΦΑ<sup>[12]</sup>

Ουσιαστικά, τα αλατισμένα σπήλαια διαμορφώνονται από τις υπάρχουσες πηγές άλατος.

Αυτές οι πηγές άλατος μπορούν να υπάρξουν με δύο

πιθανές μορφές: αλατισμένοι θόλοι, και αλατισμένα "κρεβάτια". Οι αλατισμένοι θόλοι είναι παχιοί σχηματισμοί που δημιουργούνται από τα αλατισμένα αποθέματα με την πάροδο του χρόνου, ο διαχωρισμός των μεταλλικών ενώσεων στο πάνω μέρος του σπηλαίου μέσω των ιζημάτων κάλυψης διαμορφώνει έναν μεγάλο θόλο. Μπορούν να είναι τόσο μεγάλοι όσο ένα μίλι στη διάμετρο, και τα 30.000 πόδια στο ύψος. Χαρακτηριστικά, οι αλατισμένοι θόλοι που χρησιμοποιούνται για τη φυσική αποθήκευση αερίου είναι μεταξύ 6.000 και 1.500 ποδιών κάτω από την επιφάνεια της γης, αν και σε ορισμένες περιπτώσεις μπορούν να έρθουν πολύ πιο κοντά στην επιφάνεια της. Τα αλατισμένα 'κρεβάτια' είναι πιο ρηχά, λεπτότεροι σχηματισμοί. Αυτοί οι σχηματισμοί είναι συνήθως μικρότεροι από 1.000 πόδια στο ύψος. Επειδή τα αλατισμένα 'κρεβάτια' είναι πλατείς, λεπτοί σχηματισμοί, για την διαμόρφωση τους σε δεξαμενή αποθήκευσης ΦΑ υπάρχουν αρκετά προβλήματα καθώς είναι περισσότερο επιρρεπείς σε επιδείνωση της φυσικής λειτουργίας τους ως αποθηκευτικοί χώροι ΦΑ και είναι ακριβότεροι σε σχέση με τους αλατισμένους θόλους.<sup>[3]</sup>

Μόλις ανακαλυφθεί ένας κατάλληλος αλατισμένος θόλος ή μια αλατισμένη μορφή "κρεβατιών", και κριθεί κατάλληλη για τη φυσική αποθήκευση αερίου, είναι απαραίτητο να αναπτυχθεί ένα σπήλαιο-δεξαμενή μέσα στο σχηματισμό. Ουσιαστικά, αυτό πραγματοποιείται από τη χρησιμοποίηση του ύδατος για να διαλύσει και να εξαγάγει ένα ορισμένο ποσό άλατος από το σπήλαιο, αφήνοντας έναν μεγάλο κενό χώρο στο σχηματισμό. Αυτό γίνεται με διάτρηση του σχηματισμού με έναν αγωγό στον οποίο διοχετεύουμε στο εσωτερικό του μεγάλες ποσότητες νερού

οι οποίες θα διαλύσουν μερικό από το άλας εντός του σπηλαίου, και με το πέρας της διαδικασίας το νερό θα ανακυκλωθεί αφήνοντας πίσω μεγάλο κενό χώρο έτοιμο να αποθηκεύσει ΦΑ . Αυτή η διαδικασία είναι γνωστή ως έκπλυση σπηλαίου άλατος.<sup>[3]</sup>

Η έκπλυση του σπηλαίου χρησιμοποιείται για να δημιουργήσει δεξαμενές αποθήκευσης και στους δύο τύπους αλατισμένων σπηλαίων, και μπορεί να είναι αρκετά ακριβή. Εντούτοις, μόλις ολοκληρωθεί η διαδικασία δημιουργείται ένας φυσικός υπόγειος χώρος αποθήκευσης αερίου με πολύ υψηλό ρυθμό παροχής του. Επιπλέον, οι απαιτήσεις αερίου ως "cushion gas" είναι οι χαμηλότερες εκ των τριών τύπων αποθήκευσης, με τα αλατισμένα σπήλαια να απαιτούν μόνο περίπου το 33% του συνολικού αερίου για να χρησιμοποιηθούν ως "cushion gas".<sup>[3]</sup>

Τα αλατισμένα σπήλαια είναι χαρακτηριστικά πολύ μικρότερα από τις δεξαμενές εξαντλημένων κοιτασμάτων αερίου και τα υδροφόρα στρώματα, στην πραγματικότητα υπόγεια αλατισμένα σπήλαια λαμβάνουν συνήθως μόνο το 1/100 της επιφάνειας που λαμβάνεται από μια δεξαμενή εξαντλημένου κοιτάσματος αερίου. Υπό αυτήν τη μορφή, τα αλατισμένα σπήλαια δεν μπορούν να αποθηκεύσουν όγκο αερίου ικανό να καλύψει τις απαιτήσεις αποθήκευσης φορτίου βάσης. Εντούτοις, ο ρυθμός παροχής ΦΑ από τα αλατισμένα σπήλαια είναι χαρακτηριστικά πολύ υψηλότερος απ' ό,τι των εξαντλημένων δεξαμενών και των δεξαμενών υδροφόρων στρωμάτων. Επομένως το φυσικό αέριο που αποθηκεύεται σε ένα αλατισμένο σπήλαιο μπορεί ευκολότερα (και γρήγορα) να αποσυρθεί, και τα σπήλαια μπορούν να γεμίσουν με φυσικό αέριο γρηγορότερα απ' ό,τι σε κάθε άλλο τύπο αποθήκευσης. Επιπλέον, τα αλατισμένα σπήλαια μπορούν εύκολα να εξαγάγουν αέριο σε ελάχιστο χρονικό διάστημα της τάξης μιας ώρας, το οποίο είναι χρήσιμο σε καταστάσεις έκτακτης ανάγκης ή κατά τη διάρκεια απροσδόκητων βραχυπρόθεσμων απαιτήσεων σε ΦΑ.<sup>[3]</sup>

### 2.1.5 Διανομή Φυσικού Αερίου

Η διανομή αποτελεί το τελικό βήμα για την παροχή φυσικού αερίου προς τους πελάτες. Ενώ ορισμένες μεγάλες βιομηχανικές, εμπορικές και παραγωγής ηλεκτρισμού εγκαταστάσεις λαμβάνουν φυσικό αέριο απευθείας από διακρατικούς αγωγούς μεγάλης χωρητικότητας, οι περισσότεροι άλλοι χρήστες λαμβάνουν το φυσικό αέριο από τις τοπικές εταιρίες διανομής (LDC). Οι LDC είναι εποπτευόμενοι οργανισμοί κοινής ωφελείας που εμπλέκονται στην παροχή φυσικού αερίου για τους καταναλωτές σε μια συγκεκριμένη γεωγραφική περιοχή. Υπάρχουν δυο βασικοί τύποι LDC: εκείνες που ανήκουν σε επενδυτές και τα δημόσια συστήματα που ανήκουν στο κράτος. Οι LDC μεταφέρουν συνήθως φυσικό αέριο από τα σημεία διανομής που βρίσκονται σε διακρατικούς αγωγούς προς τα νοικοκυριά και τις επιχειρήσεις, μέσα από χιλιάδες χιλιόμετρα σωλήνων διανομής μικρής διαμέτρου. Το σημείο παράδοσης, όπου το φυσικό αέριο μεταφέρεται από έναν αγωγό μεταφοράς σε αέριο τοπικής χρήσης ονομάζεται "city gate", και αποτελεί σημαντικό κέντρο αγοράς για την τιμολόγηση του φυσικού αερίου σε μεγάλες αστικές περιοχές.<sup>[3]</sup>



## Παράδοση Φυσικού Αερίου

Η παράδοση του φυσικού αερίου προς το σημείο της τελικής χρήσης από ένα βοηθητικό πρόγραμμα διανομής, μοιάζει με τη μεταφορά του που συζητήθηκε στο τμήμα μεταφορών. Ωστόσο, η διανομή περιλαμβάνει την μετακίνηση αερίου μικρότερου όγκου σε πολύ χαμηλότερες πιέσεις και μικρότερες αποστάσεις σε ένα μεγάλο αριθμό μεμονωμένων χρηστών. Οι σωλήνες μικρότερης διαμέτρου επίσης χρησιμοποιούνται για την μεταφορά από το "city gate" σε μεμονωμένους καταναλωτές. Το φυσικό αέριο περιοδικά συμπιέζεται για να εξασφαλιστεί η ροή στον αγωγό, αν και οι τοπικοί σταθμοί συμπίεσης είναι μικρότεροι από εκείνους που χρησιμοποιούνται για διακρατική μεταφορά.<sup>[3]</sup>

Λόγω των μικρότερων όγκων του φυσικού αερίου που πρόκειται να μετακινηθούν, όπως επίσης και σωλήνες μικρότερης διαμέτρου που χρησιμοποιούνται, η πίεση που απαιτείται για να κινηθεί το φυσικό αέριο μέσω του δικτύου διανομής είναι πολύ χαμηλότερη από εκείνη που βρέθηκε στους αγωγούς μεταφοράς. Μολονότι το φυσικό αέριο που ταξιδεύει μέσω διακρατικών αγωγών μπορεί να συμπιεστεί όσο 1500psi, το φυσικό αέριο που διέρχεται από το δίκτυο διανομής απαιτεί μόλις 3psi της πίεσης και είναι ακόμη χαμηλότερη στο 1/4psi στο μετρητή του καταναλωτή. Το φυσικό αέριο που θα διανεμηθεί, τυπικά αποσυμπιέζεται κοντά στο "city gate", καθώς και καθαρίζεται και φιλτράρεται (αν και έχει ήδη υποβληθεί σε επεξεργασία πριν από την διανομή μέσω των διακρατικών αγωγών), για να εξασφαλιστεί μικρή περιεκτικότητα σε υγρασία και σωματίδια. Επιπλέον, μερκαπτάνη-η πηγή της μυρωδιάς σάπιου αυγού-προστίθεται από το βοηθητικό πρόγραμμα πριν από την διανομή. Η μερκαπτάνη προστίθεται επειδή το φυσικό αέριο είναι άοσμο και άχρωμο, και η γνωστή μυρωδιάς της καθιστά την ανίχνευση διαρροών πολύ ευκολότερη. Παραδοσιακά άκαμπτοι σωλήνες διαρροών χάλυβα χρησιμοποιούνται για την κατασκευή των δικτύων διανομής. Ωστόσο, η νέα τεχνολογία επιτρέπει τη χρήση εύκαμπτου πλαστικού και κυματοειδούς σωλήνα από ανοξείδωτο χάλυβα, σε αντικατάσταση άκαμπτου σωλήνα χάλυβα.<sup>[3]</sup>

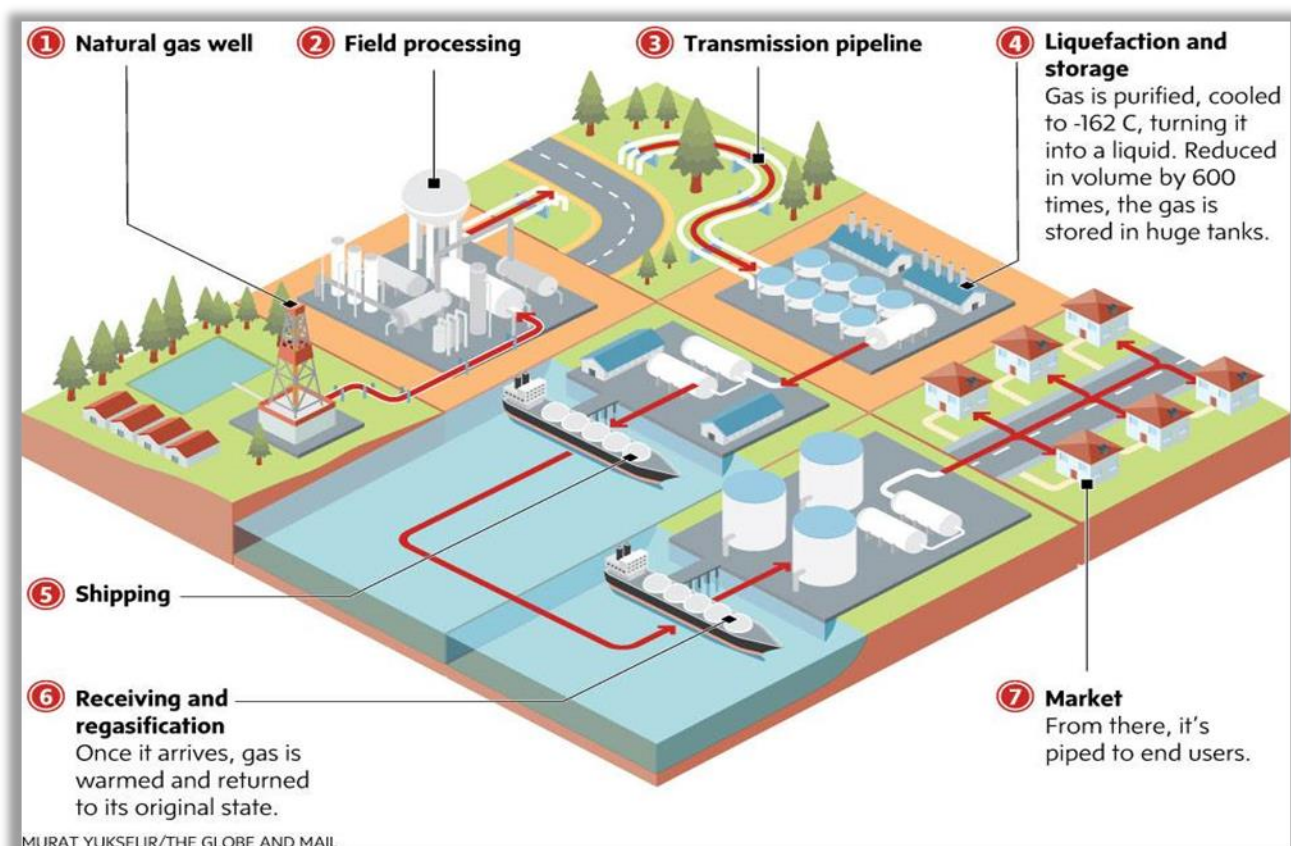
Αυτές οι νέες μορφές σωλήνων επιτρέπουν την μείωση του κόστους, ευελιξία στην εγκατάσταση και εύκολες επισκευές τόσο για τις τοπικές εταιρείες διανομής όσο και για τους καταναλωτές φυσικού αερίου. Μια άλλη καινοτομία στη διανομή του φυσικού αερίου είναι η χρήση των ηλεκτρομετρικών συστημάτων ανάγνωσης.<sup>[3]</sup>

Το φυσικό αέριο που καταναλώνεται από οποιονδήποτε πελάτη, μετριέται από επιτόπιους μετρητές, οι οποίοι ουσιαστικά παρακολουθούν την ποσότητα του φυσικού αερίου καταναλώνεται στη θέση αυτή. Η εγκατάσταση των αγωγών διανομής φυσικού αερίου απαιτεί την ίδια διαδικασία όπως και για μεγαλύτερους αγωγούς: την εκσκαφή τάφρων εντός των οποίων ο σωλήνας θα θαφτεί. Όμως οι νέες τεχνικές ορυγμάτων επιτρέπουν την εγκατάσταση των αγωγών με μικρότερες επιπτώσεις για το έδαφος της περιοχής. Καθοδηγούμενα συστήματα γεώτρησης χρησιμοποιούνται για να διανοίξουν μια υπόγεια τρύπα στην οποία εισάγεται ο σωλήνας και μπορεί να οδηγήσει σε σημαντικές ανασκαφές και αποκατάσταση των αποταμιεύσεων.<sup>[3]</sup>

Συστήματα SCADA, παρόμοια με αυτά που χρησιμοποιούνται από μεγάλες εταιρείες αγωγών, χρησιμοποιούνται από τις εταιρείες τοπικής διανομής. Τα συστήματα αυτά μπορούν ενσωματώσουν τον έλεγχο της ροής του φυσικού αερίου και την μέτρηση με άλλα συστήματα λογιστικής, χρέωσης

και σύμβασης για την παροχή ενός ολοκληρωμένου συστήματος μέτρησης και ελέγχου για τα τοπικά δίκτυα. Αυτό επιτρέπει την ακριβή, έγκαιρη πληροφόρηση σχετικά με την κατάσταση του δικτύου διανομής που θα χρησιμοποιηθεί από το βοηθητικό πρόγραμμα, για να εξασφαλιστεί η αποδοτική και αποτελεσματική εξυπηρέτηση ανά πάσα στιγμή.<sup>[3]</sup>

## 2.2 Θαλάσσια μεταφορά Υγροποιημένου Φυσικού Αερίου-LNG με δεξαμενόπλοια



Σχήμα 2-14: Στάδια μεταφοράς υγροποιημένου φυσικού αερίου  
(Πηγή: [www.theglobeandmail.com/report-on-business/breakthrough/how-the-liquefied-natural-gas-works/article13261693/](http://www.theglobeandmail.com/report-on-business/breakthrough/how-the-liquefied-natural-gas-works/article13261693/))<sup>[13]</sup>

Ο κύριος λόγος για την υγροποίηση του φυσικού αερίου είναι η κατά 600 φορές μείωση του όγκου λόγω της αλλαγής φάσης. Στη φυσικά επικρατούσα αέρια φάση, το φυσικό αέριο είναι μια ογκώδης πηγή ενέργειας, η οποία είναι μερικές φορές δύσκολη στο χειρισμό. Η αποθήκευση του αερίου απαιτεί τεράστια σπήλαια ή μεγάλες συμπτυσσόμενες δεξαμενές αποθήκευσης. Η μεταφορά του φυσικού αερίου από τις πηγές παραγωγής στα σημεία κατανάλωσης απαιτεί μεγάλα δίκτυα αγωγών. Κατά συνέπεια, μπορούν να εξεταστούν μόνο χερσαίες ή σχετικά μικρές υποθαλάσσιες διαδρομές. Τέλος, το φυσικό αέριο σε ατμοσφαιρική πίεση είναι πάρα πολύ ογκώδες για να θεωρηθεί ως καύσιμο για λόγους μεταφορών και πρέπει, κατ' ελάχιστον, να συμπιεστεί.<sup>[1]</sup>

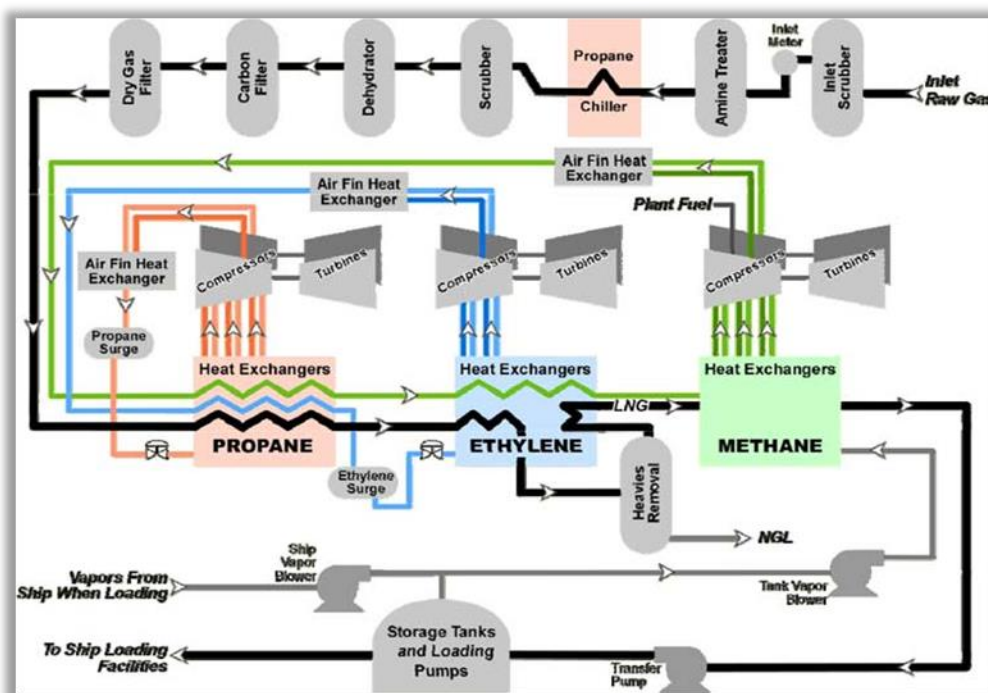
Η υγροποίηση του φυσικού αερίου χρησιμοποιείται για να υπερνικήσει αυτά τα εμπόδια, και επιτρέπει την μεταφορά του σε μεγαλύτερες αποστάσεις και εφαρμογή του υγροποιημένου φυσικού

αερίου ως καύσιμο. Η αποθήκευση του LNG κοντά σε αστικές περιοχές επιτρέπει την κάλυψη των αναγκών αιχμής σε φυσικό αέριο χωρίς να απαιτηθεί η κατασκευή πρόσθετων αγωγών που τις περισσότερες φορές θα ήταν υποχρησιμοποιημένες. [1]

## 2.2.1 Παραγωγή υγροποιημένου φυσικού αερίου-LNG

Λόγω της υψηλής πίεσης του μεθανίου το LNG παράγεται οικονομικά με ψύξη και όχι με συμπίεση. Κοινή για όλες τις διεργασίες υγροποίησης φυσικού αερίου είναι η ανάγκη για προ κατεργασία του αερίου για την αφαίρεση των συστατικών που είτε θα πάγωναν –εμποδίζοντας έτσι τη ροή της διεργασίας– είτε να προκαλέσουν ρύπανση κατά την καύση του εξατμισμένου LNG. [1]

### Διαδικασίες Υγροποίησης Βάσης Φόρτωσης.



Σχήμα 2-15: Διαδικασία υγροποίησης του Φυσικού Αερίου  
(Πηγή: [www.laohamutuk.org/Oil/LNG/chap3.htm](http://www.laohamutuk.org/Oil/LNG/chap3.htm)) [14]

Η υγροποίηση φυσικού αερίου σε βάση φόρτωσης μεγάλου μεγέθους πραγματοποιείται με έμφαση στην απόδοση της διεργασίας. Η κλίμακα των λειτουργιών σημαίνει ότι η παραγωγή με την πιο μικρή εγκατεστημένη δυναμικότητα και την πιο μικρή κατανάλωση καυσίμων είναι η οικονομικά συμφέρουσα. Επειδή η θερμότητα που πρέπει να αφαιρεθεί από το φυσικό αέριο για να το ψύξει σε -160 βαθμούς Κελσίου απορρίπτεται τελικά στον αέρα ή το νερό, έχουν αναπτυχθεί αρκετά περίπλοκα συστήματα: [1]

## **Διεργασίες Ψύξης σε Σειρά**

Οι πρώτες διεργασίες υγροποίησης φυσικού αερίου χρησιμοποιούσαν συστοιχίες απλών ψυκτικών μονάδων σε σειρά. Κάθε ψυκτικό χρησιμοποιείται σε ξεχωριστό ψυκτικό κύκλο που παρέχει ψύξη σε συγκεκριμένες θερμοκρασιακές περιοχές. Τυπικά, χρησιμοποιούνται προπάνιο, αιθυλένιο και μεθάνιο για να παρέχουν μια ευρεία, ισορροπημένη σειρά ψύξης. Μετά από τη συμπίεση, τρία επίπεδα θερμοκρασιών για καθένα από τα τρία ψυκτικά διαμορφώνουν μια ακολουθία εννέα βαθμίδων. Κάθε ένα από τα επίπεδα θερμοκρασίας αντιστοιχεί σε μια προκαθορισμένη ελάττωση πίεσης (στα δοχεία διαχωρισμού) για την εξάτμιση του ψυκτικού σε εναλλαγή θερμότητας με την τροφοδοσία φυσικού αερίου και ένα ξεχωριστό ρεύμα ψυκτικού που απαιτεί ψύξη. Με αυτόν τον τρόπο, αφαιρείται θερμότητα από το φυσικό αέριο σε διαδοχικά χαμηλότερες θερμοκρασίες δηλαδή, το ψυκτικό βράζει σε διαδοχικά χαμηλότερη θερμοκρασία. Η θερμότητα απορρίπτεται στον αέρα ή σε νερό μέσω του θερμότερου ψυκτικού, συνήθως προπανίου και των μεταψυκτών των συμπιεστών. Ο κύκλος ψύξης του μεθανίου είναι ανοικτός δεδομένου ότι συνδυάζεται με την τροφοδοσία φυσικού αερίου και μετά από το τελικό στάδιο ελάττωσης πίεσης το υγρό μεθάνιο αποτελεί μέρος του παραγόμενου LNG. Οι διεργασίες μπόρεσαν να γίνουν πολύ αποδοτικές με την αύξηση τόσο του αριθμού των ψυκτικών ουσιών που χρησιμοποιήθηκαν όσο και των βαλβίδων εξάτμισης κάθε ψυκτικού. Όμως, αυτή η βελτίωση στην απόδοση, εντούτοις, είχε αυξημένες οικονομικές συνέπειες. Κάθε ψυκτικό απαιτεί συμπιεστή, μηχανισμό κίνησης, δοχεία, και εναλλάκτες θερμότητας, μαζί με τις απαραίτητες σωληνώσεις, μόνωση και συστήματα ελέγχου. Κάθε πρόσθετο στάδιο εξάτμισης προσθέτει τον αριθμό των εναλλακτών θερμότητας και δοχείων και στον αριθμό των παράπλευρων ρευμάτων που εισάγονται στο συμπιεστή. <sup>[1]</sup>

## **Διεργασίες με Μείγμα Ψυκτικών**

Το πρόβλημα του σύνθετου σχεδιασμού, το σχετικά υψηλό κόστος επένδυσης και οι περιορισμοί στα ενδιάμεσα στάδια της διεργασίας υγροποίησης σε σειρά αντιμετωπίζονται με τις διεργασίες υγροποίησης με μίγμα ψυκτικών. Με την εξέλιξη του εξοπλισμού και των συστημάτων ελέγχου έγινε δυνατός ο συνδυασμός ψυκτικών σε έναν ψυκτικό κύκλο. <sup>[1]</sup>

Σε τέτοιες διεργασίες, γίνεται συνδυασμός ψυκτικών όπως πεντάνιο, βουτάνιο, προπάνιο, αιθάνιο, μεθάνιο και άζωτο σε αναλογίες κατάλληλες για την καμπύλη ψύξης, του προς υγροποίηση φυσικού αερίου που υγροποιείται, δηλαδή η καμπύλη θερμοκρασίας – ενθαλπίας θέρμανσης του μίγματος ψυκτικών να ακολουθεί πολύ κοντά την καμπύλη ψύξης του φυσικού αερίου.

Αυτό μειώνει την αναντιστρεπτότητα της διεργασίας. Το μίγμα ψυκτικών συμπυκνώνεται έπειτα, κατά μέρος με αέρα ή νερό και το υπόλοιπο σε χαμηλότερη θερμοκρασία με εναλλαγή θερμότητας με το ίδιο το μίγμα. Στην τελευταία περίπτωση, το εισερχόμενο αέριο ψυκτικό ψύχεται και συμπυκνώνεται σε ανυψωμένη πίεση κατ' αντιρροή με την εξατμιζόμενη υγρή φάση του μίγματος ψυκτικών, καθένα από τα οποία εκτονώνεται σε μια πολύ χαμηλότερη πίεση και, ως εκ τούτου, και θερμοκρασία. <sup>[1]</sup>

Η διεργασία με μίγμα ψυκτικών έχει αποδώσει καλά σε διάφορες εγκαταστάσεις και αντιπροσωπεύει μια απλοποίηση έναντι της διαδικασίας υγροποίησης σε σειρά. Εντούτοις, δεν είναι θερμοδυναμικά αρκετά αποδοτική ώστε να είναι οικονομική σε σχέση με τις αυξανόμενες τιμές ενέργειας. Για να ανταποκριθεί στην καμπύλη ψύξης του φυσικού αερίου τροφοδοσίας σε ένα ευρύ φάσμα, από τη θερμοκρασία του νερού ψύξης ή του αέρα, ως τη θερμοκρασία υγροποίησης, είναι απαραίτητοι συμβιβασμοί ως προς τη σύνθεση του μίγματος ψυκτικών. Το ευρύ φάσμα των σημείων βρασμού για τα συστατικά του μίγματος ψυκτικών σημαίνει επίσης ότι μερικά από τα βαρύτερα συστατικά συμπιέζονται σε υψηλότερες πιέσεις από τις πραγματικά απαιτούμενες για τη συμπύκνωσή τους για να εξασφαλιστεί συμπύκνωση των ελαφρύτερων, χαμηλότερων σημείων βρασμού συστατικών όπως το άζωτο και το μεθάνιο. Μια τέτοια ρήτρα ανασυμπίεσης δεν μπορεί να αποφευχθεί χωρίς έναν σημαντικό διαχωρισμό τμημάτων των ψυκτικών όπως εμφανίζεται σε διεργασίες ψύξης με μίγμα ψυκτικών με προκαταρκτική ψύξη.<sup>[1]</sup>

### **Διεργασίες με Μείγμα Ψυκτικών και Προκαταρκτική Ψύξη**

Στις αρχές της δεκαετίας του '70, αναπτύχθηκε μια τρίτη γενιά διεργασιών, με μίγμα ψυκτικών και προκαταρκτική ψύξη, από τον άμεσο συνδυασμό των άλλων δυο. Η ευρύτατα χρησιμοποιούμενη διεργασία χρησιμοποιεί δυο χωριστά συστήματα ψύξης, έναν κύκλο ψύξης με προπάνιο σε σειρά, ακολουθούμενη από έναν κύκλο με μίγμα ψυκτικών που περιλαμβάνει προπάνιο, αιθάνιο, μεθάνιο και άζωτο ως συστατικά. Ο κύκλος προπανίου προψύχει το φυσικό αέριο και χρησιμεύει ως ενδιάμεσο ψυκτικό για την απόρριψη θερμότητας από το τμήμα με το μίγμα ψυκτικών ουσιών προς τον αέρα ή το νερό ψύξης. Το τμήμα ψύξης με προπάνιο μπορεί να κατασκευαστεί από κοινό χάλυβα χαμηλότερου κόστους, ενώ τα τμήματα χαμηλότερης θερμοκρασίας απαιτούν χάλυβες αργιλίου ή νικελίου. Κατά συνέπεια, το σπάσιμο της διεργασίας ψύξης στο στάδιο του προπανίου είναι συμβατό με την επιλογή οικονομικών υλικών. Τέλος, με τη μείωση του εύρους της ψύξης που πρέπει να επιτευχθεί από το μίγμα ψυκτικών ουσιών, μπορεί να βελτιστοποιηθεί η σύνθεσή του και να μειωθούν σημαντικά οι ενεργειακές απώλειες λόγω ανασυμπίεσης.<sup>[1]</sup>

Έχουν αναπτυχθεί πρόσθετα σχήματα διεργασιών που εμπίπτουν στην κατηγορία των διεργασιών με μίγματα ψυκτικών και προκαταρκτική ψύξη. Εάν προστεθεί αιθάνιο στο ψυκτικό της προκαταρκτικής ψύξης για να σχηματιστεί μια διεργασία διπλού μίγματος ψυκτικών, η θερμοκρασία προκαταρκτικής ψύξης μπορεί να μειωθεί σύμφωνα με τους όρους λειτουργίας του κύκλου και το ποσοστό του προστιθέμενου αιθανίου. Με αυτήν την διαδικασία το ψυκτικό φορτίο μπορεί να μετατοπιστεί μεταξύ των δυο κύκλων ψύξης – μια δυνατότητα που να είναι χρήσιμη στην αντιμετώπιση αλλαγών στο αέριο τροφοδοσίας ή αλλαγών στη διαθεσιμότητα ισχύος. Η αλλαγή στη διαθεσιμότητα ισχύος μπορεί να εμφανιστεί λόγω των αλλαγών της θερμοκρασίας περιβάλλοντος που έχουν επιπτώσεις στην παραγόμενη ισχύ των αεριοστρόβιλων. Η λειτουργία ενός δυαδικού μίγματος ψυκτικών για προκαταρκτική ψύξη είναι πιο περίπλοκη επειδή δεν είναι πλέον επαρκής ο απλός έλεγχος πίεσης, αλλά μπορεί να προτιμηθεί σε συγκεκριμένες περιπτώσεις.<sup>[1]</sup>

Μια άλλη διαδικασία με προκαταρκτική ψύξη έχει προταθεί για εγκαταστάσεις που χρησιμοποιούν αεριοστρόβιλους στο τμήμα με μίγμα ψυκτικών. Σε αυτήν την διαμόρφωση, η αποβαλλόμενη θερμότητα των αεριοστρόβιλων χρησιμοποιείται για να διαχωρίσει αμμωνία και νερό σε έναν ψύκτη απορρόφησης αμμωνίας. Αυτό το σύστημα θα μπορούσε να αναλάβει το

φορτίο της προκαταρκτικής ψύξης εξαλείφοντας την ανάγκη για δαπανηρούς συμπιεστές και μηχανισμούς κίνησης. Κανένα από αυτά δυο συστήματα δεν έχει εφαρμοστεί σε μια λειτουργική εγκατάσταση. <sup>[1]</sup>

## 2.2.2 Αποθήκευση υγροποιημένου φυσικού αερίου-LNG

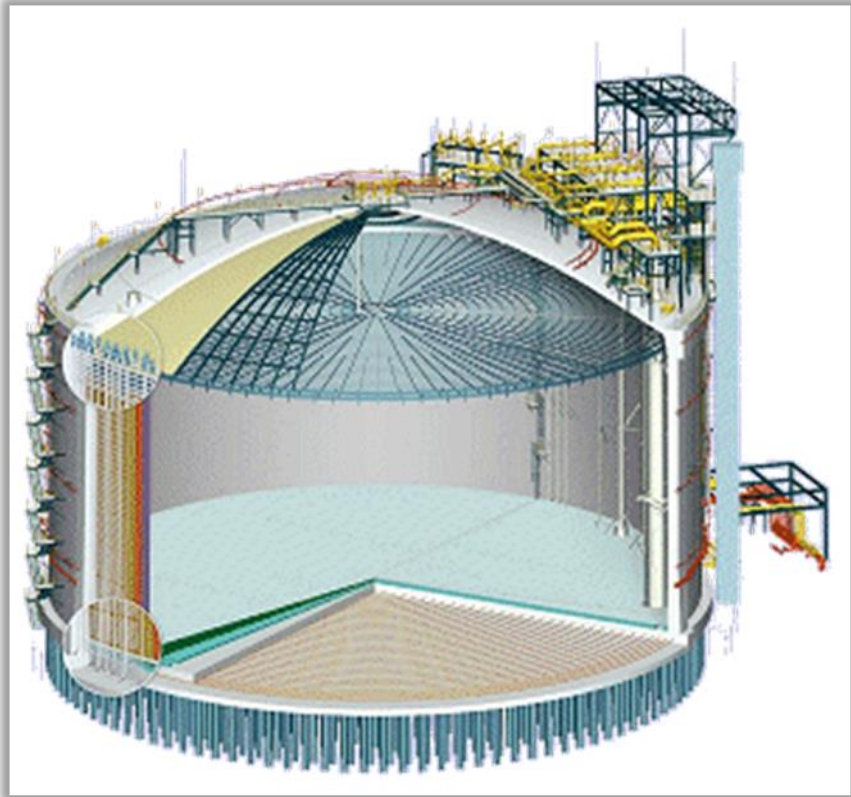
Οι δεξαμενές αποθήκευσης LNG είναι ένα σημαντικό μέρος και για τις εγκαταστάσεις βασικού φορτίου και για τις εγκαταστάσεις αναγκών αιχμής. Επιπλέον, αποτελούν σημαντικό μέρος της επένδυσης των τερματικών εγκαταστάσεων παραλαβής LNG. Λόγω του υψηλού κόστους αυτών των μονάδων και σπουδαιότητας τους στη συνολική ασφάλεια των εγκαταστάσεων LNG, έχει δοθεί μεγάλη προσοχή στο σχεδιασμό των δεξαμενών LNG. <sup>[1]</sup>

Ένα από τα πρώτα θέματα που τέθηκαν στο σχεδιασμό των δεξαμενών LNG ήταν στην επιλογή των κατάλληλων υλικών. Μεγάλης κλίμακας προγράμματα έχουν αποδείξει την

καταλληλότητα του χάλυβα με 9% νικέλιο, των ανοξείδωτων χαλύβων, και ορισμένων κραμάτων αργιλίου (σειρά 5000) για κατασκευή δεξαμενών LNG. Οι δεξαμενές από κράματα αργιλίου είναι συνήθως περιορισμένου μεγέθους, επειδή ο συντελεστής θερμικής διαστολής του αργιλίου είναι περίπου διπλάσιος αυτού του χάλυβα. Σε μεγάλες δεξαμενές, τέτοια θερμική μετακίνηση κατά τη διάρκεια της ψύξης θα μπορούσε να οδηγήσει σε αστοχία των δεξαμενών. <sup>[1]</sup>

Τα σχέδια των δεξαμενών έχουν εξελιχθεί επίσης δεδομένου ότι έχουν εφαρμοστεί περισσότερο περίπλοκες αναλύσεις δεδομένων ασφαλείας στις εγκαταστάσεις LNG. Οι αρχικοί σχεδιασμοί προέβλεπαν μια εσωτερική κρυογενική δεξαμενή υγρού που εντός μιας εξωτερικής δεξαμενής που περιείχε το σύστημα μόνωσης για την εσωτερική. Σε μερικά σχέδια η εξωτερική δεξαμενή παρείχε αέριο άζωτο που, με τη σειρά της, ήταν συνδεδεμένη με μια δεξαμενή μεταβλητού όγκου ή με μεμβράνες, η οποία αντιστάθμιζε τις αλλαγές στον όγκο του αζώτου λόγω των αλλαγών στη θερμοκρασία περιβάλλοντος αποφεύγοντας συμπίεση ή αποσυμπίεση της εξωτερικής δεξαμενής. <sup>[1]</sup>

Σε άλλα σχέδια, η στέγη της εσωτερικής δεν ήταν στεγανή, αλλά μερικώς υποστρωμένη μόνωση και η εξωτερική δεξαμενή χρησίμευε ως μια αποθήκη φυσικού αερίου. Και στα δυο σχέδια, οι



Σχήμα 2-16: Δεξαμενή αποθήκευσης LNG  
(Πηγή: [www.lusas.com/case/civil/lng\\_tank\\_design.html](http://www.lusas.com/case/civil/lng_tank_design.html)) <sup>[15]</sup>

εξωτερικές δεξαμενές κατασκευάζονταν από κοινό χάλυβα άνθρακα και περιβαλλόταν από ένα χαμηλό ανάχωμα για να συγκρατήσει τις όποιες διαρροές LNG. <sup>[1]</sup>

Αναλυτικές μελέτες έδειξαν ότι ο πρωτεύον κίνδυνος ασφαλείας με μια διαρροή LNG είναι ο σχηματισμός ενός μεγάλου νέφους ατμών του προϊόντος που μπορεί να παρασυρθεί, αναφλεγεί και να προκαλέσει εκτεταμένη ζημιά. Τα επόμενα σχέδια ενσωμάτωσαν υλικά εξωτερικής δεξαμενής λιγότερη επιρρεπή σε αστοχία από τις κρουγονικές θερμοκρασίες και υψηλότερα αναχώματα που χτίστηκαν πιο κοντά σε δεξαμενές. <sup>[1]</sup>

Επιπρόσθετες μελέτες περιλαμβάνουν δεξαμενισμό διπλής ακεραιότητας δηλαδή, μια διαρροή υγρού από μια αστοχία της εσωτερικής δεξαμενής παραλαμβάνεται από μια δεύτερη ομόκεντρη δεξαμενή που είναι δομικά ανεξάρτητη από την πρώτη. <sup>[1]</sup>

Οι εξωτερικές δεξαμενές κατασκευάζονται από οπλισμένο σκυρόδεμα με περίβλημα από ανοξείδωτο χάλυβα. Τέλος, κατασκευάζονται αναχώματα ύψους όσο και η δεξαμενή για να προστατεύσουν τη δεξαμενή από εξωτερική ζημιά και για να βοηθήσουν στην υποθετική ασύμμετρη φόρτιση της εξωτερικής δεξαμενής ως αποτέλεσμα καταστροφικής αστοχίας της εσωτερικής δεξαμενής. Όπου η περιοχή είναι πάρα πολύ μικρή για να επιτρέψει την πλήρη ανάπτυξη των αναχωμάτων, χρησιμοποιείται είτε κατασκευή δεξαμενής μέσα στο έδαφος, ή η πρόσθετη ενίσχυση της εξωτερικής. <sup>[1]</sup>

### 2.2.3 Μεταφορά υγροποιημένου φυσικού αερίου-LNG

Το κρουγονικό LNG μεταφέρεται με δεξαμενόπλοια LNG σε ατμοσφαιρική πίεση. Τα δεξαμενόπλοια αυτά είναι διπλού κύτους που έχουν σχεδιαστεί ειδικά για να χειρίζονται την χαμηλή θερμοκρασία του υγροποιημένου φυσικού αερίου. Είναι μονωμένα για να περιορίζουν την απώλεια υγροποιημένου αερίου λόγω εξάτμισής του. <sup>[1]</sup>

Αυτές οι απώλειες εξάτμισης χρησιμοποιούνται για τη συμπλήρωση των καυσίμων των πλοίων. Σύμφωνα με το World Gas Intelligence (2008), σε ένα τυπικό ταξίδι, εκτιμάται ότι περίπου το 0,1% - 0,25% του φορτίου LNG εξατμίζεται κάθε μέρα, ανάλογα με την αποτελεσματικότητα της μόνωσης και την τραχύτητα του ταξιδιού. <sup>[1]</sup>

Τα LNG πλοία διακρίνονται στις κάτωθι βασικές κατηγορίες:  
Ανεξαρτήτων δεξαμενών (independent tank systems)

- Σφαιρικές δεξαμενές (Moss Rosenberg)
- Πρισματικές IHI SPB (Self Supporting Prismatic IMO Type B)

Μεμβράνης (Membrane systems)

- Gas Transport(GT No.96)



Σχήμα 2-17: Δεξαμενόπλοιο μεταφοράς LNG <sup>[1]</sup>

- Technigaz Mark III
- CS1

Οι διάφορες τεχνολογικές βελτιώσεις στην κατασκευή LNG πλοίων οδήγησαν στην εφαρμογή των πρισματικών δεξαμενών μεμβράνης, οι οποίες κατασκευάζονται από ατσάλι και συνιστούν μια ομοιόμορφη πίεση και λιγότερες απώλειες φορτίου ενώ λιγότεροι είναι και οι περιορισμοί στην ποσότητα του φορτίου που μεταφέρεται. <sup>[1]</sup>

Οι σφαιρικές δεξαμενές είναι αυτο-υποστηριζόμενες και δεν είναι αναπόσπαστες με την καρίνα του πλοίου αλλά υποστηρίζονται από ειδική κυλινδρική κατασκευή. Η χρήση του αλουμινίου, ενός υλικού με μεγάλη ελαστικότητα καθώς και το σφαιρικό σχήμα των δεξαμενών συνιστούν μεγαλύτερη σταθερότητα και δεν υπάρχουν περιορισμοί στο φορτίο. Οι τεχνολογικές εξελίξεις στην ναυπήγηση των LNG πλοίων αφορούν κυρίως τα συστήματα των δεξαμενών που φυλάσσεται το φορτίο, στην διαδικασία επαναυγροποίησης πάνω στο πλοίο και τις εναλλακτικές μονάδες πρόωσης. <sup>[1]</sup>

Με την χρήση κατάλληλων αγωγών, η επαναεριοποίηση μπορεί να γίνει πάνω στο πλοίο και εκτός λιμένα, δηλαδή στην θάλασσα. Τα πλοία που έχουν τέτοια συστήματα είναι γνωστά και ως RLNGs. Η διαφορά τους με τα LNG πλοία έγκειται στον χώρο υποδοχής του φορτίου καθώς η ύπαρξη τέτοιων συστημάτων επιφέρει περιορισμούς στην ποσότητα του μεταφερόμενου φορτίου. <sup>[1]</sup>

## 2.2.4 Επαναεριοποίηση υγροποιημένου φυσικού αερίου-LNG

Οι τερματικοί σταθμοί επαναεριοποίησης είναι ο τελικός προορισμός των LNG πλοίων. Εκεί είναι όπου το υγροποιημένο προϊόν επιστρέφει στην αέρια κατάσταση και τροφοδοτείται σε δίκτυα μεταφοράς και διανομής. Το υγροποιημένο φυσικό αέριο προσφέρει ευελιξία στο ότι μπορεί να αποφύγει οικονομικά, γεωγραφικά και γεωπολιτικά εμπόδια, τα οποία ένας αγωγός μπορεί να συναντήσει. <sup>[1]</sup>



Σχήμα 2-19: Μονάδα επαναεριοποίησης LNG <sup>[1]</sup>

Τα τρία βήματα από τα LNG tankers στο δίκτυο διανομής είναι:

- Το υγροποιημένο φυσικό αέριο παραλήφθηκε και ξεφορτώθηκε από τα LNG tankers σε δεξαμενές αποθήκευσης κρυογονικής κατάστασης, δυναμικότητας από 100.000 έως 160.000 κυβικά μέτρα. Αυτές διατηρούν το αέριο σε υγρή κατάσταση στους -163 βαθμούς κελσίου. <sup>[1]</sup>

- Η επαναεριοποίηση περιλαμβάνει σταδιακή αύξηση της θερμοκρασίας του υγροποιημένου φυσικού αερίου, μέχρι η άνοδος της θερμοκρασίας να είναι πάνω από τους 0 βαθμούς κελσίου. Η διαδικασία λαμβάνει χώρα σε υψηλή πίεση (60 έως 100 bar), μέσα από μια σειρά από εναλλάκτες θερμότητας τύπου "seawater trickle-type", την πιο αποδοτική ενεργειακά τεχνική, όταν η σωστή ποιότητα νερού είναι διαθέσιμη. Σε διαφορετική περίπτωση ένα μέρος του αερίου καίγεται για να παρέχει θερμότητα. <sup>[1]</sup>

- Στην πορεία έξω από τον τερματικό σταθμό, το αέριο υποβάλλεται σε επεξεργασία, όπως απαιτείται για να συμμορφώνεται με τις προδιαγραφές και τις απαιτήσεις του τελικού χρήστη. <sup>[1]</sup>

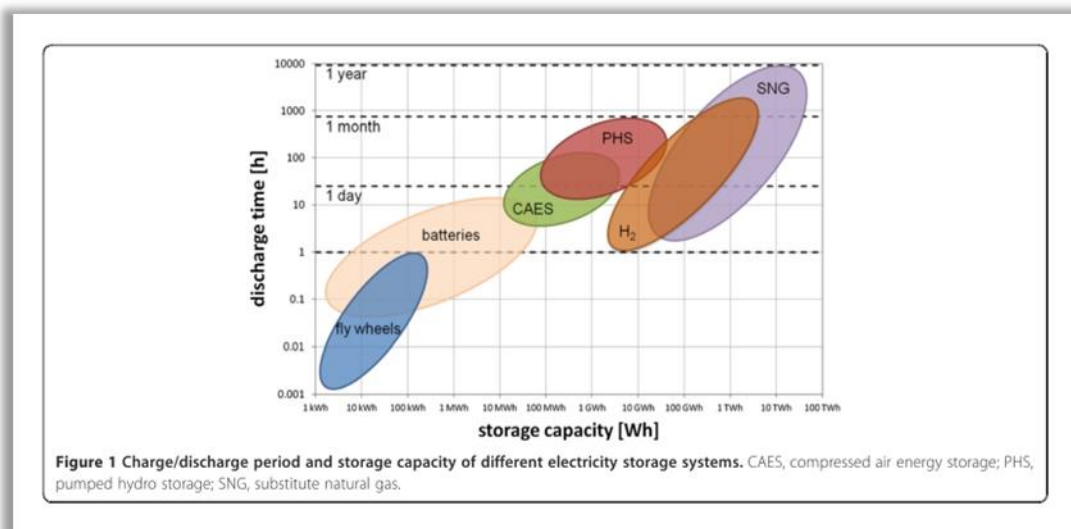


## Κεφάλαιο 3. Παραγωγή Υποκατάστατου Φυσικού Αερίου (Substitute Natural Gas)

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 (base load) 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. (Πηγή:<http://www.energysustainsoc.com/content/pdf/s13705-014-0029-1.pdf>)<sup>[17]</sup>

Υπάρχουν πολλές δυνατότητες αποθήκευσης αυτής της ενέργειας. Μια απευθείας αποθήκευση αυτής της ηλεκτρικής ενέργειας μπορεί να επιτευχθεί με υπερ-πυκνωτές και υπερ-αγωγίμο σύστημα αποθήκευσης μαγνητικής ενέργειας (superconducting magnetic energy storage SMES). Με τη χρήση σταθμού αποθήκευσης με χρήση αντλίας, η ηλεκτρική ενέργεια μετατρέπεται σε ενέργεια με δυνατότητες περαιτέρω χρήσης. Δεξαμενές πεπιεσμένου αέρα ή συστήματα αποθήκευσης ενέργειας με μαγνητικά βολάν τροποποιούν την ηλεκτρική ενέργεια σε μηχανική, ενώ μπαταρίες καθιστούν δυνατή την αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας με τη μορφή χημικής ενέργειας, η οποία κατά ένα ηλεκτροχημικό τρόπο μπορεί να μετατραπεί ξανά σε ηλεκτρική. Επιπλέον η ηλεκτρική ενέργεια μπορεί να μετατραπεί σε χημική μεταφέροντας τη σε καύσιμα όπως υδρογόνο, υποκατάστατο συνθετικό καύσιμο, ή μεθανόλη.<sup>[17]</sup>

Μια σύγκριση των τεχνολογιών αποθήκευσης που περιεγράφηκαν παραπάνω όσον αφορά την χωρητικότητα αποθήκευσης και των χαρακτηριστικών στιγμών φόρτισης/αποφόρτισης φαίνεται στο Σχήμα 3-01.



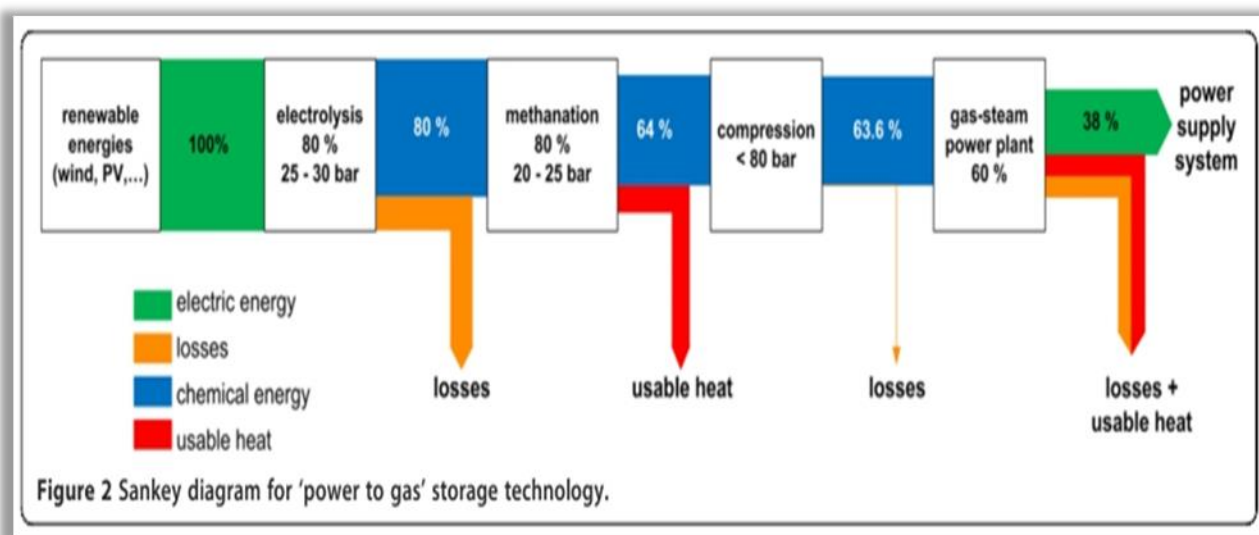
Σχήμα 3-01: Περίοδοι φόρτισης/αποφόρτισης διάφορων συστημάτων αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας (Πηγή: <http://www.energysustainsoc.com/content/pdf/s13705-014-0029-1.pdf>)<sup>[17]</sup>

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.<sup>[17]</sup>

Ξεχωριστά από την υψηλή χωρητικότητα και τους κύκλους φόρτισης/αποφόρτισης η αποτελεσματικότητα της διαδικασίας είναι ένα άλλο σημαντικό χαρακτηριστικό. Το Σχήμα 3-02 παρουσιάζει τις απώλειες χρήσης αποθήκευσης σχεδόν ανεξάρτητης του χρόνου.<sup>[17]</sup>

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%. Σε αυτό το σημείο να αναφέρουμε ότι ένα υψηλά εξελιγμένο δίκτυο φυσικού αερίου όπως στη Γερμανία για παράδειγμα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την μεταφορά περίσσειας ενέργειας. Το γερμανικό δίκτυο μεταφοράς φυσικού αερίου προσφέρει μεγάλη δυνατότητα αποθήκευσης λαμβάνοντας υπόψη την υψηλή ενεργειακή πυκνότητα του συμπιεσμένου μεθανίου. Επιπρόσθετα το δίκτυο φυσικού αερίου επιτρέπει την σχεδόν ανεξάρτητη του χρόνου αποθήκευση. Το δίκτυο φυσικού αερίου ως εκ τούτου, ταιριάζει απόλυτα στην εξισορρόπηση των κυκλοφοριακών συμφορήσεων στο ηλεκτρικό δίκτυο που προκαλείται από την παραγωγή περίσσειας ενέργειας στο βόρειο τμήμα της Γερμανίας και των αυξημένων ενεργειακών απαιτήσεων στη νότια Γερμανία.<sup>[17]</sup>



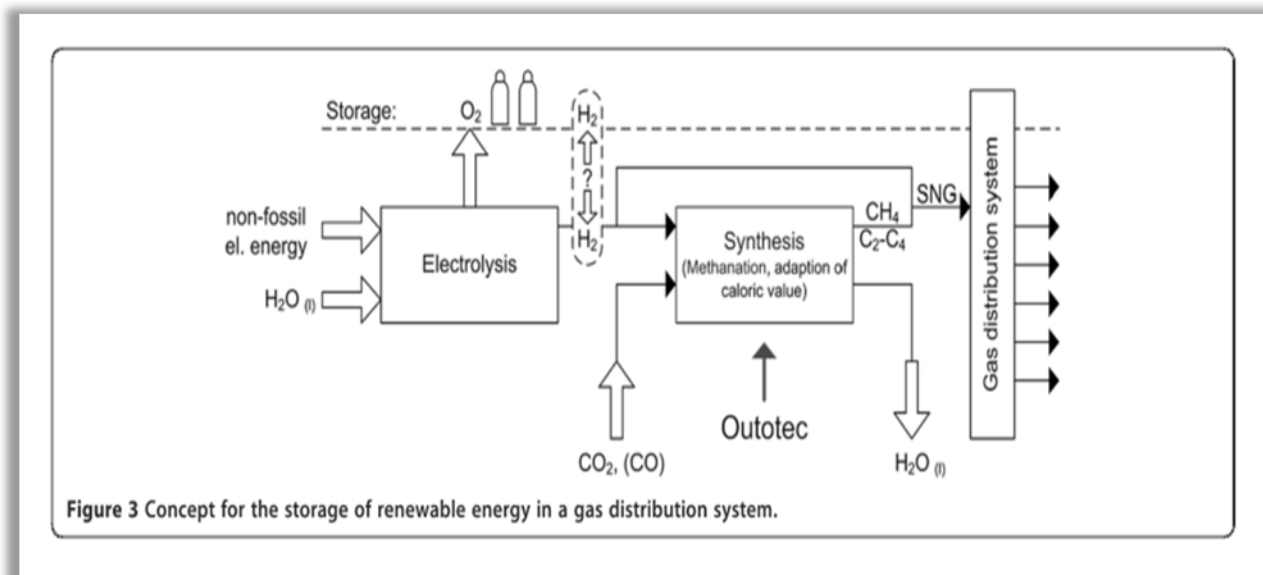
Σχήμα 3-02: Διάγραμμα ροής ενέργειας στην τεχνολογία αποθήκευσης power to gas<sup>[17]</sup>

Σε αντίθεση με τα παραπάνω μια επιπρόσθετη επέκταση του γερμανικού ηλεκτρικού δικτύου δεν μπορεί να μειώσει αποτελεσματικά τις συμφορήσεις: έχει αποδειχθεί μέσα από μελέτες ότι απαιτούνται 3600 χιλιόμετρα επιπρόσθετες ηλεκτρικές γραμμές υψηλής τάσης ώστε να εξαλειφθούν

οι κυκλοφοριακές συμφορήσεις στη Γερμανία ως το 2020. Μέχρι στιγμής μόνο 200 χιλιόμετρα νέων ηλεκτρικών γραμμών έχουν κατασκευασθεί λόγω του δύσκολου σχεδιασμού, των διαδικασιών έγκρισης και των ισχυρών αντιδράσεων για νέες ηλεκτρικές γραμμές υψηλής τάσης και τους πυλώνες τους από τον πληθυσμό.<sup>[17]</sup>

### 3.1 Περιγραφή της διαδικασίας

Η διάρθρωση της έρευνας κατά τη διαδικασία "παράγωγής 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).<sup>[17]</sup>



Σχήμα 3-03: Γενική ιδέα της αποθήκευσης ανανεώσιμης ενέργειας στο σύστημα διανομής φυσικού αερίου<sup>[17]</sup>

Μια σφαιρική εκτίμηση της όλης διαδικασίας μας δίνει το Σχήμα 3-03. 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.<sup>[17]</sup>

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. Αρχικά θα περιγράψουμε την κάθε φάση της διαδικασίας power to gas.<sup>[17]</sup>

### 3.1.1 Μεθανοποίηση

Οι αντιδράσεις μεθανοποίησης, του μονοξειδίου του άνθρακα CO και διοξειδίου του άνθρακα CO<sub>2</sub> ανακαλύφθηκαν στις αρχές του 19<sup>ου</sup> αιώνα. Στις μέρες μας, αυτές οι αντιδράσεις εφαρμόζονται ευρέως σε εγκαταστάσεις αμμωνιοσύνθεσης που χρησιμοποιούνται για την αφαίρεση μονοξειδίου του άνθρακα που λειτουργούν ως δηλητήριο καταλύτη στον καταλύτη αμμωνιοσύνθεσης. Επίσης τα διυλιστήρια και οι εγκαταστάσεις υδρογόνου χρησιμοποιούν τις αντιδράσεις μεθανοποίησης για τον καθαρισμό του υδρογόνου (αφαιρώντας το μονοξείδιο του άνθρακα). Με την αύξηση του ενδιαφέροντος για την παραγωγή υποκατάστατου φυσικού αερίου SNG από (φθινό) άνθρακα μέσω της αεριοποίησης του, η αντίληψη της διαδικασίας μεθανοποίησης έχει διαφοροποιηθεί τελείως: Ενώ αρχικώς θεωρείτο απλά ως μια τεχνολογία καθαρισμού του αερίου, τώρα παρουσιάζεται ως μια πολύ σημαντική χημική σύνθεση. Ένας άλλος λόγος αύξησης του ενδιαφέροντος προς την διαδικασία της μεθανοποίησης είναι η ανάγκη για αποθήκευση περίσσειας ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται από τις ΑΠΕ.<sup>[17]</sup>

Μεθανοποίηση ονομάζεται η αντίδραση του υδρογόνου με τα οξείδια του άνθρακα (καταλυτική υδρογόνωση οξειδίων του άνθρακα) προς σχηματισμό μεθανίου. Η μεθανοποίηση του διοξειδίου του άνθρακα CO<sub>2</sub> είναι μια εξώθερμη καταλυτική αντίδραση και κυρίως πραγματοποιείται σε θερμοκρασία μεταξύ των 200-550°C ανάλογα με τον καταλύτη που χρησιμοποιείται.<sup>[17]</sup>

- $\text{CO}_2 + 4\text{H}_2 \leftrightarrow \text{CH}_4 + 2\text{H}_2\text{O}$ , με  $\Delta H_{298\text{K}} = -165\text{kJ/mol}$  για το διοξείδιο του άνθρακα

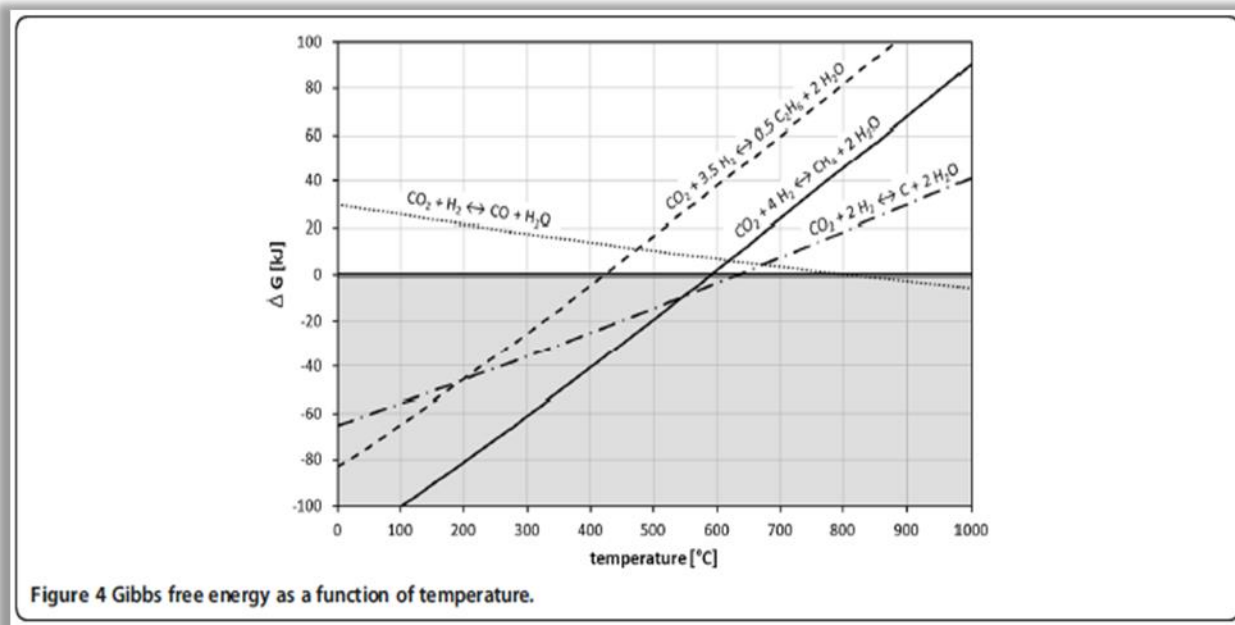
Η αντίδραση μεθανοποίησης του μονοξειδίου του άνθρακα παρουσιάζεται παρακάτω.

- $\text{CO} + 3\text{H}_2 \leftrightarrow \text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O}$ , με  $\Delta H_{298\text{K}} = -206,1\text{kJ/mol}$  για το μονοξείδιο του άνθρακα

Εκτός από μεθάνιο και νερό, υψηλά κορεσμένοι υδρογονάνθρακες μπορούν να ευρεθούν στα παραγόμενα προϊόντα της αντίδρασης. Ο πιο σύνηθες υδρογονάνθρακας C<sub>2+</sub> που παρουσιάζεται είναι το αιθάνιο (C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>).<sup>[17]</sup>

Μια κατάλληλη ποσότητα για να εκτιμηθεί ποια από τα προϊόντα αναμένουμε σε μια συγκεκριμένη θερμοκρασία λειτουργίας είναι η ελεύθερη ενέργεια ΔG κατά Gibbs.<sup>[17]</sup>

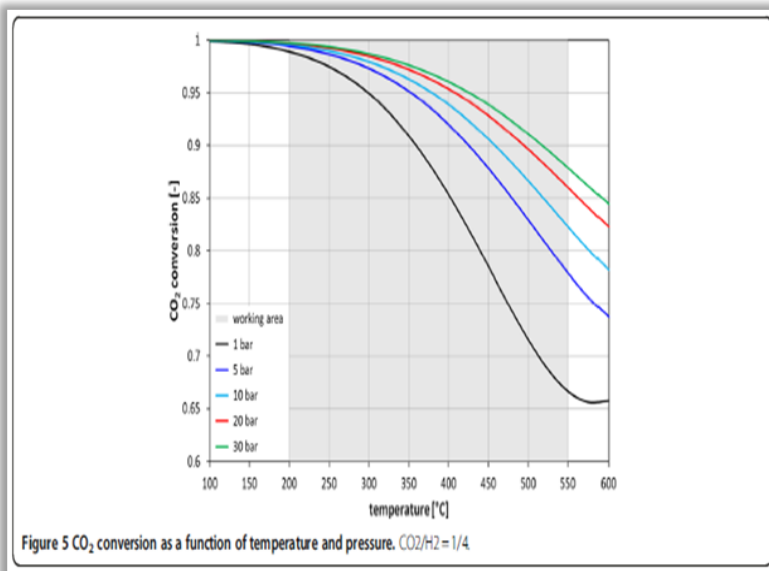
Το Σχήμα 3-04 παρουσιάζει την ενθαλπία κατά Gibbs συναρτήσεως της θερμοκρασίας για όλες τις αντιδράσεις που πραγματοποιούνται κατά τις αντιδράσεις μεθανοποίησης.<sup>[17]</sup>



Σχήμα 3-04: Gibbs ελεύθερη ενέργεια συναρτήσει της θερμοκρασίας [17]

Μια αντίδραση βρίσκεται σε ισορροπία όταν  $\Delta G=0$ . Εάν  $\Delta G<0$ , (γκρι περιοχή στο διάγραμμα), ευνοείται η αντίστοιχη αντίδραση και η ευθεία ισορροπίας μετατοπίζεται προς τα προϊόντα της καύσης. Εάν  $\Delta G>0$ , η ευθεία ισορροπίας μετατοπίζεται προς τα αντιδρώντα. Διακρίνεται ότι ο σχηματισμός μεθανίου από διοξείδιο του άνθρακα και υδρογόνο παρουσιάζεται για μέγιστη θερμοκρασία 600 °C. Ο σχηματισμός μονοξειδίου του άνθρακα από διοξείδιο του άνθρακα δεν μπορεί να δημιουργηθεί για θερμοκρασίες χαμηλότερες των 800 °C. Επιπλέον η διαδικασία πρέπει να πραγματοποιείται σε πολλαπλά στάδια ώστε η θερμοκρασία άρα και η συγκέντρωση μονοξειδίου του άνθρακα να κρατείται σε χαμηλά επίπεδα (η μεθανοποίηση είναι εξώθερμη αντίδραση). Καθώς ο σχηματισμός αιθανίου δεν είναι πιθανός σε θερμοκρασίες χαμηλότερες των 400 °C, αναμένεται χαμηλή παραγωγικότητα αιθανίου σε αυξημένες θερμοκρασίες. [17]

Ξέχωρα, από την επίδραση της θερμοκρασίας πρέπει να λάβουμε υπόψιν μας και την εξάρτηση της διαδικασίας μεθανοποίησης από την πίεση. Το Σχήμα 3-05 οπτικοποιεί την μετατροπή του διοξειδίου του άνθρακα σε κατάσταση ισορροπίας καθώς επηρεάζεται από την διεργασία της μεθανοποίησης σαν συνάρτηση της θερμοκρασίας και πίεσης. [17]



Σχήμα 3-05: Μετατροπή του CO<sub>2</sub> συναρτήσει της θερμοκρασίας και της πίεσης [17]

Όπως παρατηρούμε στο Σχήμα 3-05 η μετατροπή του διοξειδίου του άνθρακα γίνεται πιο γρήγορα με την αύξηση της πίεσης και ταυτόχρονα την μείωση της θερμοκρασίας. Στην ατμοσφαιρική πίεση 1 bar και θερμοκρασία αντίδρασης 450°C για παράδειγμα, μπορεί να επιτευχθεί μετατροπή του διοξειδίου του άνθρακα σε ποσοστό 78%. Ωστόσο οι διαδικασίες σύνθεσης μεθανίου που παρουσιάζονται εδώ απαιτούν υψηλότερες μετατροπές διοξειδίου του άνθρακα. Με την απλή διαδικασία ενός-σταδίου υψηλές μετατροπές μπορούν να επιτευχθούν ή σε πολύ υψηλές πιέσεις ή σε πολύ χαμηλές θερμοκρασίες. Αυξάνοντας την πίεση στα 20 bar και κρατώντας την θερμοκρασία στους 450 °C η μετατροπή διοξειδίου του άνθρακα αγγίζει σε ποσοστό το 93%. Μια περαιτέρω αύξηση της πίεσης λειτουργίας δεν αυξάνει σημαντικά την παραγωγή μεθανίου.<sup>[17]</sup>

Εκτός από τις καθαρά θερμοδυναμικές θεωρήσεις, η επιλογή καταλυτών παίζει ουσιαστικό ρόλο κατά την αντίδραση μεθανοποίησης. Ο καλύτερος κατασκευαστικά και τεχνολογικά καταλύτης κατασκευάζεται από νικέλιο και αυτό γιατί το νικέλιο είναι πολύ αποδοτικό ενώ και η τιμή του είναι χαμηλή.<sup>[17]</sup>

Ο καταλύτης νικελίου ωστόσο, πρέπει να πληροί κάποιες σημαντικές συνθήκες: το υλικό πρέπει να αντέχει σε απότομες αλλαγές της θερμοκρασίας μεταξύ 50°C έως 100°C οι οποίες πραγματοποιούνται σε διάρκεια λίγων δευτερολέπτων και οι οποίες προκαλούνται από διάφορες αλλαγές στο σημείο λειτουργίας.<sup>[17]</sup>

Θερμοκρασίες λειτουργίας κάτω από 200 °C δεν είναι επιτρεπτές κατά τη χρησιμοποίηση καταλύτη νικελίου λόγω του πιθανού σχηματισμού εξαιρετικά τοξικού καρβονυλίου νικελίου από μονοξείδιο του άνθρακα. Από την άλλη οι θερμοκρασίες λειτουργίας δεν θα πρέπει να υπερβαίνουν τους 550 °C για να αποφευχθεί η απενεργοποίηση του καταλύτη από τη θερμοσυσσώρευση σχηματισμών άνθρακα. Για αυτούς τους λόγους το εύρος θερμοκρασιών εντός του αντιδραστήρα μεθανοποίησης είναι σαφώς καθορισμένες. Το Σχήμα 3-05 παρουσιάζει το εύρος θερμοκρασιών λειτουργίας του καταλύτη με το γκρι σκιασμένο τετράγωνο. Για να αποφευχθεί η υποβάθμιση του καταλύτη κατά την παραγωγή δηλητηρίων, όπως θείο ή σιλοξάνη, απαιτείται μια στρατηγική καθαρισμού αερίου ανάντι του αντιδραστήρα μεθανοποίησης.<sup>[17]</sup>

### 3.1.2 Ηλεκτρόλυση

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.

Όπως βέβαια έχει ήδη αναφερθεί, 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. (Πηγή: <http://www.cres.gr/kape/publications/papers/dimosieysei/ydroge/A%20REVIEW%20ON%20WATER%20ELECTROLYSIS.pdf>)<sup>[18]</sup>

**Αρχές λειτουργίας ηλεκτρόλυσης:** Η απαιτούμενη ενέργεια για τη μετατροπή των μορίων σε ιόντα και αντίστροφα στα ηλεκτρόδια, καθώς και για τη «μετανάστευσή» τους προς αυτά, προσδίδεται από εξωτερικό κύκλωμα με τη μορφή του συνεχούς ρεύματος.

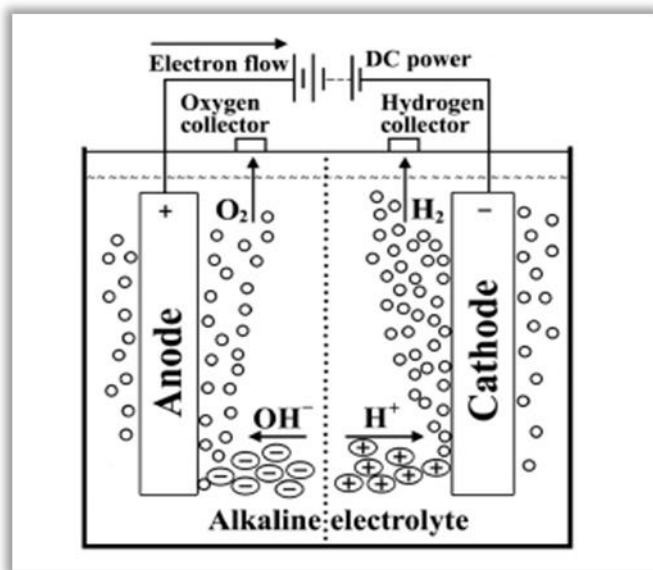
Στα ηλεκτρόδια λαμβάνουν χώρα οξειδοαναγωγικές αντιδράσεις, δηλαδή αντιδράσεις ανταλλαγής ηλεκτρονίων και σχηματισμού/ διάσπασης μορίων και ιόντων: τα ηλεκτρόνια είτε απορροφώνται (δεσμεύονται) είτε απελευθερώνονται τόσο σε/από μόρια όσο και σε/από ιόντα. Τα μόρια κερδίζουν ή χάνουν ηλεκτρόνια και μετατρέπονται σε (φορτισμένα) ιόντα, τα οποία διαπερνούν τον ηλεκτρολύτη. Αντίστροφα, τα ιόντα, τα οποία κερδίζουν ή χάνουν ηλεκτρόνια, μετατρέπονται σε (ουδέτερα) μόρια και απομακρύνονται από τον ηλεκτρολύτη.

(Πηγή: [http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0100-40422013000800017](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-40422013000800017))<sup>[20]</sup>

**Σημείωση:** Οξειδοαναγωγικές ονομάζονται οι αντιδράσεις κατά τις οποίες λαμβάνει χώρα τόσο οξείδωση όσο και αναγωγή. Οι αντιδράσεις αυτές εμφανίζονται σαν ζεύγη που πραγματοποιούνται σε διαφορετικά ηλεκτρόδια η κάθε μία - η αντίδραση στο κάθε ηλεκτρόδιο ονομάζεται ημιαντίδραση, ενώ η στάθμισή τους δείχνει την τελική (συνολική) αντίδραση. Αναγωγή ονομάζεται οποιαδήποτε χημική αντίδραση εμπλέκει τη λήψη (κέρδος) ηλεκτρονίων από μόριο ή ιόν, ενώ οξείδωση οποιαδήποτε εμπλέκει απομάκρυνση (απώλεια) ηλεκτρονίων.<sup>[20]</sup>

Ακολουθεί η ανάλυση των βασικών τμημάτων της ηλεκτρόλυσης.

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.<sup>[20]</sup>



Σχήμα 3-06: Γενική ιδέα της ηλεκτρόλυσης  
(Πηγή: [http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0100-40422013000800017](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-40422013000800017))<sup>[20]</sup>

Σε ένα ηλεκτροχημικό κελί (γαλβανικό ή ηλεκτρολυτικό), τα ηλεκτρόνια κατευθύνονται από την άνοδο στη κάθοδο. Επίσης, ανεξαρτήτως του τύπου του κελιού, η οξείδωση 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.<sup>[20]</sup>

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. <sup>[20]</sup>

*Ποιά αναλυτικά, για το κάθε ηλεκτρόδιο ισχύουν τα εξής:*

- **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. <sup>[20]</sup>

- **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. <sup>[20]</sup>

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. <sup>[20]</sup>

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). <sup>[20]</sup>

## **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  $\text{H}_2\text{O} + \text{H}_2\text{O} \leftrightarrow \text{H}_3\text{O}^+ + \text{OH}^-$  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. <sup>[20]</sup>



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

- 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. <sup>[20]</sup>

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 Acid για οξύ και Base για βάση) :

- $H_xA + H_2O \leftrightarrow A^{x-} + xH_3O^+$  για οξύ κατά Arrhenius/Brønsted-Lowry
- $B(OH) \leftrightarrow B^{y+} + yOH^-$  για βάση κατά Arrhenius
- $B + yH^+ \leftrightarrow H_yB^{y+}$  για βάση κατά Brønsted-Lowry
- $B_xA \leftrightarrow xB^{y+} + yA^{x-}$  για άλας κατά Arrhenius/Brønsted-Lowry

Σημείωση: προς χάριν γενικότητας, τα οξέα εμφανίζονται ως πολυπρωτικά (και οι βάσεις ως πολυδροξυλικές) στις εξισώσεις (για μονοπρωτικό ο δείκτης να είναι μονάδα, οπότε παραλείπεται), και προς χάριν απλότητας η διάλυσή τους στο νερό περιγράφεται από ένα μόνο βήμα (ενώ στη πραγματικότητα υφίστανται βήματα ίσα με το βαθμό πολυπρωτικότητας). <sup>[20]</sup>

Παρουσία νερού, το οξύ ή η βάση ιονίζεται (ή διάσταται, ανάλογα τη βάση), με αποτέλεσμα να προκύπτουν κατιόντα υδρογόνου ή ανιόντα υδροξειδίου αντίστοιχα - το άλας πάντα διάσταται 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). <sup>[20]</sup>

Παρατήρηση: στη πραγματικότητα, τα κατιόντα υδρογόνου δεν υφίστανται στο μέσο "ως έχουν" κι ούτε παρατηρούνται σ' αυτό, καθώς απορροφούνται από μόρια νερού, και σχηματίζουν υδροξόνια (ή αλλιώς ιόντα οξωνίου)  $\text{H}_3\text{O}^+$ . Συνεπώς, η αναγραφή τόσο των  $\text{H}^+$  όσο και των  $\text{H}_3\text{O}^+$  στα προϊόντα ιοντισμού οξέος, καθώς και η στάθμισή τους, είναι έννοιες ταυτόσημες.

### **Ηλεκτροκαταλύτες:**

Ηλεκτροκατάλυση είναι η διαδικασία βελτίωσης της κινητικής των ηλεκτροδίων. Οι ηλεκτροκαταλύτες επηρεάζουν την ενέργεια ενεργοποίησης της ηλεκτροχημικής αντίδρασης μειώνοντας τη σχετική υπέρταση ενεργοποίησης, ενώ η επίδρασή τους εξαρτάται από την ηλεκτρονιακή δομή του ηλεκτροδίου. Χρησιμοποιούνται για τη διευκόλυνση τη μεταφοράς του φορτίου ή/και για τη βελτίωση του ρυθμού των επιμέρους (ημι)αντιδράσεων. Μπορούν να είναι είτε τα ίδια τα ηλεκτρόδια, είτε υλικά κραματωμένα ή επιστρωμένα στην επιφάνειά τους, όπου και λαμβάνουν χώρα οι αντιδράσεις. Κατ' αυτό το τρόπο μπορούν να βελτιωθούν ιδιότητες των ηλεκτροδίων όπως η ηλεκτρική αγωγιμότητα κ.α. Επίσης, ανάλογα με τις απαιτήσεις των επιμέρους ημιαντιδράσεων, μπορούν να αυξάνουν και την επιλεκτικότητα της επιθυμητής αντίδρασης έναντι ανταγωνιστικών.

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.

(Πηγή:[http://www.hydrogennet.dk/fileadmin/user\\_upload/PDFfiler/Aktiviteter/Kommende\\_aktiviteter/Elektrolysesymposium/Tom\\_Smolinka.pdf](http://www.hydrogennet.dk/fileadmin/user_upload/PDFfiler/Aktiviteter/Kommende_aktiviteter/Elektrolysesymposium/Tom_Smolinka.pdf))<sup>[19]</sup>

### **Τεχνολογίες ηλεκτρόλυσης:**

Ανάλογα με τη θερμοκρασία λειτουργίας, υπάρχουν δύο κατηγορίες ηλεκτρόλυσης: χαμηλών και υψηλών θερμοκρασιών, με τη πρώτη κατηγορία να υποδιαιρείται σε αλκαλική και πολυμερούς μεμβράνης.

Αν και η ηλεκτρόλυση χαμηλών θερμοκρασιών είναι ώριμη τεχνολογία, χαρακτηρίζεται από υψηλή ηλεκτρική κατανάλωση, που υποβαθμίζει την ανταγωνιστικότητά της. Η ηλεκτρόλυση των υψηλών θερμοκρασιών παρουσιάζει καλύτερες προοπτικές, χάρη στις χαμηλότερες υπερτάσεις ενεργοποίησης και στις μειωμένες ανάγκες ρεύματος που απαιτούνται εκεί, μιας και η παραγόμενη θερμότητα καλύπτει τμήμα της απαιτούμενης ενέργειας.

Εμπορικά, οι διαθέσιμες τεχνολογίες ηλεκτρόλυσης σήμερα είναι αυτές των χαμηλών θερμοκρασιών, με τουλάχιστον 13 κατασκευαστές (3 για αλκαλική και 10 για πολυμερική). Οι μονάδες της πολυμερούς μεμβράνης, αν και αρκετά αποδοτικές, είναι περιορισμένες σε ισχύ της τάξεως των kW (από λίγα ως μερικές εκατοντάδες) ενώ της αλκαλικής μπορούν να φτάσουν ως κάμποσα MW. Η τεχνολογία τύπου SOEC βρίσκεται ακόμα σε στάδιο έρευνας και ανάπτυξης.

(Πηγή:<http://www.elygrid.com/alkaline-electrolysis/>)<sup>[21]</sup>

## Συμβατική ηλεκτρόλυση

Ο όρος συμβατική ηλεκτρόλυση αναφέρεται στις εμπορικές τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται βιομηχανικά, και χαρακτηρίζονται από υδάτινο ηλεκτρολύτη. Η σημερινή της μορφή βασίζεται στα αρχικά μοντέλα των Nicholson-Carlisle και Ritter, που ανακάλυψαν το φαινόμενο περί το 1800, δηλαδή τη διάσπαση του νερού με τη χρήση ηλεκτροδίων βυθισμένων σε υδατικό διάλυμα ηλεκτρολύτη υπό πηγή συνεχούς ρεύματος.

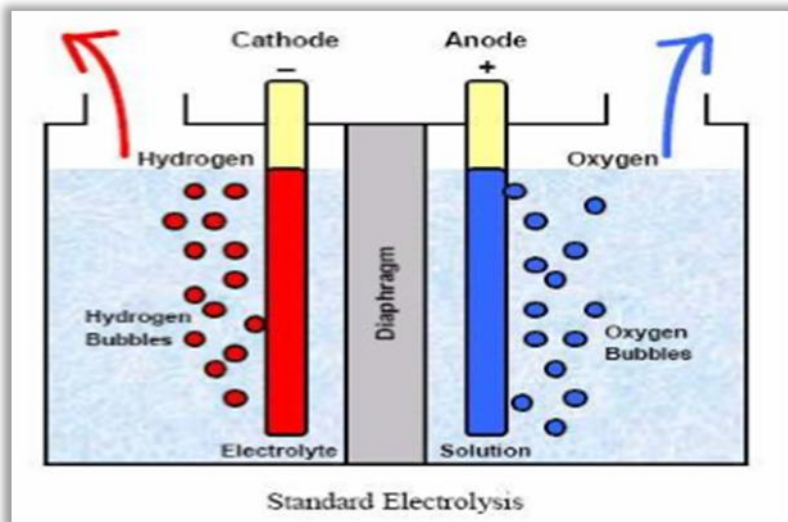
Το φαινόμενο αυτό μελετήθηκε αρχικά σε όξινο περιβάλλον, με αποτέλεσμα στις πρώτες εφαρμογές να χρησιμοποιείται οξύ ως ηλεκτρολύτης (θειικό ή φωσφορικό). Το περιβάλλον όμως αυτό δημιουργούσε προβλήματα σταθερότητας με τα ηλεκτρόδια, και ο διαβρωτικός χαρακτήρας του ηλεκτρολύτη ήταν έντονος - απαιτούνταν λοιπόν και ακριβότερα ηλεκτρόδια, όπως από ευγενή μέταλλα. (Πηγή: [http://www.topsoe.com/sites/default/files/sunde\\_0.pdf](http://www.topsoe.com/sites/default/files/sunde_0.pdf))<sup>[23]</sup>

Πλέον, η εμπορική μορφή της ηλεκτρόλυσης που έχει επικρατήσει είναι η αλκαλική - έτσι, η διάβρωση μπορεί και ελέγχεται ευκολότερα και χρησιμοποιούνται φθηνότερα υλικά κατασκευής. Ήδη από το 1902, η τεχνολογία αυτή θεωρείται ώριμη και αποδεδειγμένη βιομηχανικά, με προϊόντα εμπορικά διαθέσιμα εδώ και πολλές δεκαετίες, προς παραγωγή υδρογόνου. Ως τεχνολογία, χαρακτηρίζεται από φθηνά υλικά, τόσο των ηλεκτροδίων όσο και του κελιού γενικότερα, μα και από χαμηλή απόδοση και ικανότητα παραγωγής υδρογόνου, καθώς και από ογκωδέστερα συστήματα.<sup>[23]</sup>

### Περιγραφή του συστήματος:

Το αλκαλικό ηλεκτρολυτικό κελί αποτελείται από δύο ηλεκτρόδια με ενσωματωμένους ηλεκτροκαταλύτες, που από τη μια μεριά είναι συνδεδεμένα σε πηγή τάσης συνεχούς ρεύματος και από την άλλη είναι βυθισμένα σε ένα βασικό διάλυμα.<sup>[23]</sup>

Ο ηλεκτρολύτης, εξού και το όνομα της εν λόγω τεχνολογίας, είναι μια (ισχυρή) βάση προερχόμενη από αλκάλια, όπως το υδροξείδιο του νατρίου ή το υδροξείδιο του καλίου, συγκέντρωσης μεταξύ 20%-40% (συνήθεστερα 25%-30%). Η διατήρηση της υψηλής συγκέντρωσης του ηλεκτρολύτη είναι πολύ σημαντική, διότι καθορίζει την ηλεκτρική αγωγιμότητα, η οποία πρέπει να παραμένει υψηλή προκειμένου να αποφεύγεται η ανάγκη επιπλέον τάσης, για τη κάλυψη των ωμικών απωλειών.<sup>[23]</sup>



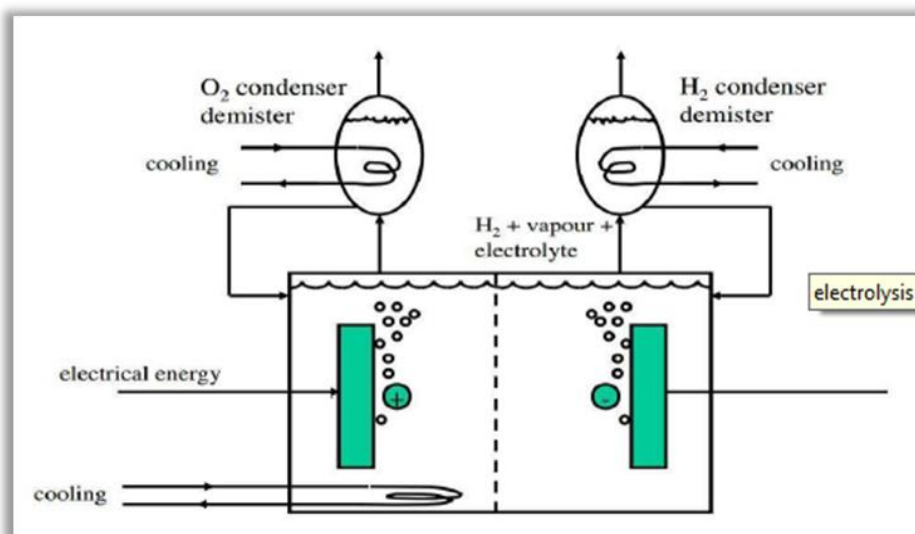
Σχήμα 3-07: Συμβατική ηλεκτρόλυση  
(Πηγή: <https://sites.google.com/site/svscience>  
2014/chemistry/c2/salts-and-electrolysis)<sup>[25]</sup>

Ο έντονος βασικός χαρακτήρας του ηλεκτρολύτη τον αναγκάζει να εμπεριέχεται σε μια κλειστή διάταξη ώστε να αποφεύγεται η επαφή με το ατμοσφαιρικό διοξείδιο του άνθρακα – κάτι τέτοιο θα προκαλούσε εξουδετέρωση και κατακρήμνιση του άλατος. Μεταξύ των δύο υδροξειδίων, του καλίου απαντάται σχεδόν αποκλειστικά εμπορικά, διότι παρουσιάζει υψηλότερη αγωγιμότητα. [23]

Τα δύο ηλεκτρόδια διαχωρίζονται από ένα πορώδες διάφραγμα, που επιτρέπει μόνο την διέλευση των ιόντων (ανιόντα υδροξειδίου) ενώ παράλληλα διαχωρίζει το υδρογόνο και το οξυγόνο, που παράγονται ως φυσαλίδες στη κάθοδο και στην άνοδο αντίστοιχα. Πρέπει να διατηρεί καλή ηλεκτρική αγωγιμότητα μα κακή ηλεκτρονιακή, ώστε να μην διασχίζουν ηλεκτρόνια τον ηλεκτρολύτη, και να δημιουργούν έτσι απώλειες ρεύματος. [23]

### Συνθήκες λειτουργίας:

Η θερμοκρασία λειτουργίας συνήθως κυμαίνεται μεταξύ 40 °C με 100 °C (συνήθως 80-90 °C, αν και για όξινη λειτουργούσε καλύτερα στους 140 °C ως 150 °C) ενώ η τυπική πίεση λειτουργίας σε 1 ως 30 bar. Λειτουργία κατά τις υψηλότερες πιέσεις και θερμοκρασίες προτιμάται, διότι δε χρειάζεται μετέπειτα συμπίεση του υδρογόνου μεν, και η αντίδραση είναι ενδόθερμη. Όσον αφορά στη καθαρότητα, συνήθως είναι μεγαλύτερη από 99,8%. Επίσης, τυπικές πυκνότητες ρεύματος αποτελούν τα 1000 με 3000 A m<sup>-2</sup>. [23]



Σχήμα 3-08: Διάταξη αλκαλικής ηλεκτρόλυσης

(Πηγή:[http://www.topsoe.com/sites/default/files/sunde\\_0.pdf](http://www.topsoe.com/sites/default/files/sunde_0.pdf)) [23]

Η αυξημένη σταθερότητα

όμως που παρέχει η τεχνολογία αυτή (με φθηνούς συγκριτικά καταλύτες) αντισταθμίζεται από άλλα προβλήματα, όπως την ανάγκη διαχείρισης του ηλεκτρολύτη (που δεν παύει να είναι διαβρωτικός) και ελέγχου για αντικατάστασή του, την κακή λειτουργία σε υψηλές πιέσεις ή σε κυμαινόμενη πίεση και την ανάγκη καθαρισμού του παραγόμενου υδρογόνου από ίχνη του ηλεκτρολύτη (ειδικά σε συνθήκες χαμηλού φορτίου). [23]

### Υλικά κατασκευής:

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, ο ηλεκτρολύτης αποτελείται συνήθως από KOH (και πιο σπάνια από NaOH) - η ηλεκτρική όμως κατανάλωση μπορεί να μειωθεί σημαντικά με τη προσθήκη μικρής ποσότητας ιονικών ρευστών. Πρόκειται για οργανικές ενώσεις (υγρές σε θερμοκρασία δωματίου), που αποτελούνται αποκλειστικά από ανιόντα και κατιόντα οπότε και ενισχύουν σημαντικά την ιονική αγωγιμότητα και σταθερότητα του ηλεκτρολύτη. Από την άλλη πλευρά, παρουσιάζουν υψηλό ιξώδες και χαμηλή διαλυτότητα στο νερό, γεγονός ανασταλτικό για τη μεταφορά μάζας, με

αποτέλεσμα να μειώνεται η πυκνότητα του ρεύματος και συνεπώς ο ρυθμός παραγωγής υδρογόνου. <sup>[23]</sup>

Τυπικό ιονικό ρευστό αποτελεί η αρωματική ετεροκυκλική ένωση ιμιδαζόλιο.

Το υλικό των ηλεκτροδίων θα πρέπει να διαθέτει καλή αντοχή στη διάβρωση, υψηλή ηλεκτρική αγωγιμότητα, υψηλή ικανότητα κατάλυσης (σε συνδυασμό με τον ηλεκτροκαταλύτη) και χαμηλή τιμή. Υλικά χαμηλού κόστους με χαμηλές υπερτάσεις αποτελούν το ανοξειδωτο ατσάλι και ο μόλυβδος, μα δεν μπορούν να ανταποκριθούν σε έντονα αλκαλικό περιβάλλον. Τα ευγενή μέταλλα (και τα οξειδιά τους) όπως το ρουθίνιο και το ιρίδιο αντισταθμίζουν τα προβλήματα αυτά, μα το υψηλό τους κόστος είναι αποτρεπτικό στη κατασκευή ογκώδων/μαζικών ηλεκτροδίων. <sup>[23]</sup>

Ο συμβιβασμός των επιθυμητών ιδιοτήτων βρίσκεται στα στοιχεία μετάπτωσης, με το νικέλιο (συχνά τύπου Raney) να είναι το πιο δημοφιλές χάρη στην υψηλή του ηλεκτροκαταλυτική ενεργότητα καθώς και τη σταθερότητά του σε περιβάλλοντα με υψηλό pH. Παρουσία όμως υψηλών παροχών υδρογόνου, τείνουν επιφανειακά να σχηματίζονται υδρίδια νικελίου και να απενεργοποιείται ο καταλύτης. Άλλο υλικό, που βρίσκει συνήθως εφαρμογή στη κάθοδο, μπορεί να είναι το κοβάλτιο (συνήθως σε συνδυασμό με το νικέλιο). Επίσης, η πλατίνα μπορεί να χρησιμοποιηθεί είτε μόνη της είτε επικουρικά, βελτιώνοντας την απόδοση της κινητικής των ηλεκτροδίων αλλά αυξάνοντας το συνολικό κόστος της μονάδας. Τέλος, το βανάδιο έχει βρεθεί πως βοηθά στην επανενεργοποίηση καταλυτών νικελίου ενώ η επίστρωση σιδήρου τείνει να την αποτρέπει. <sup>[23]</sup>

Συνοψίζοντας, τα συνηθέστερα υλικά κατασκευής της καθόδου είναι νικέλιο, ή ατσάλι επιστρωμένο με νικέλιο, ενώ μπορεί να χρησιμοποιηθεί και πλατίνα ως πρόσμιξη. Όσον αφορά στην άνοδο, όπου η ημιαντίδραση έκλυσης οξυγόνου είναι πιο σύνθετη και απαιτητική (φαίνεται από τα εκάστοτε δυναμικά), χρησιμοποιούνται οξειδία του νικελίου, ή σύνθετα οξειδία νικελίου-κοβαλτίου ή/και σιδήρου, υποστηριζόμενα συνήθως με τιτάνιο (σε μορφή μετάλλου ή οξειδίου). Όσον αφορά στο υλικό του διαφράγματος, θα πρέπει να διαθέτει χαμηλή διαπερατότητα από αέρια, χαμηλή ιονική αντίσταση, μα υψηλή ηλεκτρονιακή αντίσταση. Θα πρέπει να είναι επίσης ανθεκτικό σε χημικές, θερμικές και μηχανικές καταπονήσεις. Παλιότερα, οι μεμβράνες αυτές είχαν ως βάση τον άσβεστο. Καθώς όμως ο άσβεστος αφενός δεν είναι τόσο ανθεκτικός σε αλκαλικό περιβάλλον κι αφετέρου έχει βρεθεί να είναι τοξικός και επικίνδυνος για την υγεία, πλέον δε χρησιμοποιείται. Από το '70 και μετά, χρησιμοποιούνται πολυμερή υλικά, τα οποία συνήθως βασίζονται στο υπερφθοροσουλφονικό οξύ, σε αρυλ-αιθέρες και στο πολυτετραφθοροαιθυλένιο. <sup>[23]</sup>

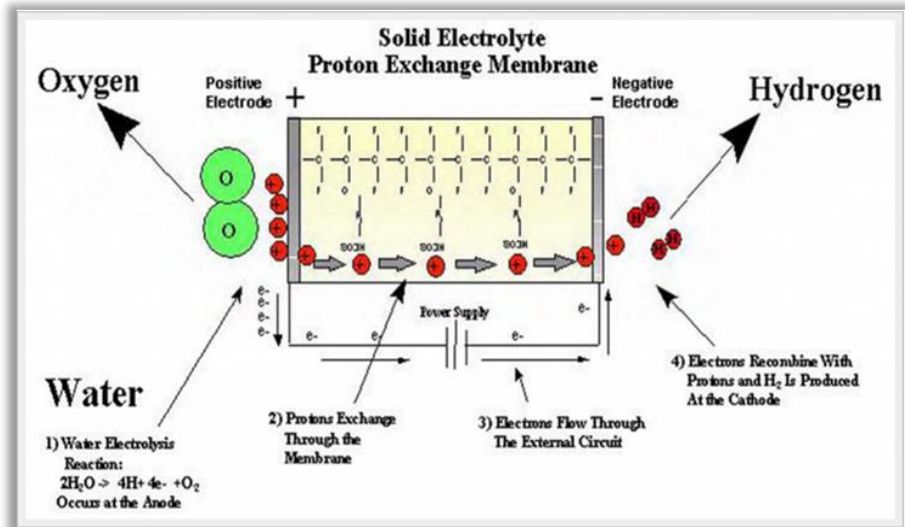
### **Απώλειες και βαθμός απόδοσης:**

Οι απώλειες ρεύματος είναι χαμηλές (ισχύει γενικότερα στην ηλεκτρόλυση), με αποτέλεσμα η απόδοση ρεύματος να ξεπερνά τυπικά το 95%. Ο συνολικός λοιπόν βαθμός απόδοσης καθορίζεται πρακτικά από τις απώλειες τάσης. Συνεπώς, για συνήθεις τάσεις λειτουργίας στα 1,7-2,2 V με συνηθέστερα τα 2V, η απόδοση κυμαίνεται σε 70-80%, λαμβάνοντας υπόψιν την ανώτερη θερμογόνο ικανότητα του υδρογόνου (HHV), και περίπου 10% λιγότερο για τη κατώτερη θερμογόνο.

## PEM Ηλεκτρόλυση

Η ηλεκτρόλυση τύπου PEM (Polymer Electrolyte Membrane ή Proton Exchange Membrane), γνωστή και ως SPE (Solid Polymer Electrolyte), αποτελεί μια νεότερη τεχνολογία, η οποία χαρακτηρίζεται από ηλεκτρολύτη υπό τη μορφή πολυμερούς μεμβράνης. Πρόκειται στην ουσία για αντίστροφη λειτουργία από τις κυψέλες καυσίμου τύπου PEM (αν και τα υλικά κατασκευής διαφοροποιούνται).

Εμφανίστηκε στις αρχές της δεκαετίας του '70 σε μικρή κλίμακα για στρατιωτικές και διαστημικές εφαρμογές, και κατά τις δεκαετίες του '70 και '80 άρχισε να αποκτά δημοτικότητα, κι από το '90 εμπορικότητα – είχε προηγηθεί το 1966 η ανακάλυψη του Nafion από την General Electric, για κυψέλες καυσίμου. Η ανάπτυξή της προωθήθηκε στα πλαίσια αντιστάθμισης των κυριότερων ζητημάτων της συμβατικής (αλκαλικής) ηλεκτρόλυσης, όπως η αδυναμία λειτουργίας σε μερικό και κυμαινόμενο φορτίο, και η λειτουργία σε χαμηλές πυκνότητες ρεύματος και πιέσεις. Επίσης, η χρήση της έχει μελετηθεί τόσο για στατικές όσο και για κινητές εφαρμογές, με την έρευνα να εστιάζει τώρα στην αυτοκίνηση.<sup>[23]</sup>



Σχήμα 3-09: PEM ηλεκτρόλυση

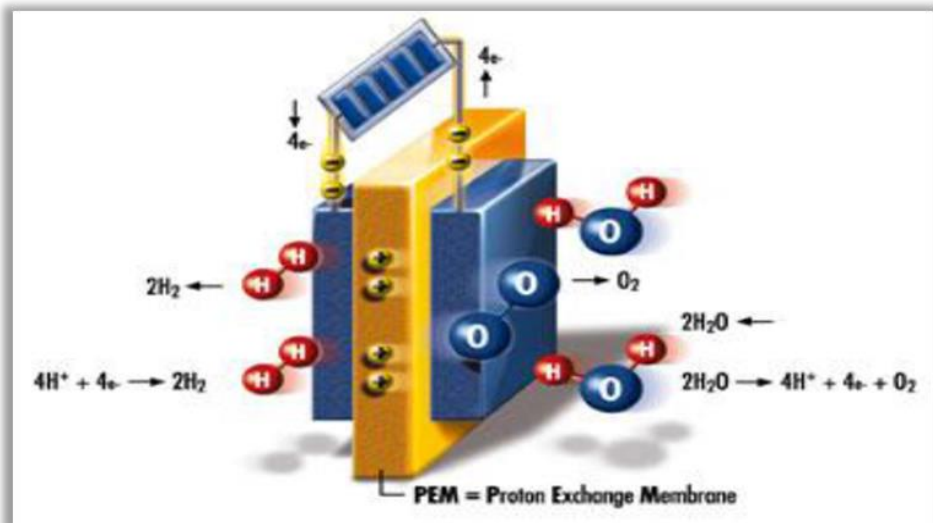
(Πηγή: <http://protononsite.com/products/hydrogen-generator>)<sup>[26]</sup>

### Περιγραφή συστήματος:

Η αρχή λειτουργίας έχει ως εξής: επιβάλλοντας διαφορά δυναμικού σε ένα κελί το οποίο τροφοδοτείται με νερό, συνεχές ρεύμα το διαπερνά διαμέσου της πολυμερούς μεμβράνης, με αποτέλεσμα να απελευθερώνεται αέριο υδρογόνο στη κάθοδο και αέριο οξυγόνο στην άνοδο.<sup>[23]</sup>

Είναι λοιπόν κατανοητό πως η φιλοσοφία κατασκευής διαφέρει πολύ από τη συμβατική ηλεκτρόλυση. Καταρχάς, δεν χρησιμοποιείται υδατικό διάλυμα, ούτε ισχυρό οξύ ή βάση ως ηλεκτρολύτης. Αντίθετα, η τεχνολογία κάνει χρήση μιας στερεάς πολυμερούς μεμβράνης (ή καλύτερα, μιας αλληλουχίας μεμβρανών) ως ηλεκτρολύτη, η οποία είναι περατή μόνο από πρωτόνια. Το γεγονός ότι το κελί δεν είναι υγρό απλοποιεί σημαντικά το σχεδιασμό του κελιού, καθώς και βελτιώνει τις συνθήκες ασφαλείας. Όσον αφορά στο νερό τροφοδοσίας, θα πρέπει αυτό να είναι καθαρό, μιας και τυχόν προσμίξεις μπορούν να αποβούν επιζήμιες για τη μεμβράνη.<sup>[23]</sup>

Η μεμβράνη αυτή οδηγεί τα πρωτόνια από την άνοδο στη κάθοδο, ενώ παράλληλα δρα ως μόνωση μεταξύ των ηλεκτροδίων, εμποδίζοντας αφενός την επαφή τους κι αφετέρου τη διέλευση ηλεκτρονίων μέσω αυτής - και στις δύο περιπτώσεις, κάτι τέτοιο θα οδηγούσε σε βραχυκύκλωμα και απώλειες ρεύματος. Πέραν τούτων, δρα και ως διάφραγμα, εμποδίζοντας τη διέλευση του εκάστοτε αερίου και την ανάμιξή τους.<sup>[23]</sup>



Σχήμα 3-10: Διάταξη PEM ηλεκτρόλυσης  
(Πηγή: [http://www.terrancell.com/tech\\_pemelectro.html](http://www.terrancell.com/tech_pemelectro.html))<sup>[27]</sup>

Επίσης, καθώς η μεμβράνη είναι περατή μόνο από πρωτόνια, δημιουργείται επί αυτής τοπικά όξινο περιβάλλον. Το περιβάλλον αυτό περιορίζει τις επιλογές των υλικών κατασκευής σε ευγενή μέταλλα (πχ Pt, Pd), σε οξειδία ευγενών μετάλλων (πχ RuO<sub>2</sub> και IrO<sub>2</sub>) και μερικές ενώσεις του βολφραμίου (πχ WO<sub>3</sub>, WC).<sup>[23]</sup>

### Συνθήκες λειτουργίας:

Τυπικές θερμοκρασίες λειτουργίας της ηλεκτρόλυσης τύπου PEM είναι οι 80°C – 90°C, δηλαδή εντός του εύρους της συμβατικής. Αντίστοιχα, τα εύρη πιέσεων κυμαίνονται συνήθως από 8 μέχρι και 200 bar. Οι υψηλές αυτές πιέσεις, σε συνδυασμό με τις αυξομειώσεις κατά τη λειτουργία (όπως παύση, εκκίνηση, κυμαινόμενη λειτουργία) επιβάλλουν μηχανικές καταπονήσεις στο κελί. Όσον αφορά στην εκλυόμενη θερμότητα, η διαχείρισή της γίνεται με ανακυκλοφορία του νερού. Τόσο πάντως στην αλκαλική όσο και στη PEM ηλεκτρόλυση, η επίτευξη λειτουργίας σε υψηλότερες θερμοκρασίες αποτελεί ένα σημαντικό ζήτημα. Πρέπει όμως να σημειωθεί πως αύξηση της θερμοκρασίας έχει βρεθεί πως προκαλεί και αύξηση της διαπερατότητας της μεμβράνης.<sup>[23]</sup>

Η τεχνολογία αυτή χαρακτηρίζεται από πολλά πλεονεκτήματα έναντι της αλκαλικής ηλεκτρόλυσης, με χαρακτηριστικότερα την ικανότητα λειτουργίας σε υψηλότερες πυκνότητες ρεύματος (άρα υψηλότεροι ρυθμοί παραγωγής υδρογόνου) σε κελιά μη διαβρωτικά, πάχους λίγων χιλιοστών και την παραγωγή καθαρότερου υδρογόνου (99,999%). Το επίπεδο διαχωρισμού είναι ανώτερο, γεγονός σημαντικό όσον αφορά και στην ασφάλεια, καθώς το υδρογόνο είναι ιδιαίτερα εύφλεκτο μα και εκρηκτικό παρουσία οξυγόνου. Επίσης, ο βαθμός απόδοσής της είναι εν γένει μεγαλύτερος του αντίστοιχου της συμβατικής ηλεκτρόλυσης.<sup>[23]</sup>

Τα στοιχεία όμως που προώθησαν την τεχνολογία αυτή έναντι της αλκαλικής ηλεκτρόλυσης είναι η ταχύτερη απόκρισή της, η ικανότητα λειτουργίας σε μεγαλύτερα εύρη θερμοκρασιών και πιέσεων, και σε συνθήκες είτε μερικού φορτίου είτε “υπερφόρτωσης” (overload). Επίσης, υπάρχει η δυνατότητα άμεσης απόκρισης και λειτουργίας σε μεταβλητές συνθήκες και φορτίο – κάτι

τεχνοοικονομικά δυσχερές για την αλκαλική ηλεκτρόλυση. Βασικά προβλήματα όμως αποτελούν ο περιορισμένος σχετικά χρόνος ζωής του κελιού καθώς και τα υψηλά του κόστη. <sup>[23]</sup>

Αν και οι ανάγκες του ηλεκτρικού δικτύου είναι σχετικά σταθερές και προβλέψιμες, όταν αυτές συνδέονται με κυμαινόμενες πηγές ενέργειας όπως η ηλιακή και η αιολική, η ζήτηση του δικτύου σπάνια ταυτίζεται με την παραγωγή από ΑΠΕ. Πρέπει λοιπόν η παραγόμενη ενέργεια κάπως να αποθηκεύεται, και μάλιστα αποδοτικά. Τα στοιχεία λοιπόν αυτά την καθιστούν ιδεατή για το συνδυασμό της με συστήματα ΑΠΕ, των οποίων ο (συχνά πολύ έντονα) κυμαινόμενος χαρακτήρας απαιτεί ευέλικτο χειρισμό. <sup>[23]</sup>

### **Υλικά κατασκευής:**

Οι επιθυμητές ιδιότητες της μεμβράνης είναι η υψηλή αγωγιμότητα των πρωτονίων παράλληλα με χαμηλή αγωγιμότητα ηλεκτρονίων και άλλων ιόντων, και η χαμηλή διαπερατότητα από τα παραγόμενα αέρια, αμφίδρομα. Θα πρέπει επίσης να είναι ανθεκτική στο αναγωγικό περιβάλλον που δημιουργείται στη κάθοδο καθώς και στο έντονο οξειδωτικό περιβάλλον που δημιουργείται στην άνοδο. Συγκριτικά με τον υγρό ηλεκτρολύτη, η μεμβράνη είναι και πιο ευαίσθητη σε ακαθαρσίες. Επίσης, η λειτουργία της υποβαθμίζεται καθώς με το καιρό σιγά σιγά διασπάται και λεπταίνει. <sup>[23]</sup>

Συνήθη υλικά κατασκευής αποτελούν απλούστερα ή με προσμίξεις πολυμερή, τα οποία παρουσιάζουν υψηλή μηχανική, χημική και θερμική αντοχή – τυπικά πάχη αποτελούν 20μm με 200 μm. Οι μεμβράνες όμως χρειάζεται να ενυδατώνονται (ειδάλλως επηρεάζεται η ικανότητα αγωγής πρωτονίων), με αποτέλεσμα η χρήση τους να μην επιτρέπει θερμοκρασίες μεγαλύτερες των 80 °C με 90 °C – η συνεχής βέβαια παροχή νερού εξασφαλίζει την ενυδάτωση αυτή, σε αντίθεση με τις αντίστοιχες κυψέλες καυσίμου, όπου αποτελεί ένα ζήτημα. Χαρακτηριστικότερο προϊόν είναι το επονομαζόμενο Nafion® από τη DuPont, το οποίο είναι ένα σύνθετο φθοροπολυμερές με διάφορες προσμίξεις. Άλλα συναφή προϊόντα είναι τα Fumapem®, Flemion® και Aciplex®. <sup>[23]</sup>

Τα ηλεκτρόδια φτιάχνονται έτσι ώστε να επικαλύπτουν τη μεμβράνη εκατέρωθεν, και φέρουν ενσωματωμένους ηλεκτροκαταλύτες στην πορώδη επιφάνειά τους. Όπως έχει ήδη αναφερθεί, οι συμβατικοί καταλύτες (όπως τα στοιχεία μετάπτωσης) δεν είναι σταθεροί σε όξινα περιβάλλοντα και διαβρώνονται, με αποτέλεσμα να απαιτείται η χρήση ευγενών μετάλλων. Το κυριότερο υλικό κατασκευής των ηλεκτροδίων αποτελεί το τιτάνιο, συνήθως στη μορφή του οξειδίου του και αποτελεί γενικότερα το υλικό κατασκευής (του σκελετού) του κελιού. Το χαμηλό (μηδενικό κατά σύμβαση) όμως δυναμικό της καθόδου επιτρέπει και τη χρήση άλλων υλικών για το ηλεκτρόδιο, με χαρακτηριστικότερη εναλλακτική τα φύλλα άνθρακα. Για την άνοδο όμως, το τιτάνιο παραμένει το υλικό επιλογής, αν και το έντονο τοπικό περιβάλλον τείνει να το απενεργοποιεί, αν δεν έχει λάβει κατάλληλη προεργασία. <sup>[23]</sup>

Η πλατίνα αποτελεί τον συνηθέστερο καταλύτη της καθόδου, ενώ στις κυψέλες καυσίμου τύπου PEM χρησιμοποιείται και στα δύο ηλεκτρόδια. Στη περίπτωση της ηλεκτρόλυσης όμως, έχει κακή αγωγιμότητα ως υλικό ανόδου. Παραμένει όμως το υλικό αναφοράς για την ηλεκτροκατάλυση της καθόδου, χάρη στη σταθερότητά της και την ενεργότητά της. Επίσης, ορισμένες φορές αναμιγνύεται με ρουθίνιο, το οποίο είναι αρκετά ενεργό, μα και φθηνότερο – έτσι καθίσταται και ανθεκτική στο μονοξείδιο του άνθρακα, σε αντίθεση με τη καθαρή πλατίνα.



Από την άλλη μεριά, το οξείδιο του ιριδίου, αν και σταθερότερο, δεν είναι τόσο ενεργό όσον αφορά την ημιαντίδραση της καθόδου<sup>[23]</sup>.

Αν και το ρουθίνιο είναι το ενεργότερο υλικό για τη κατάλυση της ημιαντίδρασης της ανόδου, εντούτοις η περιορισμένη σταθερότητά του αποτρέπει τη χρήση του ως κύριο καταλύτη της ανόδου (το οξείδιό του οξειδώνεται περαιτέρω σε τάσεις άνω των 1,387 V). Προτιμάται λοιπόν το ιρίδιο, το οποίο αν και ακριβότερο και λιγότερο ενεργό, είναι πολύ πιο σταθερό. Για ακόμα καλύτερα αποτελέσματα, έχει προταθεί η χρήση ανάμεικτων οξειδίων ρουθινίου και ιριδίου, συνδυάζοντας τα πλεονεκτήματα και αντισταθμίζοντας τα μειονεκτήματα του καθενός – προτιμώνται γενικώς τα οξείδια έναντι των αντίστοιχων μετάλλων, για καλύτερη σταθερότητα επί μακρόχρονης λειτουργίας.<sup>[23]</sup>

Γενικά, το ηλεκτρόδιο της ανόδου έχει τη τάση να αδρανοποιείται, με αποτέλεσμα να απαιτείται επιπλέον τάση, ενώ της καθόδου να υπόκειται θραύση (ιδίως το τιτάνιο), λόγω της φύσης του υδρογόνου. Η ανάπτυξη φθινοτέρων και ενεργότερων ανόδων είναι ένα ακόμα ζήτημα της τεχνολογίας αυτής.<sup>[23]</sup>

### **Απώλειες και βαθμός απόδοσης:**

Το δυσκολότερο τμήμα της ηλεκτρόλυσης είναι η ημιαντίδραση της ανόδου, καθώς είναι πολύ σύνθετη (πολλαπλά ενδιάμεσα στάδια) ως αντίδραση. Συνεπώς, οι εντονότερες απώλειες οφείλονται στην υπέρταση της ανόδου, καθώς και στις ιονικές απώλειες από την αντίσταση της μεμβράνης (έως και κατά 90%) – οι ηλεκτρονιακές απώλειες και η υπέρταση της καθόδου συνεισφέρουν ελάχιστα.

Απώλειες ηλεκτρικής αγωγιμότητας των ηλεκτροδίων προκαλεί η πορώδης μορφή τους, που αυξάνει μεν την ενεργή επιφάνεια, μα αυξάνει επίσης και τη μέση διαδρομή του ρεύματος. Οι συνήθεις τάσεις λειτουργίας είναι τα 1,7 με 1,8 V, που αντιστοιχούν σε πυκνότητες ρεύματος ως και 10 A/cm<sup>2</sup> και βαθμό απόδοσης της τάξης του 88% (HHV), ενώ η απόδοση του ρεύματος μπορεί να φτάσει ως και το 98%. (Πηγή: <http://ecst.ecsdl.org/content/33/1/3.full.pdf>)<sup>[24]</sup>

### **Παρατήρηση:**

Στην πράξη, η απόδοση της ηλεκτρόλυσης τύπου PEM είναι χαμηλότερη, διότι χρειάζεται να προσδοθεί επιπλέον ρεύμα προκειμένου να γίνει η απόσταση του νερού. Προκειμένου να παραχθεί νερό απαιτούμενης καθαρότητας, ανά κανονικό κυβικό μέτρο παραγόμενου υδρογόνου χρειάζονται τουλάχιστον 0,73 kWh για μονή απόσταση και 1,5 kWh για διπλή. Συγκριτικά, η τάση λειτουργίας 1,7V αντιστοιχεί σε κατανάλωση 4,07 ανά κανονικό κυβικό μέτρο παραγόμενου υδρογόνου.

## SOEC Ηλεκτρόλυση

Η ηλεκτρόλυση τύπου SOEC (Solid Oxide Electrolyser Cell) αποτελεί τεχνολογία η οποία κάνει χρήση στερεού (κεραμικού) ηλεκτρολύτη έναντι υδατικού διαλύματος ή μεμβράνης. Πρόκειται στην ουσία για αντίστροφη λειτουργία από κυψέλες καυσίμου τύπου SOFC.

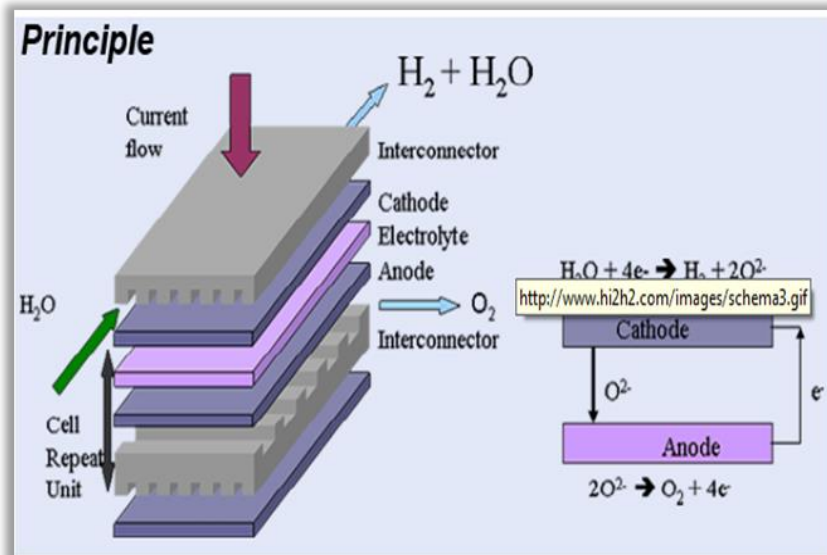
Ως τεχνολογία μπορεί να χρονολογηθεί από το 1902 (ταυτόχρονα με τις πρώτες εμπορικές μονάδες συμβατικής ηλεκτρόλυσης), όπου και αναπτύχθηκε από τον Nerst ο ηλεκτρολύτης YSZ για υψηλές

θερμοκρασίες και ο οποίος αποτελεί τον ηλεκτρολύτη αναφοράς τόσο για SOFC όσο και για SOEC. Αν και παλαιότερη στη σύλληψή της από την ηλεκτρόλυση τύπου PEM, καθυστέρησε να αναπτυχθεί λόγω των εξαιρετικά υψηλών θερμοκρασιών λειτουργίας που απαιτεί. Από τη δεκαετία του '80 όμως και μετά έχει ανανεωθεί το ενδιαφέρον, κυρίως λόγω της υψηλότερης απόδοσής της. Συνήθως μελετάται σε συνδυασμό με βιομηχανικές εγκαταστάσεις που διαχειρίζονται υψηλές θερμοκρασίες (700 °C – 1000 °C), όπως τα πυρηνικά εργοστάσια. [23]

### Περιγραφή συστήματος:

Καθώς ο ηλεκτρολύτης είναι αυτός που χαρακτηρίζει το εκάστοτε σύστημα, η SOEC ηλεκτρόλυση είναι πιο κοντά στη PEM ηλεκτρόλυση παρά στην αλκαλική, λόγω του στερεού ηλεκτρολύτη. Η διαφορά έγκειται στις υψηλές θερμοκρασίες λειτουργίας, η διαχείριση των οποίων απαιτεί άλλα υλικά κατασκευής. Μια ακόμα βασική διαφορά από τις άλλες τεχνολογίες είναι πως το νερό βρίσκεται πλέον σε μορφή ατμού. Η αρχή λειτουργίας λοιπόν έχει ως εξής: επιβάλλοντας διαφορά δυναμικού σε ένα κελί το οποίο τροφοδοτείται με ατμό, συνεχές ρεύμα το διαπερνά διαμέσου του κεραμικού ηλεκτρολύτη, με αποτέλεσμα να απελευθερώνεται αέριο υδρογόνο στη κάθοδο και αέριο οξυγόνο στην άνοδο. [23]

Η τεχνολογία αυτή παρουσιάζει υψηλότερο βαθμό απόδοσης από τις άλλες δύο (και μάλιστα τον υψηλότερο βαθμό απόδοσης γενικότερα), χάρη στη βελτιωμένη θερμοδυναμική και χημική κινητική της αντίδρασης στις συνθήκες λειτουργίας. Οι αυξημένες όμως θερμοκρασίες λειτουργίας απαιτούν μεγαλύτερους χρόνους εκκίνησης και παύσης (αν κι όταν αποκατασταθεί η λειτουργία, μπορεί να διαχειρίζεται αποδοτικά μεταβολές του φορτίου), καθώς και προκύπτει ανάγκη για μέριμνα σε θέματα όπως η θερμική διαστολή και η χημική αστάθεια. [23]



Σχήμα 3-11: SOEC Ηλεκτρόλυση

(Πηγή: <http://www.hi2h2.com/theory.htm>)<sup>[28]</sup>

Ένα επιπλέον ζήτημα είναι πως το νερό τροφοδοτείται πλέον σε μορφή ατμού, άρα αυτό που δεν αντέδρασε αναμιγνύεται με το παραγόμενο υδρογόνο και χρειάζονται περαιτέρω διαδικασίες για το διαχωρισμό και την απομάκρυνσή του. [23]

Ένα αξιόλογο πάντως πλεονέκτημα της λειτουργίας στις

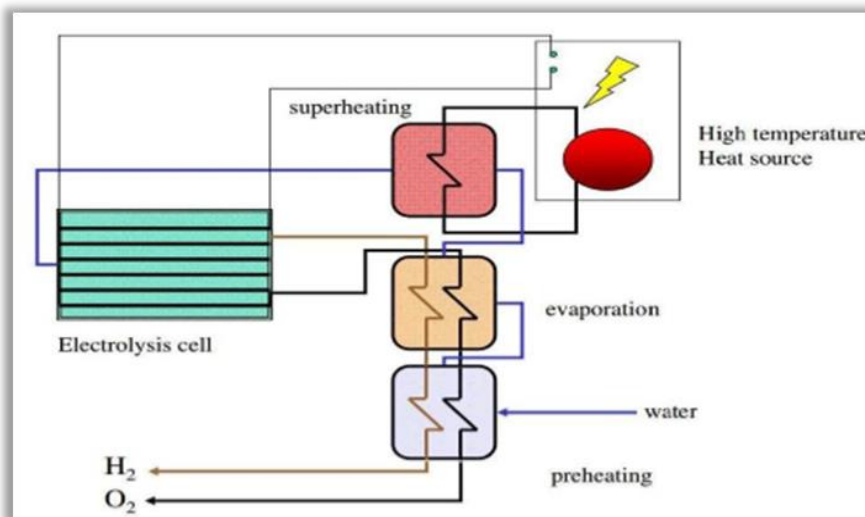
θερμοκρασίες αυτές είναι η αντιστρεψιμότητα των μονάδων τύπου SOEC χωρίς ουσιαστική υποβάθμιση του βαθμού απόδοσης – στις υψηλότερες θερμοκρασίες οι αντιδράσεις είναι πιο αντιστρέψιμες. Εάν αποσυνδεθεί η εξωτερική πηγή και τροφοδοτηθεί με καύσιμο όπως υδρογόνο (ή μεθάνιο κι άλλοι υδρογονάνθρακες), σε συνδυασμό με οξυγόνο (ή και ατμοσφαιρικό αέρα), μπορεί να λειτουργήσει ως κυψέλη καυσίμου. Κάτι τέτοιο δε μπορεί να γίνει στις μονάδες τύπου PEM, οι οποίες αδυνατούν να δουλέψουν αντίστροφα χωρίς κάποια επίπτωση στην απόδοση, καθώς συνήθως σχεδιάζονται βέλτιστα προς μια κατεύθυνση. Στη συμβατική ηλεκτρόλυση δεν τίθεται καν η έννοια της αντιστρεψιμότητας. [23]

**Σημείωση:** η υποβάθμιση ενός τέτοιου συστήματος είναι εντονότερη κατά τη λειτουργία του ως ηλεκτρολυτικό κελί παρά ως γαλβανικό.

#### Συνθήκες λειτουργίας:

Ως ηλεκτρόλυση υψηλών θερμοκρασιών χαρακτηρίζεται αυτή που λαμβάνει χώρα σε περιοχές 700°C – 1000°C, με τα τυπικά εύρη λειτουργίας της τεχνολογίας SOEC να εξαρτώνται κάθε φορά από το υλικό του ηλεκτρολύτη (συνήθως 800°C - 1000°C για YSZ). Πάντως, καθώς ο βασικός σχεδιασμός προβλέπει την αγωγή ανιόντων οξυγόνου, η ιονική περατότητά του συναντά κινητικά φράγματα για θερμοκρασίες κάτω από 600°C. Καθώς η αντίδραση της ηλεκτρόλυσης είναι αυξανόμενα ενδόθερμη συναρτήσει της θερμοκρασίας, ευνοείται στις υψηλότερες θερμοκρασίες. Επιπροσθέτως, το θερμότερο αυτό περιβάλλον συνεισφέρει περισσότερο στις ενεργειακές της ανάγκες, με αποτέλεσμα να απαιτείται λιγότερος ηλεκτρισμός, ο οποίος είναι και ακριβότερος. Για παράδειγμα, η αναλογία ΔG/ΔH είναι περίπου 93% στους 100°C και περίπου 70% στους 1000°C. Η λειτουργία του συστήματος σε αυτές τις ακραίες συνθήκες έχει έντονο αντίκτυπο στα υλικά, με αποτέλεσμα να είναι συχνό το φαινόμενο της αποκόλλησης του ηλεκτροδίου του οξυγόνου. Το γεγονός αυτό είναι χαρακτηριστικό κατά τη μακρόχρονη λειτουργία του συστήματος, εμποδίζοντας έτσι τη πρακτική χρήση της τεχνολογίας αυτής για τη παραγωγή υδρογόνου. [23]

Μια εναλλακτική που μελετάται είναι η χρήση ηλεκτρολυτών περατών από κατιόντα υδρογόνου (πρωτόνια). Το πλεονέκτημα αυτής της εναλλακτικής είναι πως ο ατμός που δεν αντιδρά θα είναι σε διαφορετικό ρεύμα από το υδρογόνο, επιτρέποντας έτσι πολύ καθαρό προϊόν. Επιπροσθέτως, δε θα



Σχήμα 3-12: Διάταξη SOEC ηλεκτρόλυσης [23]

υπάρχουν τα ανάλογα κινητικά φράγματα (για την αγωγή των ανιόντων οξυγόνου), οπότε και θα είναι δυνατή η λειτουργία σε χαμηλότερες θερμοκρασίες. Επίσης, πειράματα έχουν δείξει πως οι αγωγοί πρωτονίων μπορούν να άγουν και ανιόντα σε υψηλότερες θερμοκρασίες. Προς το παρόν πάντως, τίθενται θέματα με τη χημική τους σταθερότητα, καθώς και με την αλληλεπίδρασή τους με τα άλλα συστατικά του κελιού. <sup>[23]</sup>

### **Υλικά κατασκευής:**

Τα υλικά κατασκευής του ηλεκτρολύτη και των ηλεκτροδίων σε ένα ηλεκτρολυτικό κελί τύπου SOEC είναι αντίστοιχα με αυτά ενός γαλβανικού τύπου SOFC, μιας και όπως έχει ήδη εξηγηθεί, οι μονάδες αυτές δουλεύουν πολύ ικανοποιητικά κι αμφίδρομα. Επίσης, σε αυτές τις θερμοκρασίες λειτουργίας τα φράγματα ενεργοποίησης είναι αρκετά μειωμένα, με αποτέλεσμα να μην απαιτείται η χρήση ακριβών καταλυτών όπως η πλατίνα. Τυπικά πάχη είναι μερικές εκατοντάδες μικρόμετρα, με τον ηλεκτρολύτη και την άνοδο να έχουν αντίστοιχα πάχη ενώ η κάθοδος είναι λεπτότερη (ενδεικτικά: 300 μm, 250 μm και 100 μm αντίστοιχα). Ο ηλεκτρολύτης αποτελείται από μια πυκνή στρώση κεραμικού υλικού, με δημοφιλέστερο το YSZ, δηλαδή διοξείδιο του ζirkονίου (zirconia,  $ZrO_2$ ) σταθεροποιημένο με 8% κατά mole οξείδιο του υττρίου (yttria,  $Y_2O_3$ ). Το υλικό αυτό παρουσιάζει υψηλή ιονική αγωγιμότητα, καθώς και χημική και θερμική σταθερότητα σε θερμοκρασίες λειτουργίας 800°C-1000°C. Αντίστοιχο υλικό είναι το ScSZ, δηλαδή ζirkονία σταθεροποιημένη με οξείδιο του σκανδίου (scandia,  $Sc_2O_3$ ). <sup>[23]</sup>

Για χαμηλότερες θερμοκρασίες (600°C - 800°C), έχουν προταθεί ηλεκτρολύτες με βάση οξειδία λανθανίου-γαλλίου, συχνά με προσμίξεις στροντίου και μαγνησίου (Mg), καθώς και διάφοροι ηλεκτρολύτες με βάση το δημήτριο (Ce) διαφόρων προσμίξεων, όπως το σκάνδιο, το γαδολίνιο (Gd) και το σαμάριο (Sm) – τα υλικά αυτά έχουν βρεθεί να παρουσιάζουν ιονικές αγωγιμότητες ακόμα μεγαλύτερες από το YSZ. Καθώς όμως σε υψηλότερες τάσεις το δημήτριο τείνει να ανάγεται (από τετρασθενές σε τρισθενές) και να υποβαθμίζεται η ιονική του αγωγιμότητα, είναι αμφίβολη η χρήση του σαν υλικό κατά την ηλεκτρόλυση. <sup>[23]</sup>

Ως υλικό της καθόδου είθισται να χρησιμοποιείται ένα πορώδες κεραμομεταλλικό (Ni-YSZ), αποτελούμενο από YSZ (κεραμικό οξείδιο) και νικέλιο (μέταλλο). Αν και προτιμάται χάρη στην ιδιότητα επικόλλησής του στον ηλεκτρολύτη, σε συνθήκες υψηλών παροχών ατμού υποβαθμίζεται η λειτουργία του, και τα σωματίδια του νικελίου τείνουν να οξειδώνονται (προς οξείδιο του νικελίου). Εναλλακτικά υλικά, που έρευνες δείχνουν μάλιστα πως είναι πιο ενεργά από το Ni-YSZ, αποτελούν νικέλιο με SDC, δηλαδή οξείδιο του δημητρίου με προσμίξεις οξειδίου του σαμαρίου (samaria,  $Sm_2O_3$ ), καθώς και σύνθετα οξείδια του τιτανίου και του δημητρίου ή το LSCM, δηλαδή μαγγανίτης λανθανίου-στροντίου-χρωμίου. <sup>[23]</sup>

Τέλος, ως υλικό της ανόδου είθισται να χρησιμοποιείται το LSM, δηλαδή μαγγανίτης λανθανίου-στροντίου ( $La_{1-x}Sr_xMnO_3$ ), συνήθως σε συνδυασμό με το YSZ. Άλλα υλικά κατασκευής που έχουν προταθεί είναι ο φερρίτης λανθανίου-στροντίου (LSF), ο φερρίτης λανθανίου-στροντίου-χαλκού (LSCuF) και ο φερρίτης λανθανίου-στροντίου-κοβαλτίου (LSCoF). Τα υλικά αυτά φέρονται ως πιο ενεργά καταλυτικά από το LSM κατά την ηλεκτρόλυση, μα για αντιστρέψιμη λειτουργία το LSM φαίνεται να παραμένει σταθερότερο. Γενικώς στην άνοδο, οι υψηλές μερικές πιέσεις του οξυγόνου υποβαθμίζουν τη ποιότητα της ηλεκτρόλυσης και μειώνουν τη σταθερότητα του ηλεκτροδίου, οδηγώντας ακόμα και σε αποκόλληση. <sup>[23]</sup>

### **Απώλειες και βαθμός απόδοσης:**

Οι υψηλές θερμοκρασίες του κελιού μειώνουν και την εσωτερική του αντίσταση, άρα και τις ωμικές απώλειες. Στις υψηλές θερμοκρασίες όπου πραγματοποιείται η ηλεκτρόλυση τύπου SOEC, η μέση τάση λειτουργίας είναι περίπου 1 - 1,1 V, που αντιστοιχεί σε βαθμό απόδοσης ως και 135% (με 1,29V η θερμοουδέτερη τάση). Το ποσοστό αυτό προκύπτει μεγαλύτερο του 100%, διότι το κελί λειτουργεί κάτω από τη θερμοουδέτερη τάση. Βέβαια, θα πρέπει να ληφθεί υπόψιν και η ενέργεια που πρέπει να καταναλωθεί για την ατμοποίηση του νερού, σε περίπτωση που αυτό τροφοδοτείται ως υγρό. Τέλος, ο βαθμός απόδοσης του ρεύματος αγγίζει το 100%.

(Πηγή: <http://solidcell.com/techElectrolyzer.htm>)<sup>[22]</sup>

### **3.1.3 Δέσμευση και διαχωρισμός διοξειδίου του άνθρακα**

#### **Διαχωρισμός μέσω προσρόφησης**

Προσρόφηση ονομάζεται η φυσική δέσμευση των μορίων ενός ρευστού (υγρού ή αερίου) στην επιφάνεια ενός στερεού, όταν βρίσκονται στην εγγύτητά της. Τα προσροφητικά υλικά είναι στερεά και πορώδη, με μεγάλη ειδική επιφάνεια. Καθώς τα μόρια διαφορετικών στοιχείων/ενώσεων αλληλοεπιδρούν διαφορετικά με την επιφάνεια του προσροφητή, καθίσταται δυνατός ο διαχωρισμός τους. Πρόκειται για φαινόμενο επιφανειακό. Όταν το προσροφητικό υλικό έρθει σε επαφή με το ρευστό, μετά από συγκεκριμένο χρονικό διάστημα επιτυγχάνεται μια κατάσταση ισορροπίας. Η ισορροπία αυτή καθορίζει το θερμοδυναμικό όριο στο φορτίο του προσροφητικού για μια συγκεκριμένη κατάσταση του ρευστού, όσον αφορά στη συγκέντρωση, τη πίεση και τη θερμοκρασία. Με το που αυτή επέλθει, η ικανότητα προσρόφησης σταματά και το προσροφητικό υλικό πρέπει να αναγεννηθεί. Πηγή:(<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3947793/>)<sup>[30]</sup>

Ο χρόνος που απαιτείται για την επίτευξη αυτής της κατάστασης ισορροπίας καθορίζεται από τους παραπάνω παράγοντες, μα και από άλλους όπως το μέγεθος των πόρων του προσροφητή συγκριτικά με το μέγεθος των μορίων του ρευστού, τη ταχύτητα προσρόφησης κ.α. Για σύνθετο μίγμα, για το κάθε επιμέρους συστατικό θα επέλθει μια ξεχωριστή ισορροπία, η οποία θα αντικατοπτρίζει την ικανότητα προσρόφησης του.<sup>[30]</sup>

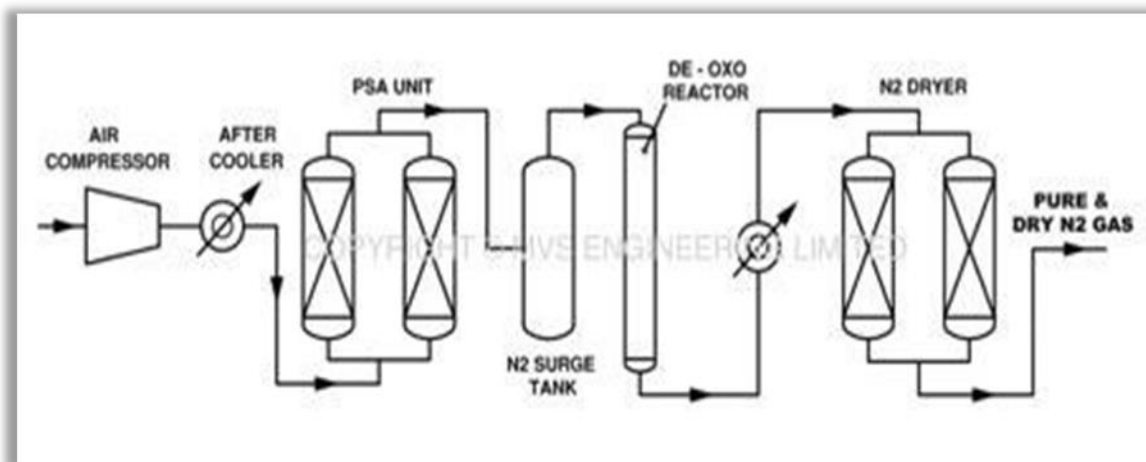
Η λειτουργία διαχωρισμού βασίζεται στην αρχή ότι το λιγότερο προσροφόμενο (ελαφρύτερο) συστατικό θα διαπεράσει τη στήλη γρηγορότερα από τα υπόλοιπα. Προκειμένου να επιτευχθεί διαχωρισμός πρώτου και τα υπόλοιπα (βαρύτερα) συστατικά διαπεράσουν τη στήλη, θα πρέπει η τροφοδοσία να διακόπτεται και το προσροφητικό να αναγεννάται, με εκρόφηση των βαρέων συστατικών. Καθώς η σταθερά της προσρόφησης αντιστοιχεί κάθε φορά σε συγκεκριμένες συνθήκες λειτουργίας (σύσταση, θερμοκρασία, πίεση), η αναγέννηση του προσροφητικού είναι δυνατή αλλάζοντας μία από αυτές τις παραμέτρους της διεργασίας. Καθώς βέβαια πρέπει να πραγματοποιηθεί και το δεύτερο στάδιο (εκρόφηση) προτού να μπορέσει να επαναληφθεί το πρώτο (προσρόφηση), αυτές οι τεχνολογίες διαχωρισμού δεν είναι αδιάλλειπτες, μα έχουν χρόνους διαρκείας κύκλου εξαρτώμενους από την εκάστοτε μέθοδο. Η χρήση πολλαπλών παράλληλων στηλών όμως μπορεί να προσδώσει συνεχή χαρακτήρα λειτουργίας.<sup>[30]</sup>

## 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.<sup>[30]</sup>

### 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.<sup>[30]</sup>



Σχήμα 3-13: Διάταξη διαχωρισμού αερίων μέσω PSA

Πηγή: (<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3947793/>)<sup>[30]</sup>

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.<sup>[30]</sup>

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.<sup>[30]</sup>

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.<sup>[30]</sup>

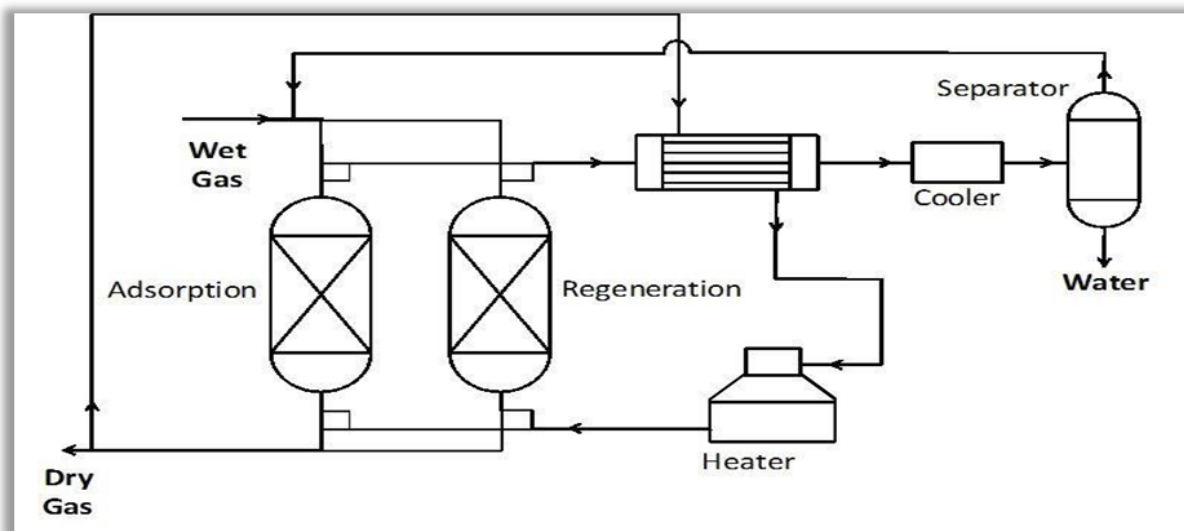
Κατά την διαδικασία δέσμευσης CO<sub>2</sub> σε πυκνότητα 40% κατ' όγκον με την τεχνολογία PSA απαιτείται κατανάλωση ενέργειας 0,22-0,25 kWh/m<sup>3</sup> των καυσαερίων που διατίθενται από διάφορες πηγές παραδείγματος χάρη από σταθμούς καύσης βιομάζας, μπορούμε να βρούμε την αντίστοιχη ενέργεια για την δέσμευση του από τσιμεντοβιομηχανίες χαλυβουργίες κ.α.*(Πηγή:stucki-2011-biogas-substrates.pdf(http://www.esu-services.ch/fileadmin/download/publicLCI/stucki-2011-biogas-substrates.pdf)<sup>[42]</sup>*

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 επιτεύεται 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.<sup>[30]</sup>

### **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.<sup>[30]</sup>

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.<sup>[30]</sup>



Σχήμα 3-14: Διάταξη διαχωρισμού αερίων μέσω TSA<sup>[30]</sup>

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. <sup>[30]</sup>

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. <sup>[30]</sup>



## Κεφάλαιο 4. Περιβαλλοντική Ανάλυση Κύκλου Ζωής-AKZ

Η Ανάλυση Κύκλου Ζωής (AKZ) είναι μια τεχνική εκτίμησης των περιβαλλοντικών επιπτώσεων που συνδέονται με προϊόν, διεργασία ή δραστηριότητα, προσδιορίζοντας και ποσοτικοποιώντας την ενέργεια και τα υλικά που χρησιμοποιούνται, καθώς και τα απόβλητα που



Σχήμα 4-01: Απεικόνιση σταδίων κύκλου ζωής προϊόντος.

(Πηγή: [http://www.solidworks.com/sustainability/design/2722\\_ENU\\_HTML.htm](http://www.solidworks.com/sustainability/design/2722_ENU_HTML.htm))<sup>[40]</sup>

απελευθερώνονται στο περιβάλλον. Σε επόμενο στάδιο υπολογίζονται οι επιπτώσεις από τη χρήση της ενέργειας και των υλικών καθώς και των αποβλήτων και εκτιμώνται οι δυνατότητες περιβαλλοντικών βελτιώσεων. Η ανάλυση περιλαμβάνει ολόκληρο τον κύκλο ζωής (Σχήμα 4-01) ενός προϊόντος, μιας διεργασίας ή μίας δραστηριότητας, δηλαδή την εξαγωγή και επεξεργασία

πρώτων υλών, την κατασκευή, μεταφορά, διανομή, χρήση, συντήρηση και διαχείριση των αποβλήτων (Πηγή: SETAC, 1993)<sup>[35]</sup>.

Ο οργανισμός SETAC (Society of Environmental Toxicology And Chemistry) ορίζει τη διαδικασία της Ανάλυσης Κύκλου Ζωής ως εξής: «Η ανάλυση του κύκλου ζωής είναι μια αντικειμενική μέθοδος για την αξιολόγηση των περιβαλλοντικών φορτίων που συνδέονται με ένα προϊόν, μια διεργασία ή μια δραστηριότητα με αναγνώριση και υπολογισμό της ενέργειας και των υλικών που χρησιμοποιούνται και των εκπομπών τους στο περιβάλλον και η αξιολόγηση και η εκμετάλλευση ευκαιριών για επίτευξη περιβαλλοντικών βελτιώσεων. Η εκτίμηση καλύπτει ολόκληρο τον κύκλο ζωής του προϊόντος, της διεργασίας ή της δραστηριότητας, συμπεριλαμβάνοντας την παραλαβή και επεξεργασία πρώτων υλών, τη μεταποίηση, τη μεταφορά και τη διανομή, τη χρήση ή την επαναχρησιμοποίηση, τη συντήρηση, την ανακύκλωση και την τελική απόθεση». Το κίνητρο ανάπτυξης της AKZ συγκεντρώνεται γύρω από την ανάγκη για σύγκριση υλικών και διεργασιών προκειμένου να προσδιοριστεί το βέλτιστο από περιβαλλοντικής άποψης, καταγράφοντας και ελέγχοντας όλα τα στάδια της ζωής τους.<sup>[35]</sup>

Με δεδομένο ότι όλα τα στάδια της ζωής ενός προϊόντος/συστήματος συνεισφέρουν στους συνολικούς ρύπους, οποιαδήποτε αλλαγή σε κάποιο από τα στάδια αυτά είναι πιθανόν να έχει θετικές ή αρνητικές συνέπειες στα υπόλοιπα στάδια τόσο στις εκπομπές ρύπων, όσο και στην κατανάλωση ενέργειας και πρώτων υλών. Η πρακτική που συνήθως ακολουθείται αφορά την εστίαση σε συγκεκριμένο μέσο (αέρα, ύδατα ή έδαφος) με αποτέλεσμα να παραβλέπεται η «μεταφορά ρύπων» από ένα μέσο σε άλλο (π.χ. δέσμευση αέριων ρύπων μέσω καταιονιστήρων) (Πηγή: Καρβούνης και Γεωργακέλλος, 2003)<sup>[31]</sup>

Γενικός σκοπός της AKZ είναι να αποτιμήσει τις επιδράσεις από τη χρήση ενέργειας και την επεξεργασία υλικών, συμπεριλαμβανομένης της απόρριψης αποβλήτων στο περιβάλλον και να εκτιμήσει τις δυνατότητες επίτευξης περιβαλλοντικών βελτιώσεων σε συνδυασμό με την ορθολογική χρήση πρώτων υλών και ενέργειας σε κάθε στάδιο του κύκλου ζωής ενός προϊόντος.<sup>[31]</sup>

Οι ρίζες της AKZ επεκτείνονται πίσω στη δεκαετία του '70 όταν αναπτύχθηκαν τεχνικές για ενεργειακούς και περιβαλλοντικούς υπολογισμούς κατά το στάδιο του σχεδιασμού προϊόντων. Μέχρι τα τέλη της δεκαετίας του '80 τα οφέλη της τεχνικής έγιναν αισθητά στη βιομηχανία, ενώ στις αρχές της δεκαετίας του '90 ένα κύμα ερευνητικών προγραμμάτων έδωσε ιδιαίτερη ώθηση στην AKZ. Εντούτοις, θεωρείται ότι η καθιέρωσή της ως περιβαλλοντικό εργαλείο έγινε μόλις στα τέλη της δεκαετίας του '90 με την έκδοση της σχετικής σειράς διεθνών προτύπων ISO 14040 – 14049, (Πηγή: Curran, 1996)<sup>[34]</sup>. Η σειρά προτύπων ανανεώθηκε το 2006 (ISO 14040:2006 - 14049:2006).

Ένα από τα κύρια πλεονεκτήματα της AKZ αποτελεί η συστηματική προσέγγιση του αντικείμενου της μελέτης, που έχει ως συνέπεια την αποφυγή της μετάθεσης των περιβαλλοντικών επιπτώσεων από το ένα στάδιο του κύκλου ζωής σε άλλο, όπως και τον συνυπολογισμό των έμμεσων επιπτώσεων εκτός τοπικών-εθνικών ορίων. (Πηγή: WEC, 2004 <http://www.worldenergy.org/documents/lca2.pdf>)<sup>[36]</sup>

Στον αντίποδα, το βασικό μειονέκτημα της μεθόδου είναι ότι απαιτεί μεγάλο αριθμό λεπτομερών δεδομένων, χρόνο και εξειδικευμένη γνώση για την εφαρμογή της. Επίσης, βασικό περιορισμό της AKZ αποτελεί το ότι δεν λαμβάνει υπόψη στοιχεία σχετικά με κόστη ή τεχνική αποδοτικότητα.

Κατά συνέπεια, εντός ενός πλαισίου συνολικής αξιολόγησης, καθίσταται αναγκαίος ο συνδυασμός της ΑΚΖ με μεθοδολογίες/πηγές που συνεισφέρουν την αντίστοιχη πληροφορία.<sup>[36]</sup>

Η τεχνική εφαρμογής της ΑΚΖ βασίζεται στη δημιουργία ενός είδους μοντέλου ρεαλιστικής καταγραφής των ενδιάμεσων σταδίων του κύκλου ζωής ενός συστήματος. Το στατικό μοντέλο προσομοίωσης της ΑΚΖ αποτελείται από διεργασίες, η κάθε μια από τις οποίες αντιπροσωπεύει μια ή περισσότερες δραστηριότητες. Στην ακόλουθη ενότητα περιγράφονται τα βασικά στάδια εφαρμογής της μεθοδολογίας της ΑΚΖ όπως και η αλληλοσυσχέτισή τους.

## 4.1 Η Μεθοδολογία της Ανάλυσης Κύκλου Ζωής-ΑΚΖ

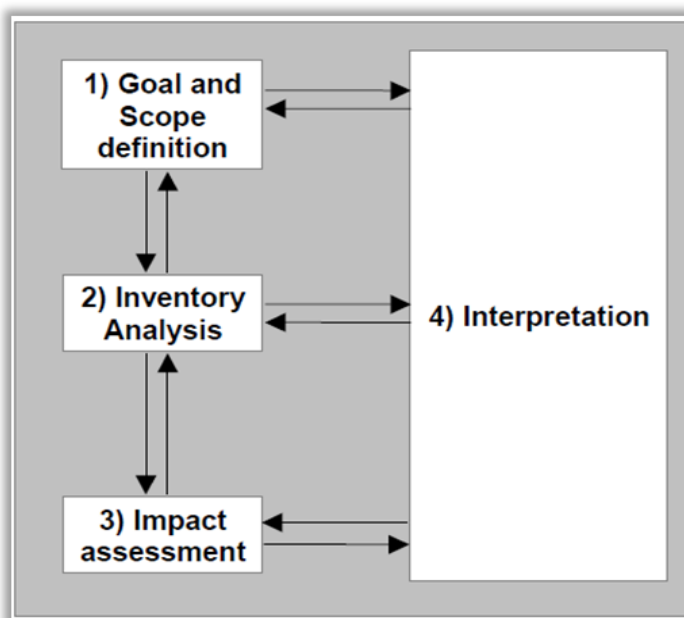
Η εφαρμογή της ΑΚΖ χωρίζεται σε τέσσερα βασικά στάδια (Σχήμα 4-02):

- Προσδιορισμός του σκοπού και του αντικειμένου της μελέτης (Goal and scope definition). Περιγράφεται το προϊόν, η διαδικασία ή η υπηρεσία η οποία θα αναλυθεί, ορίζεται το πλαίσιο στο οποίο θα κινηθεί η ανάλυση και καθορίζονται τα όρια αυτής όπως και οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις που θα ληφθούν υπόψη.

- Απογραφή δεδομένων (Life Cycle Inventory Analysis). Στο στάδιο αυτό αναγνωρίζονται και ποσοτικοποιούνται η ενέργεια, το νερό και οι πρώτες ύλες που χρησιμοποιούνται, καθώς και οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις από τον κύκλο ζωής του προϊόντος/διαδικασίας/υπηρεσίας που αναλύεται.

- Εκτίμηση επιπτώσεων κύκλου ζωής (Life Cycle Impact Assessment). Αποτιμώνται οι επιπτώσεις των παραμέτρων που απογράφησαν στον άνθρωπο και το περιβάλλον. Η εκτίμηση των επιπτώσεων αποτελείται από τρία μέρη: i) ταξινόμηση ii) χαρακτηρισμό iii) αξιολόγηση.

- Ερμηνεία αποτελεσμάτων - Εκτίμηση βελτιώσεων (Interpretation). Αξιολογούνται τα αποτελέσματα των δύο προηγούμενων σταδίων, ώστε να επιλεγεί το βέλτιστο προϊόν, διαδικασία ή υπηρεσία, με πλήρη κατανόηση των αβεβαιοτήτων και υποθέσεων που οδηγούν στο συγκεκριμένο αποτέλεσμα. Βάσει της ανάλυσης που έχει προηγηθεί προτείνονται επεμβάσεις που θα βελτιώσουν τη συνολική περιβαλλοντική επίδοση. (Πηγή: EPA, 2001)<sup>[37]</sup> & <sup>[35]</sup>



Σχήμα 4-02: Μεθοδολογία Ανάλυσης Κύκλου Ζωής (Πηγή: <http://www.start2see.com.au/site/index.php/life-cycle-services/life-cycle-assessments>)<sup>[33]</sup>

### 4.1.1 Σκοπός και Πλαίσιο της Ανάλυσης Κύκλου Ζωής-AKZ

Ο καθορισμός του σκοπού και πλαισίου της ανάλυσης είναι ένα ιδιαίτερα σημαντικό στάδιο στην εφαρμογή της τεχνικής γιατί από αυτό εξαρτώνται οι απαιτήσεις σε χρόνο, ανθρώπινο δυναμικό και οικονομικούς πόρους. Επιπρόσθετα, το μοντέλο του κύκλου ζωής αναπόφευκτα περιέχει πλήθος απλοποιήσεων και παραδοχών. Ο ξεκάθαρος ορισμός του σκοπού και πλαισίου της ανάλυσης είναι για τον χρήστη ένα κομβικό σημείο κατά το οποίο θα πρέπει να βεβαιωθεί ότι οι παραδοχές και απλοποιήσεις αυτές θα είναι τέτοιες που δεν θα επιφέρουν σημαντική αλλοίωση στο τελικό αποτέλεσμα.

Σημαντικά ζητήματα που συνδέονται με το σκοπό και το πλαίσιο της AKZ, είναι:

- Η ακριβής αποτύπωση του σκοπού εφαρμογής της AKZ
- Ο λεπτομερής καθορισμός του κύκλου ζωής και της χρήσης του προϊόντος
- Ο καθορισμός της λειτουργικής μονάδας
- Ο ορισμός και περιγραφή των ορίων του συστήματος
- Καθορισμός του σκοπού και του πλαισίου της μελέτης
- Συλλογή και καταγραφή δεδομένων (εισροές & εκροές)
- Αξιολόγηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων
- Ερμηνεία και κατανόηση πληροφοριών, δεδομένων και αποτελεσμάτων AKZ
- Καθορισμός των ποιοτικών προδιαγραφών για τα στοιχεία που θα χρησιμοποιηθούν
- Οι υποθέσεις, περιορισμοί και απαιτήσεις για την επακόλουθη ερμηνεία
- Το ακροατήριο στο οποίο τα αποτελέσματα θα διαχυθούν και ο τρόπος που θα εφαρμοστούν
- Ο τύπος και η μορφή της έκθεσης για τη μελέτη

(Πηγή: [Phd-Dimitrios\\_Giannopoulos.pdf](#))<sup>[39]</sup>

Ο καθορισμός του σκοπού και του πλαισίου προκύπτει από την ανάγκη για συνέπεια κατά τη διάρκεια της εφαρμογής της AKZ. Στην πράξη, το πλαίσιο της μελέτης είναι ο προσδιορισμός του επιπέδου λεπτομέρειας που απαιτείται για την εφαρμογή των αποτελεσμάτων. Το αποτέλεσμα της μελέτης εξαρτάται κυρίως από την ακρίβεια των στοιχείων που εισάγονται.<sup>[37]</sup>

### **Λειτουργική Μονάδα**

Η λειτουργική μονάδα αποτελεί το μέτρο της λειτουργίας του συστήματος υπό μελέτη και παρέχει μια αναφορά τόσο για τα εισαγόμενα στοιχεία όσο και για τα αποτελέσματα, επιτρέποντας τη σύγκριση δύο διαφορετικών συστημάτων. Ο καθορισμός μιας λειτουργικής μονάδας πιθανό να είναι δύσκολος, καθώς αυτή πρέπει να είναι ακριβής και συγκρίσιμη έτσι ώστε να μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε ολόκληρη τη μελέτη.<sup>[37]</sup>

## Όρια Συστήματος

Τα όρια του συστήματος καθορίζουν ποιες 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 (π.χ. παραγωγή κεφαλαιουχικών αγαθών).<sup>[34]</sup>

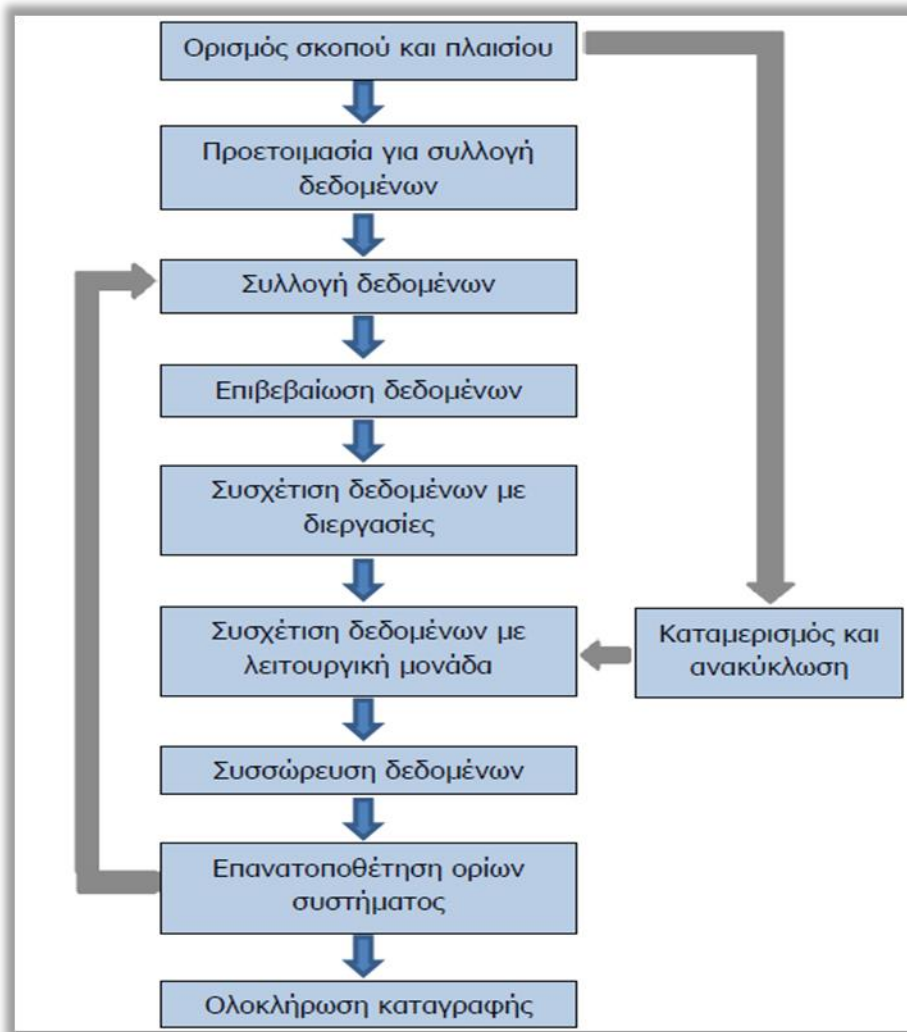
## Ποιότητα δεδομένων

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.

(Πηγή:[http://dspace.lib.ntua.gr/bitstream/handle/123456789/2934/lazoglouk\\_wastemanagement.pdf?sequence=](http://dspace.lib.ntua.gr/bitstream/handle/123456789/2934/lazoglouk_wastemanagement.pdf?sequence=))<sup>[32]</sup>

## Συλλογή Δεδομένων: 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 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 εξαγωγές πρώτων υλών όσο και οι περιβαλλοντικές εκπομπές που σχετίζονται με τη συνολική διεργασία, θα πρέπει να καταμερίζονται στα διαφορετικά προϊόντα της διεργασίας.<sup>[32]</sup>



Σχήμα 4-03: Συλλογή Δεδομένων- Καταγραφή Κύκλου Ζωής<sup>[32]</sup>

Η συλλογή δεδομένων είναι το στάδιο με τις μεγαλύτερες απαιτήσεις σε πόρους και χρόνο σε μία ΑΚΖ. Στο Σχήμα 4-03 απεικονίζονται οι απαιτήσεις σε στοιχεία κατά τη διάρκεια μίας ΑΚΖ, σύμφωνα με το πρότυπο ISO 14041. (Πηγή: ISO, 2006)<sup>[38]</sup>

Κατά την εφαρμογή της ΑΚΖ, εμφανίζονται συχνά κοινές διεργασίες, όπως, η προμήθεια ενέργειας, οι μεταφορές, οι υπηρεσίες επεξεργασίας αποβλήτων και η παραγωγή χημικών ουσιών. Οι διεργασίες αυτές ονομάζονται διεργασίες υποδομών (background processes). Τα τελευταία χρόνια έχουν αναπτυχθεί και είναι διαθέσιμες βάσεις δεδομένων με στοιχεία για πολλές από αυτές. Η επαναχρησιμοποίηση στοιχείων από προηγούμενες μελέτες μπορεί να απλοποιήσει την εργασία συλλογής δεδομένων, εντούτοις αυτό πρέπει να γίνεται με προσοχή έτσι ώστε τα δεδομένα να είναι αντιπροσωπευτικά. Τα δεδομένα που αφορούν το συγκεκριμένο εξεταζόμενο σύστημα αναφέρονται ως «foreground data».<sup>[32]</sup>

## Κεφάλαιο 5: Εφαρμογή Ανάλυσης Κύκλου Ζωής

Σε αυτό το κεφάλαιο κάνουμε χρήση της εφαρμογής Ανάλυσης Κύκλου Ζωής. Ο σκοπός μας στο τέλος είναι να εξετάσουμε αν είναι περιβαλλοντικά ωφέλιμο στην ηπειρωτική Ελλάδα να εισάγεται Φυσικό Αέριο μεταφερόμενο με αγωγούς υψηλής πίεσης από την Ρωσία (υπάρχον σενάριο) ή να παράγει υποκατάστατο φυσικό αέριο με την αξιοποίηση του CO<sub>2</sub> που εμπεριέχεται στα καυσαέρια των μονάδων: βιομηχανίας, λιγνιτικού σταθμού, ή σταθμού καύσης βιομάζας. Και οι τρεις αυτές περιπτώσεις είναι διαθέσιμες στην ηπειρωτική Ελλάδα. Η μελέτη αφορά το χρονικό διάστημα 2015-2050. Έτσι πρέπει να αποφασίσουμε ποιο από τα τέσσερα παραπάνω σενάρια που αναφέρθηκαν, είναι περισσότερο φιλικό προς το περιβάλλον το έτος 2050. Τέλος οι δείκτες-μεθοδολογίες που θα μας βοηθήσουν να κάνουμε την σύγκριση είναι ο Cumulative Energy Demand (ενεργειακές απαιτήσεις) και ο CML 2 baseline 2000 V2.03/global warming GWP 100 (εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου), του προγράμματος Simapro 7.0.

### Περιγραφή υπολογιστικής μεθοδολογίας

Στάδιο	Παράγραφος	Σκοπός σταδίου.	Περιγραφή	Αποτέλεσμα	Συνεισφορά
1.	<b>5.1 Μεταφορά φυσικού αερίου με αγωγούς υψηλής πίεσης</b>	Υπολογισμός συμβατικού σεναρίου αναφοράς.	Σενάριο αναφοράς: Α. Εξόρυξη, επεξεργασία και συμπίεση Φ.Α. στη Ρωσία Β. Μεταφορά με αγωγούς υψηλής πίεσης στην Ελλάδα	Δείκτες που υπολογίζονται : GWP 100 (Global Warming Potential) και Cumulative Energy Demand	Προσαρμογή πρωτογενών στοιχείων από Ecoinvent στα ελληνικά δεδομένα
2.	<b>5.2 Εθνικός Ενεργειακός Σχεδιασμός</b>	Υπολογισμός δεδομένων ηλεκτρικού μίγματος για την ηπειρωτική Ελλάδα.	Εξέλιξη ηλεκτροπαραγωγής ηπειρωτικής Ελλάδας μέχρι το 2050, σύμφωνα με τα σενάρια: Α. Σενάριο ηλεκτρικού μίγματος για το 2015 Β. Σενάριο ΥΦ (Υφιστάμενων Πολιτικών) ηλεκτρικού	Δείκτες που υπολογίζονται : GWP 100 (Global Warming Potential) και Cumulative Energy Demand για όλα τα σενάρια ηλεκτρικού μίγματος της ηπειρωτικής Ελλάδας	Ανάπτυξη νέων datasets για την προσαρμογή των δεδομένων του ηλεκτρικού μίγματος στην Ελλάδα, με σκοπό την ανάλυση όλων των σεναρίων

			μίγματος για το 2050 Γ. Σενάριο ΠΕΚ 70% (Περιβαλλοντικών μέτρων Ελαχίστου Κόστους) ηλεκτρικού μίγματος για το 2050		
3.	<b>5.3 Δέσμευση, διαχωρισμός και συμπίεση CO<sub>2</sub></b>	Υπολογισμός των τριών εναλλακτικών σεναρίων: Α.Τσιμεντοβιομηχανία Β. Λιγνιτική μονάδα Γ. Μονάδα Βιομάζας	Εναλλακτικά σεναρία: Αξιοποίηση δεδομένων για την δέσμευση, διαχωρισμό και συμπίεση CO <sub>2</sub> , χρησιμοποιώντας όμως τα δεδομένα των ηλεκτρικών μιγμάτων της ηπειρωτικής Ελλάδας για τα έτη 2015 και 2050	Δείκτες που υπολογίζονται : GWP 100 (Global Warming Potential) και Cumulative Energy Demand για την τσιμεντοβιομηχανία, την λιγνιτική μονάδα και την μονάδα βιομάζας	Ανάπτυξη νέων datasets με σκοπό την δημιουργία δεδομένων για την εφαρμογή των τριών εναλλακτικών μονάδων της Ελλάδας
4.	<b>5.4 Παραγωγή υποκατάστατου φυσικού αερίου-SNG</b>	Παραγωγή υποκατάστατου φυσικού αερίου από τις τρεις υπάρχουσες εφαρμογές της ηπειρωτικής Ελλάδας: Α.Τσιμεντοβιομηχανία Β. Λιγνιτική μονάδα Γ. Μονάδα Βιομάζας	Παραγωγή SNG: Αξιοποίηση των δεδομένων που υπολογίστηκαν στο κεφάλαιο 5.3 που αφορούν το CO <sub>2</sub> που απαιτείται για την μεθανοποίηση. Και για τις τρεις εφαρμογές εξετάστηκαν όλα τα σεναρία των ηλεκτρικών μιγμάτων	Δείκτες που υπολογίζονται : GWP 100 (Global Warming Potential) και Cumulative Energy Demand για την παραγωγή υποκατάστατου φυσικού αερίου από τσιμεντοβιομηχανία, λιγνιτική μονάδα και μονάδα βιομάζας	Ανάπτυξη νέων datasets για τις εναλλακτικές μονάδες της Ελλάδας, τα οποία μας δίνουν τα τελικά αποτελέσματα που χρειαζόμαστε για την παραγωγή SNG
5.	<b>5.5 Σύγκριση αποτελεσμάτων των</b>	Σύγκριση των αποτελεσμάτων από τα κεφάλαια 5.3 και 5.4	Αρχικά συγκρίνουμε τα αποτελέσματα που βρήκαμε για	Σύγκριση των δεικτών GWP 100 (Global Warming Potential) και	Αξιοποίηση των δεδομένων από τα



	<p><b>ανωτέρω διεργασιών</b></p>		<p>τις τρεις μονάδες της Ελλάδας και αφορούν τον διαχωρισμό και την συμπίεση του CO<sub>2</sub> για το 2015 και στην συνέχεια συγκρίνουμε τα δεδομένα που βγάλαμε για την παραγωγή υποκατάστατου φυσικού αερίου για όλες τις εκτιμήσεις ηλεκτρικού μίγματος στην Ελλάδα και για τις τρεις μονάδες, ούτως ώστε να καταλήξουμε στο τελικό συμπέρασμα με την σύγκριση των εφαρμογών μας με το συμβατικό σενάριο αναφοράς.</p>	<p>Cumulative Energy Demand για την εξαγωγή των τελικών συμπερασμάτων</p>	<p>datasets που φτιάξαμε στα κεφάλαια 5.3 και 5.4</p>
--	----------------------------------	--	--	---	---

*Σημείωση:* Ο δείκτης GWP 100 (Global Warming Potential) που εξετάζεται σε αυτό το κεφάλαιο δίνει ως αποτέλεσμα kg CO<sub>2</sub>-eq/MJ και ο δείκτης Cumulative Energy Demand δίνει MJ-eq/MJ είτε για παράδειγμα εξετάζουμε ή συγκρίνουμε την συμβατική μεταφορά ενός MJ Φ.Α, είτε την παραγωγή ενός MJ υποκατάστατου Φ.Α. από τις διάφορες εφαρμογές.

## 5.1 Μεταφορά Φυσικού Αερίου με αγωγούς υψηλής πίεσης

Με χρήση του λογισμικού Simapro 7.0, υπολογίσαμε τις ενεργειακές απαιτήσεις και τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου, για την μεταφορά φυσικού αερίου με αγωγούς υψηλής πίεσης από Ρωσία για Ελλάδα. Γίνονται υποθέσεις και παραδοχές στις συνολικές απώλειες βάση μελετών για άλλες ευρωπαϊκές χώρες παρόμοιας κλίμακας με την Ελλάδα.

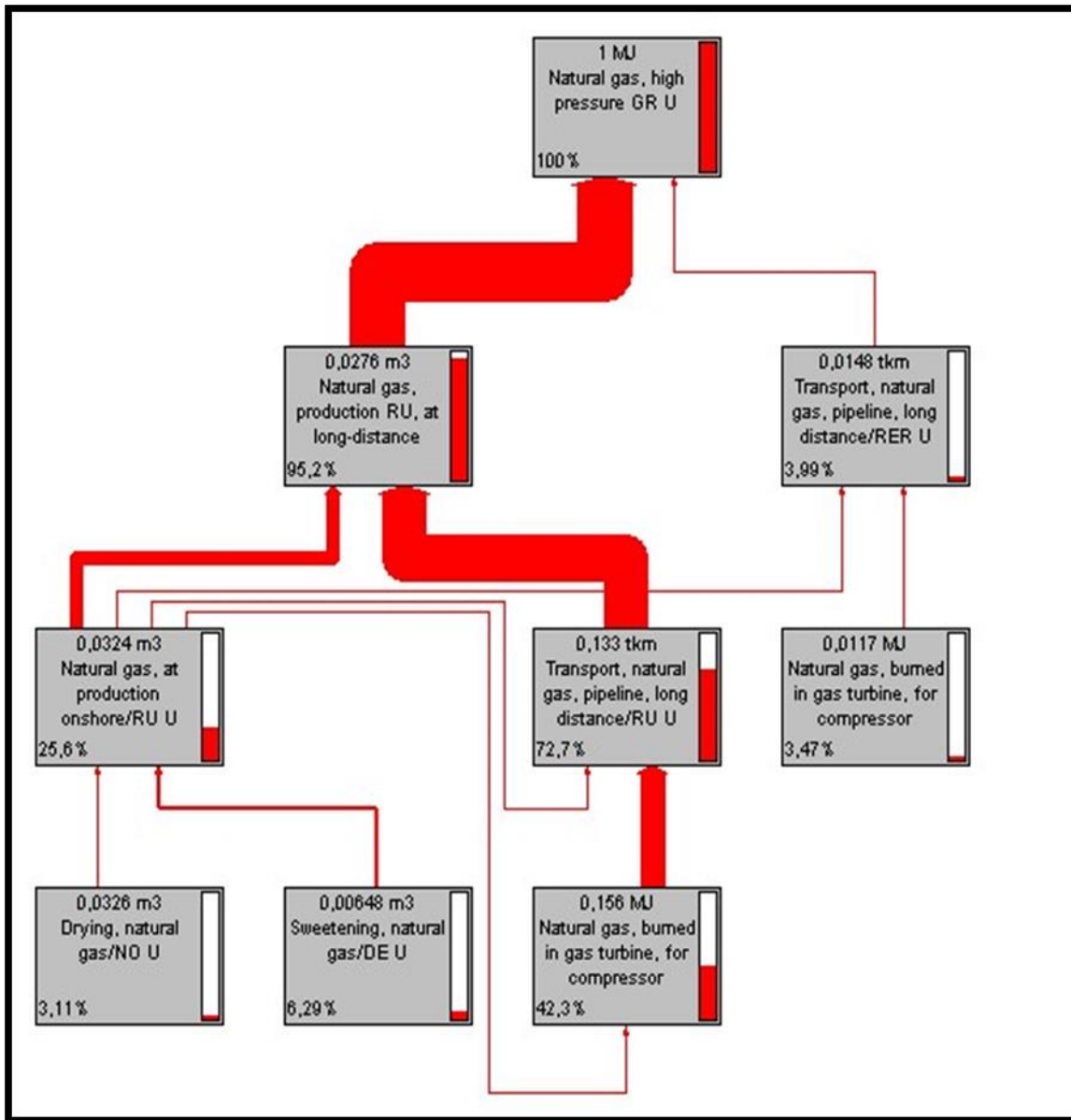
<b>Products</b>		
Natural gas, high pressure GR U	1	MJ
<b>Materials/fuels</b>		
Pipeline, natural gas, high pressure distribution network/RER/I U	2,59E-10	km
Natural gas, production RU, at long-distance pipeline/RER U	0,0275	m <sup>3</sup>
Transport, natural gas, pipeline, long distance/RER U	0,0148	tkm
<b>Emissions to air</b>		
Butane	1,57E-08	kg
Carbon dioxide, fossil	1,57E-08	kg
Ethane	0,000000094	kg
Heat, waste	0,000262	MJ
Mercury	1,57E-13	kg
Methane, fossil	0,0000112	kg
NMVOOC, non-methane volatile organic compounds, unspecified origin	1,57E-08	kg
Propane	3,13E-08	kg

**Πίνακας 5-01: Διαμορφωμένα δεδομένα για την μεταφορά φυσικού αερίου με αγωγούς υψηλής πίεσης**  
(Πηγή: Simapro 7,0)<sup>[49]</sup>

Για την μεταφορά του φυσικού αερίου με αγωγούς υψηλής πίεσης εντός της Ελλάδας απαιτούνται κάποια υλικά/καύσιμα ενώ κατά την μεταφορά έχουμε εκπομπές στον αέρα. Οι τιμές τους και η περιγραφή τους είτε μας δίνονταν από το Simapro είτε τις διαμορφώσαμε και τις προσαρμόσαμε στα δεδομένα της Ελλάδας, οι τιμές αυτών παρουσιάζονται στον παραπάνω πίνακα.

### 5.1.1 Εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου κατά την μεταφορά φυσικού αερίου με αγωγούς υψηλής πίεσης

Κατά τον υπολογισμό με την μέθοδο CML 2 baseline 2000 V 2.03 του Simapro μας παρουσιάζεται ένα «δένδρο αποτελεσμάτων» στο οποίο μπορούμε να διακρίνουμε εκείνες τις διεργασίες που συμμετέχουν κατά κάποιο ποσοστό στην εκπομπή αερίων υπεύθυνων για το φαινόμενο του θερμοκηπίου κατά την μεταφορά με αγωγούς υψηλής πίεσης. Παρακάτω παρουσιάζεται το «δένδρο αποτελεσμάτων» με εκτενή σχολιασμό του.

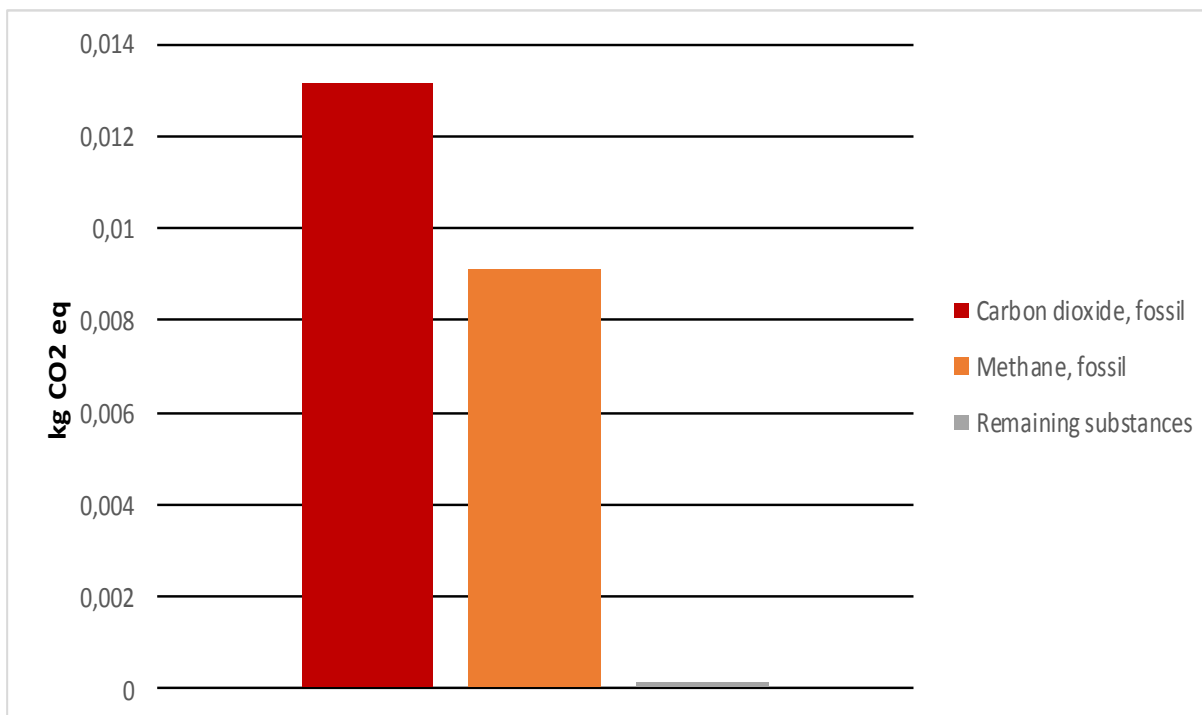


Σχήμα 5-01: Δένδρο εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου κατά την μεταφορά φυσικού αερίου με αγωγούς υψηλής πίεσης από Ρωσία έως εντός της Ελλάδας <sup>[49]</sup>

Σχολιασμός δένδρου: Παρατηρώντας το δένδρο η κυριότερη ροή οφείλεται στις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου από την παραγωγή φυσικού αερίου στην περιοχή εξόρυξης, δηλαδή στην Ρωσία μέχρι και την μεταφορά στην Ελλάδα (σύνορα). Αναλυτικότερα το 94,8% των εκπομπών οφείλεται στην παραγωγή και διακρατική μεταφορά ενώ το 3,98% οφείλεται στη μεταφορά με αγωγούς υψηλής πίεσης εντός Ελλάδος. Να τονιστεί σε αυτό το σημείο ότι για χάριν απλότητας του δένδρου απεικονίστηκαν οι κυριότερες ροές για αυτό και υπάρχει μια απόκλιση στην αναλυτική παρουσίαση που κάνουμε συγκριτικά με την παραπάνω απεικόνιση. Η ίδια διαδικασία θα ακολουθηθεί και για τα παρακάτω σχήματα. Επιπροσθέτως το 94,8% των εκπομπών σύμφωνα με το παραπάνω δένδρο οφείλεται κατά 72,7% σε εκπομπές κατά την διακρατική μεταφορά και κατά 21,9% στην παραγωγή (στην περίπτωση μας εξόρυξη από την στεριά). Στην διακρατική μεταφορά οι κυριότερες εκπομπές

αερίων του θερμοκηπίου και σε ποσοστό 42,3% προέρχονται απ' το διοξείδιο του άνθρακα που παράγεται κατά την καύση φυσικού αερίου στους σταθμούς συμπίεσης.

Στην συνέχεια παρατίθεται σχήμα με τις κυριότερες εκπομπές που επιδρούν στο φαινόμενο του θερμοκηπίου (global warming). Στο παράρτημα παρουσιάζεται πίνακας αποτελεσμάτων των εκπομπών από το λογισμικό που δείχνει ότι για την μεταφορά με αγωγούς υψηλής πίεσης οι συνολικές εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου είναι **0,0224 kg CO<sub>2</sub>-eq/MJ μεταφερόμενου Φ.Α.**

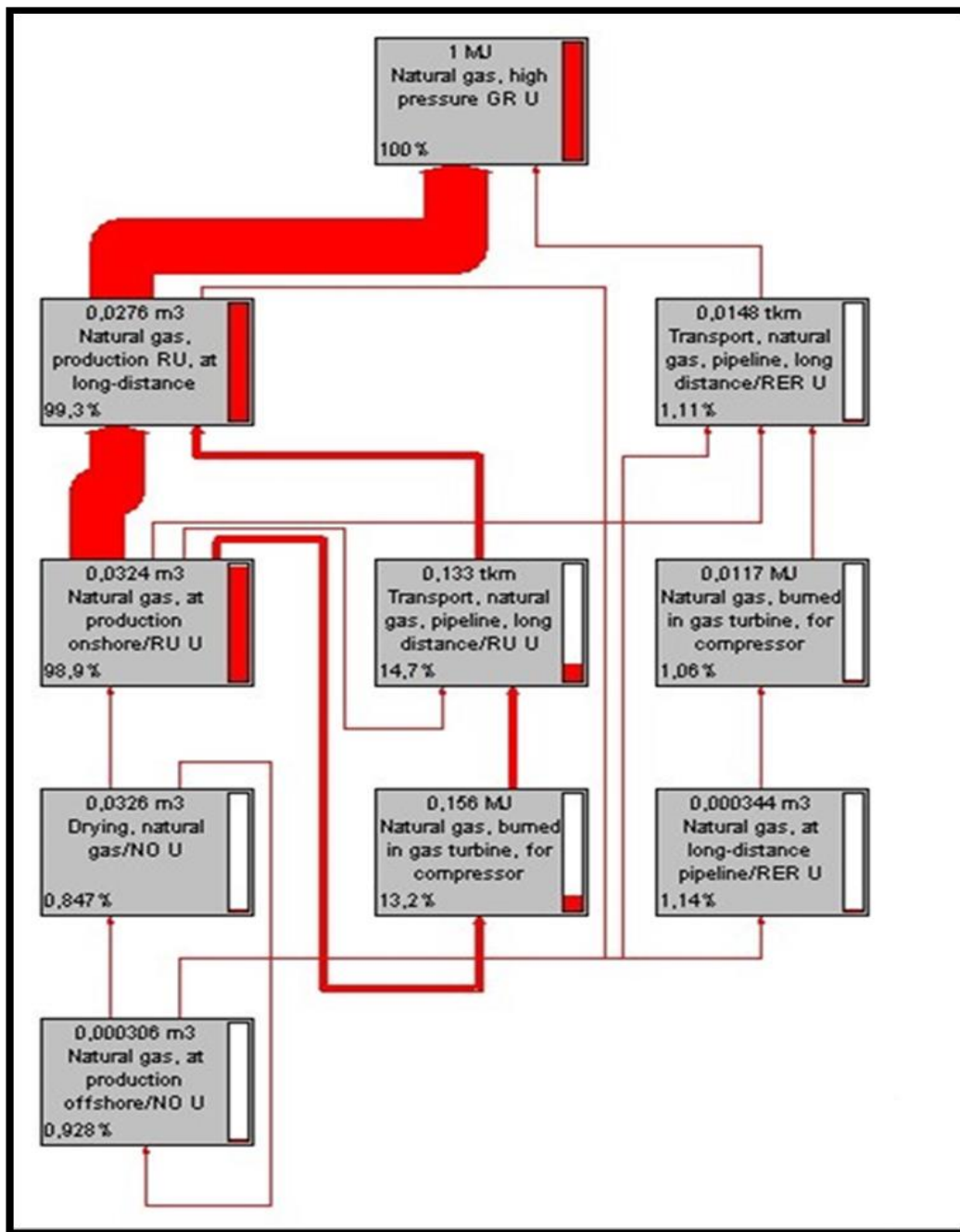


Σχήμα 5-02: Εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου κατά την μεταφορά με αγωγούς υψηλής πίεσης <sup>[49]</sup>

*Σχολιασμός σχήματος:* Παρατηρώντας το άνωθεν σχήμα διαπιστώνουμε ότι το μεγαλύτερο ποσοστό των εκπομπών οφείλεται στο διοξείδιο του άνθρακα και κατά δεύτερον στο μεθάνιο λόγω των διαρροών φυσικού αερίου κατά το μήκος των αγωγών μεταφοράς. Ελάχιστες είναι οι ποσότητες μονοξειδίου του διαζώτου και μονοξειδίου του άνθρακα όπως και άλλων ποσοτήτων που επιδρούν στο φαινόμενο του θερμοκηπίου.

### 5.1.2 Κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας για την μεταφορά φυσικού αερίου με αγωγούς υψηλής πίεσης

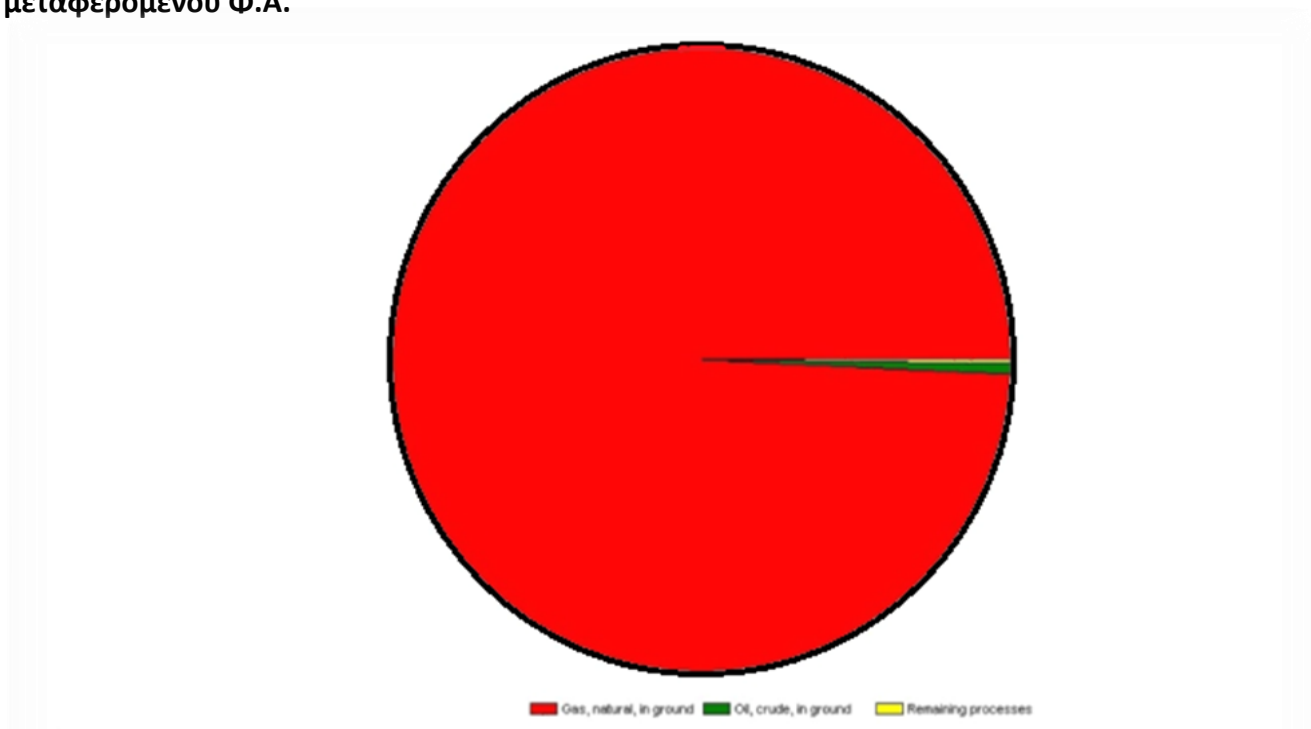
Κατά τον υπολογισμό με την μέθοδο Cumulative Energy Demand V 1.03 του Simapro μας παρουσιάζεται ένα δένδρο στο οποίο μπορούμε να διακρίνουμε εκείνες τις διεργασίες που συμμετέχουν κατά κάποιο ποσοστό σε ενεργειακές καταναλώσεις που απαιτούνται για τη μεταφορά του φυσικού αερίου με τους αγωγούς υψηλής πίεσης. Παρακάτω παρουσιάζεται το δένδρο με εκτενή σχολιασμό του.



Σχήμα 5-03: Δένδρο κατανάλωσης πρωτογενούς ενέργειας για την μεταφορά φυσικού αερίου με αγωγούς υψηλής πίεσης από την Ρωσία έως εντός της Ελλάδας<sup>[49]</sup>

*Σχολιασμός δένδρου:* Παρατηρώντας το δένδρο η κυριότερη ενεργειακή απαίτηση για την μεταφορά φυσικού αερίου με αγωγούς υψηλής πίεσης εντός Ελλάδας οφείλεται κατά κύριο λόγο στην παραγωγή του φυσικού αερίου και στην διακρατική του μεταφορά μέχρι τα σύνορα της Ελλάδας. Αναλυτικότερα το 98,8% οφείλεται στην παραγωγή και διακρατική μεταφορά και μόλις το 1,11% οφείλεται στην μεταφορά εντός Ελλάδας με αγωγούς υψηλής πίεσης. Στην συνέχεια παρατηρώντας την κυριότερη ροή, δηλαδή την παραγωγή και διακρατική μεταφορά, παρατηρούμε ότι το 84.5% οφείλεται στην παραγωγή και εξόρυξη στην Ρωσία (στην στεριά) και το 14,7% στην μεταφορά του φυσικού αερίου με αγωγούς υψηλής πίεσης μέχρι τα σύνορα της Ελλάδας.

Στην συνέχεια παρατίθεται σχήμα με τις κυριότερες ενεργειακές καταναλώσεις. Στο παράρτημα παρουσιάζονται οι τιμές των καταναλώσεων από το λογισμικό που συνολικά είναι **1,29 MJ-eq/MJ μεταφερόμενου Φ.Α.**



Σχήμα 5-04: Ενεργειακές απαιτήσεις κατά την μεταφορά με αγωγούς υψηλής πίεσης <sup>[49]</sup>

*Σχολιασμός σχήματος:* Παρατηρώντας το άνωθεν σχήμα οι περισσότερες ενεργειακές καταναλώσεις παρατηρούμε ότι οφείλονται στην εξόρυξη και παραγωγή φυσικού αερίου που στην περίπτωση μας γίνεται από την στεριά και σε πολύ μικρό ποσοστό στην εξόρυξη πετρελαίου.

## 5.2 Εθνικός ενεργειακός σχεδιασμός

Η εξέλιξη του Ελληνικού ενεργειακού συστήματος τις επόμενες δεκαετίες, θα έχει ως βασικούς άξονες κατεύθυνσης την ασφάλεια ενεργειακού εφοδιασμού, τη διασφάλιση της καλής λειτουργίας της εσωτερικής αγοράς ενέργειας, τη βέλτιστη αξιοποίηση των εγχώριων πηγών ενέργειας, την

προώθηση των τεχνολογιών παραγωγής ενέργειας από ΑΠΕ, την ταχεία υιοθέτηση τεχνολογικών εφαρμογών που συνεισφέρουν στην εξοικονόμηση ενέργειας αλλά και στη διαχείριση της ζήτησής της, καθώς και την επίτευξη δραστικής μείωσης των εκπομπών αέριων ρύπων του θερμοκηπίου από τις ανθρωπογενείς καταναλώσεις ενέργειας.

(Πηγή: [EnPlan-RoadMap 2050\\_dtld-Apr-12.pdf](#))<sup>[45]</sup>

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.<sup>[45]</sup>

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.<sup>[45]</sup>

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.<sup>[45]</sup>

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.<sup>[45]</sup>

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.<sup>[45]</sup>

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.<sup>[45]</sup>

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.<sup>[45]</sup>

### 5.2.1 Εξέλιξη της ηλεκτροπαραγωγής για την ηπειρωτική Ελλάδα

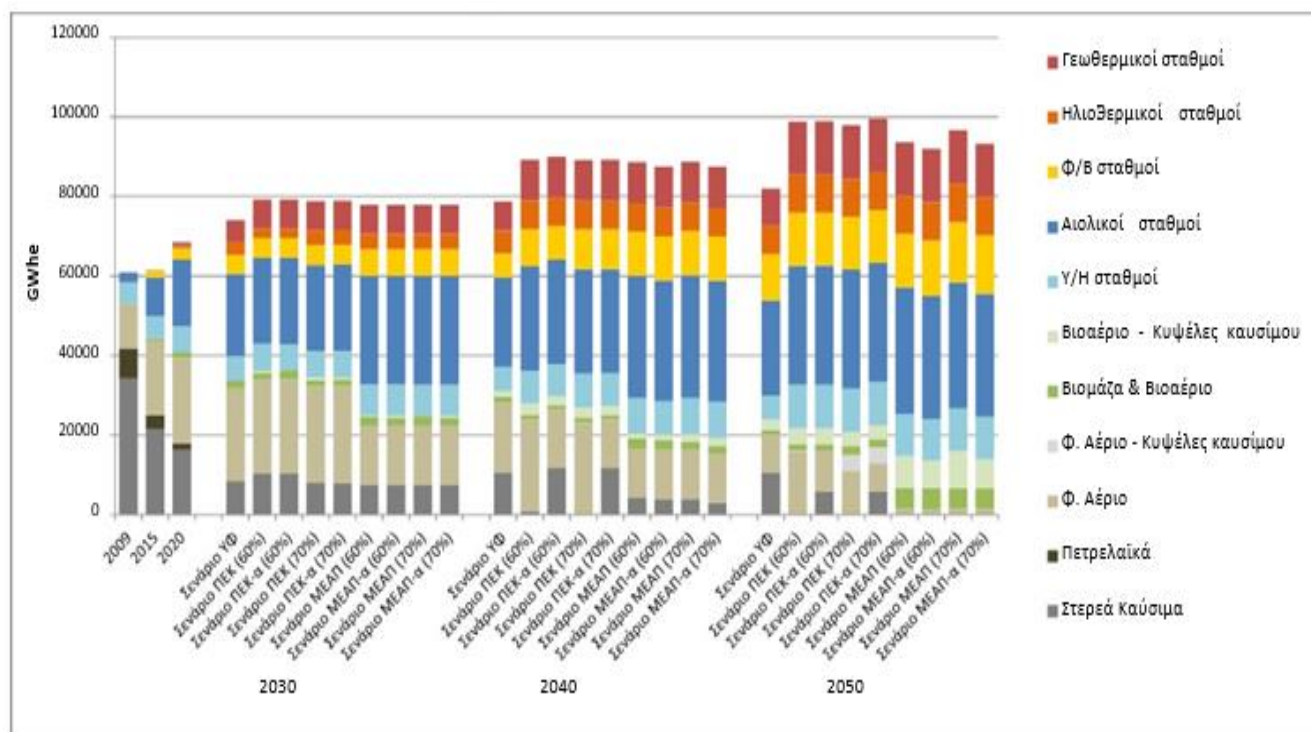
Ο τομέας της ηλεκτροπαραγωγής αναμένεται ότι θα εμφανίσει σημαντικές διαφοροποιήσεις την περίοδο έως το 2050, καθώς ένας μεγάλος αριθμός των μέτρων που αφορούν στην χάραξη εθνικής πολιτικής, αναφέρεται στο συγκεκριμένο τομέα. Για την εξέλιξη της ηλεκτροπαραγωγής ακολουθούνται κυρίως τρία σενάρια τα οποία 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.<sup>[45]</sup>

Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 5-05, 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. Εξάιρεση αποτελεί το Σενάριο ΠΕΚ-α, στο οποίο λόγω της ένταξης τεχνολογίας δέσμησης και αποθήκευσης CO<sub>2</sub> (CCS) παραμένουν λιγνιτικές μονάδες έως το τέλος της περιόδου 2020-2050, κατέχοντας μερίδιο 6% στην ηλεκτροπαραγωγή το 2050. <sup>[45]</sup>



Σχήμα 5-05: Εξέλιξη της ηλεκτροπαραγωγής ανά καύσιμο σε κάθε εξεταζόμενο σενάριο (Πηγή:EnPlan-RoadMap 2050\_dtId-Apr-12.pdf)<sup>[45]</sup>

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 2015, ii) το 2050 με Σενάριο ΥΦ και iii) το 2050 με Σενάριο ΠΕΚ 70%.

i) Δεδομένα ενεργειακού μίγματος για το έτος 2015

Για την παραγωγή μιας κιλοβατώρας (1 kWh) το 2015 το ενεργειακό μίγμα εμφανίζεται στον παρακάτω πίνακα:

<b>Products</b>		
Electricity, production mix GR/GR U 2015	1	kWh
<b>Materials/fuels</b>		
Electricity, hydropower, at power plant/GR U	0,1217	kWh
Electricity, lignite, at power plant/GR U	0,37	kWh
Electricity, natural gas, at power plant/UCTE U	0,1713	kWh
Electricity, oil, at power plant/GR U	0,0725	kWh
Electricity, at wind power plant/RER U	0,1713	kWh
Electricity, at cogen ORC 1400kWth, wood, allocation exergy/CH U	0,0371	kWh
Electricity, production mix photovoltaic, at plant/CH U	0,0561	kWh

**Πίνακας 5-02: Διαμορφωμένα δεδομένα ενεργειακού μίγματος για το έτος 2015** <sup>[49]</sup>

ii) Δεδομένα ενεργειακού μίγματος για το έτος 2050 Σεναρίου ΥΦ

Για την παραγωγή μιας κιλοβατώρας (1 kWh) το 2050 με σενάριο ΥΦ το ενεργειακό μίγμα εμφανίζεται στον παρακάτω πίνακα:

<b>Products</b>		
Electricity, production mix GR/GR U 2050 non-optimistic scenario	1	kWh
<b>Materials/fuels</b>		
Electricity, hydropower, at power plant/GR U	0,0931	kWh
Electricity, lignite, at power plant/GR U	0,142	kWh
Electricity, natural gas, at power plant/UCTE U	0,154	kWh
Electricity, at wind power plant/RER U	0,325	kWh
Electricity, at cogen ORC 1400kWth, wood, allocation exergy/CH U	0,0589	kWh
Electricity, production mix photovoltaic, at plant/CH U	0,227	kWh

**Πίνακας 5-03: Διαμορφωμένα δεδομένα ενεργειακού μίγματος για το έτος 2050 σεναρίου ΥΦ** <sup>[49]</sup>

iii) Δεδομένα ενεργειακού μίγματος για το έτος 2050 Σεναρίου ΠΕΚ 70%

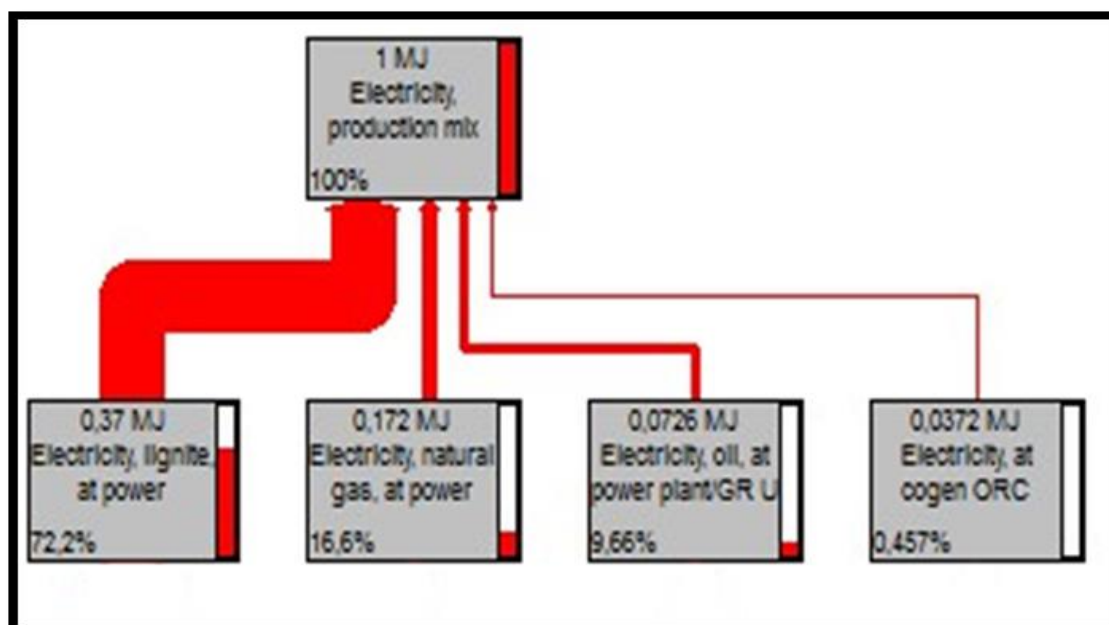
Για την παραγωγή μιας κιλοβατώρας (1 kWh) το 2050 με σενάριο ΠΕΚ 70% το ενεργειακό μίγμα εμφανίζεται στον παρακάτω πίνακα:

<b>Products</b>		
Electricity, production mix GR/GR U 2050 full-optimistic scenario	1	kWh
<b>Materials/fuels</b>		
Electricity, hydropower, at power plant/GR U	0,133	kWh
Electricity, natural gas, at power plant/UCTE U	0,176	kWh
Electricity, at wind power plant/RER U	0,34	kWh
Electricity, at cogen ORC 1400kWth, wood, allocation exergy/CH U	0,083	kWh
Electricity, production mix photovoltaic, at plant/CH U	0,268	kWh

Πίνακας 5-04: Διαμορφωμένα δεδομένα ενεργειακού μίγματος για το έτος 2050 σεναρίου ΠΕΚ 70% <sup>[49]</sup>

## 5.2.2 Εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου και καταναλώσεις πρωτογενούς ενέργειας σε κάθε σενάριο ηλεκτροπαραγωγής στην ηπειρωτική Ελλάδα

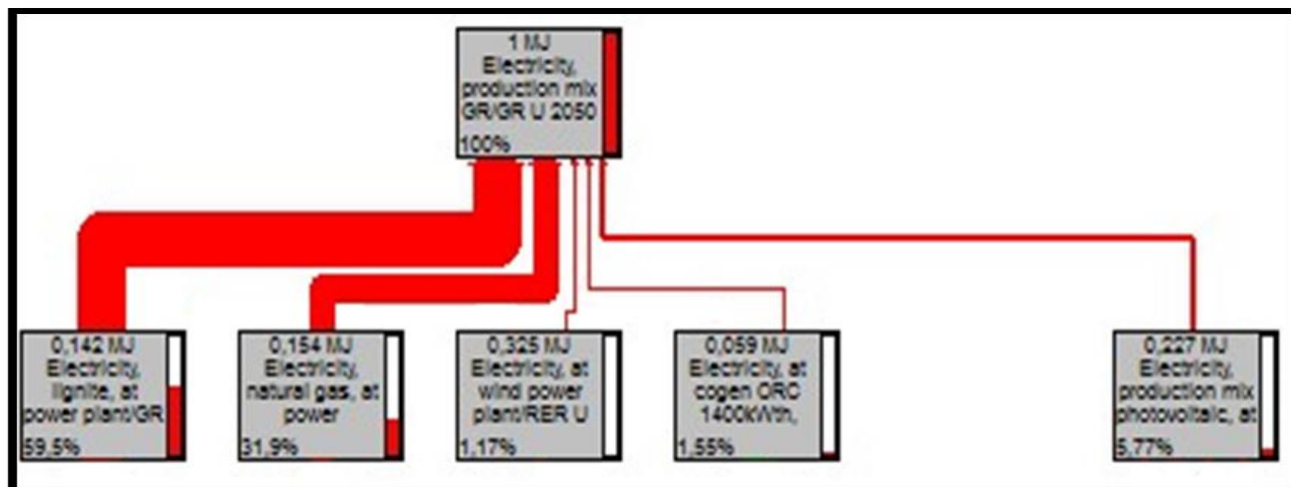
Σε αντιστοιχία με τα παραπάνω βρίσκουμε τους δείκτες σε κάθε περίπτωση στις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου και στις ενεργειακές απαιτήσεις. Στο παράρτημα παρουσιάζονται οι τιμές που μας έδωσε το Simapro.



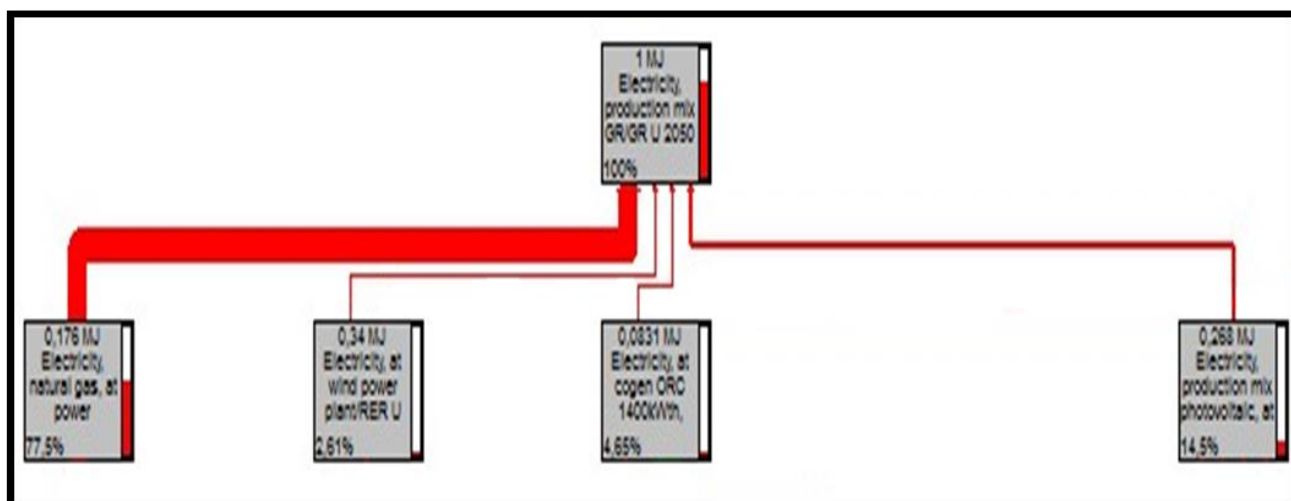
Σχήμα 5-06: Δένδρο εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου ενεργειακού μίγματος 2015 <sup>[49]</sup>

Όπως ήταν αναμενόμενο το μεγαλύτερο ποσοστό εκπομπών αερίων ρύπων στην ηλεκτροπαραγωγή του 2015 προέρχεται από τις λιγνιτικές μονάδες, οι οποίες έχουν μεγάλο ποσοστό συμμετοχής στο ενεργειακό μίγμα, ακολουθούν οι μονάδες φυσικού αερίου και πετρελαίου ενώ ελάχιστες είναι οι εκπομπές από μονάδες βιομάζας. Το σύνολο των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου το 2015 είναι συνολικά **0,66 kg CO<sub>2</sub>-eq/kWh παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας**. Στα σχήματα των δένδρων που παρουσιάζονται σε αυτήν την παράγραφο απεικονίζονται

μόνο οι κυριότερες ροές. Εξαλείφθηκαν άλλες ροές για χάριν απλότητας των σχημάτων καθώς θα γίνονταν πολύπλοκα, εντούτοις οι αποκλίσεις δεν είναι ιδιαίτερα αισθητές.

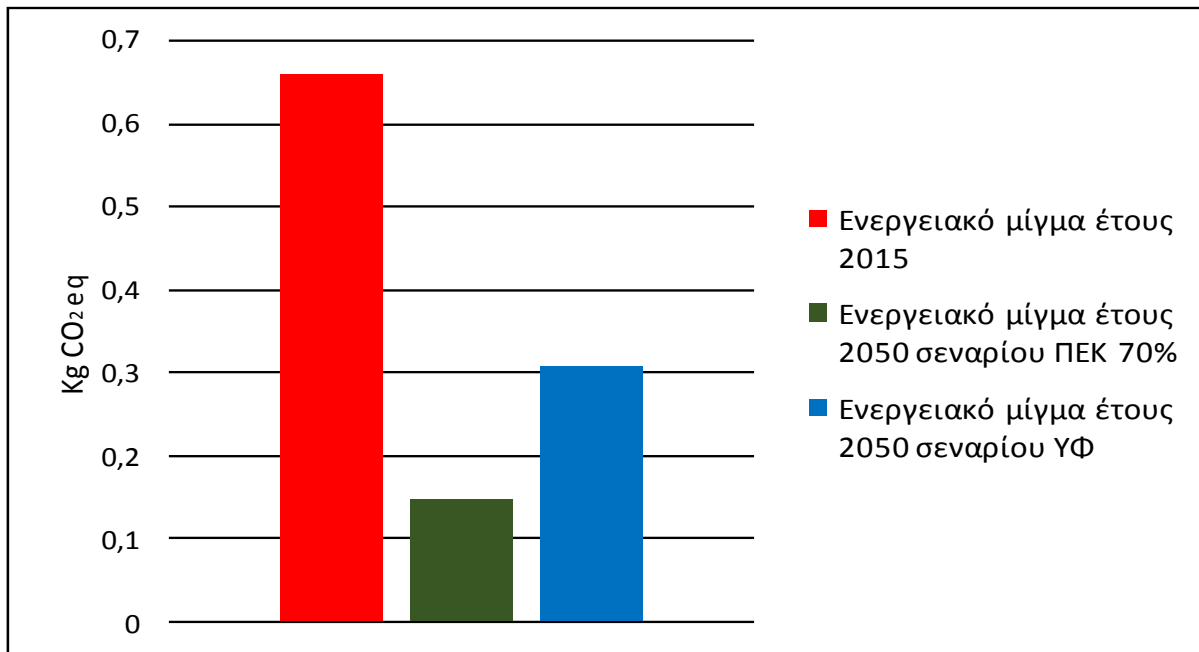


Σχήμα 5-07: Δένδρο εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου ενεργειακού μίγματος 2050 σεναρίου ΥΦ <sup>[49]</sup>

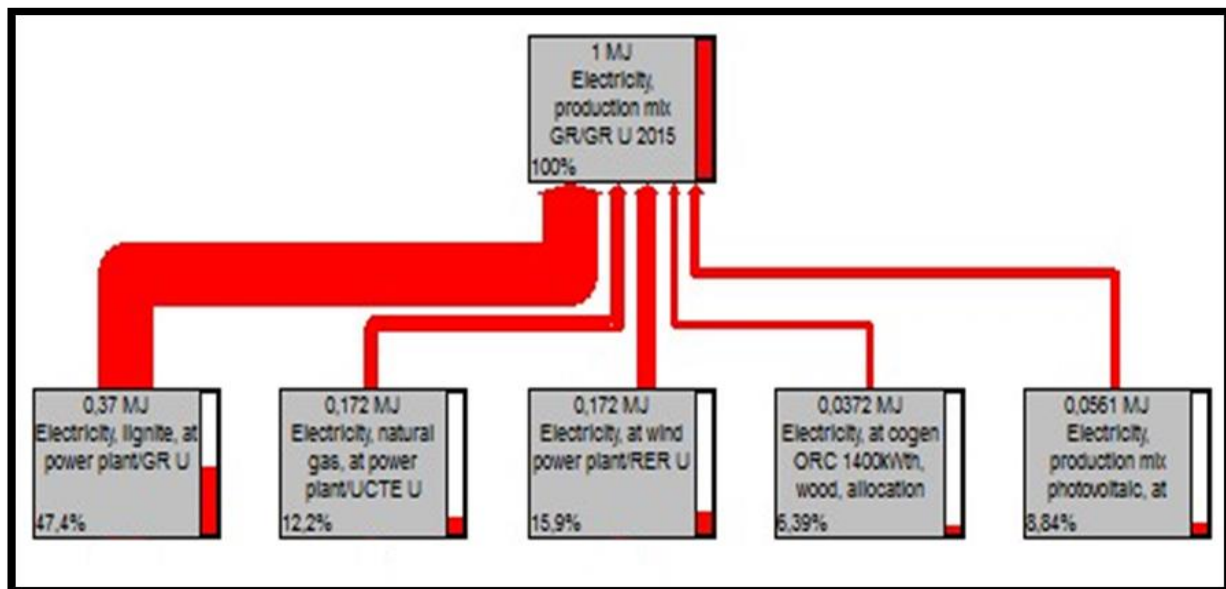


Σχήμα 5-08: Δένδρο εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου ενεργειακού μίγματος 2050 σεναρίου ΠΕΚ 70% <sup>[49]</sup>

Αντίθετα στα μεταγενέστερα σενάρια ηλεκτροπαραγωγής το 2050 παρατηρείται σημαντική μείωση ακόμα και εξάλειψη (σενάριο ΠΕΚ 70%) των αερίων ρύπων από λιγνιτικές μονάδες αφού κατά κύριο λόγο έχουν αντικατασταθεί από μονάδες φυσικού αερίου. Έτσι το μεγαλύτερο ποσοστό ρύπων προέρχεται είτε από τις εναπομένουσες λιγνιτικές μονάδες είτε από τις μονάδες φυσικού αερίου. Τέλος υπάρχει σημαντική αύξηση του ποσοστού αερίων ρύπων που προέρχεται από ΑΠΕ κάτι που είναι απόλυτα φυσιολογικό αφού υπάρχει σημαντική ενίσχυση των ΑΠΕ στο μέλλον. Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζονται και οι εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου σε ισοδύναμα κιλά CO<sub>2</sub> (kg CO<sub>2</sub> eq) σε κάθε περίπτωση όπως διαμορφώθηκαν από το Simapro. Το έτος 2050 σεν. ΥΦ οι συνολικές εκπομπές αερίων ρύπων είναι **0,309 kg CO<sub>2</sub>-eq/kWh παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας** ενώ το έτος 2050 σεν. ΠΕΚ 70% είναι **0,146 kg CO<sub>2</sub>-eq/kWh παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας**.



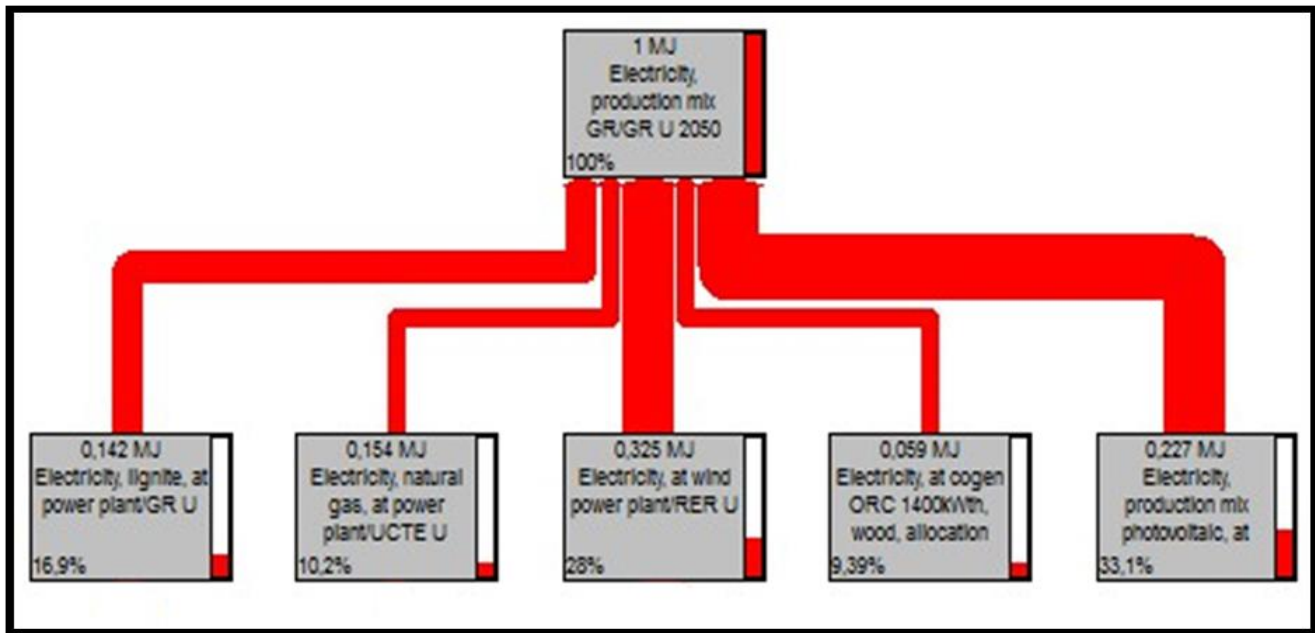
Σχήμα 5-09: Σύγκριση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου για κάθε σενάριο ενεργειακού μίγματος <sup>[49]</sup>



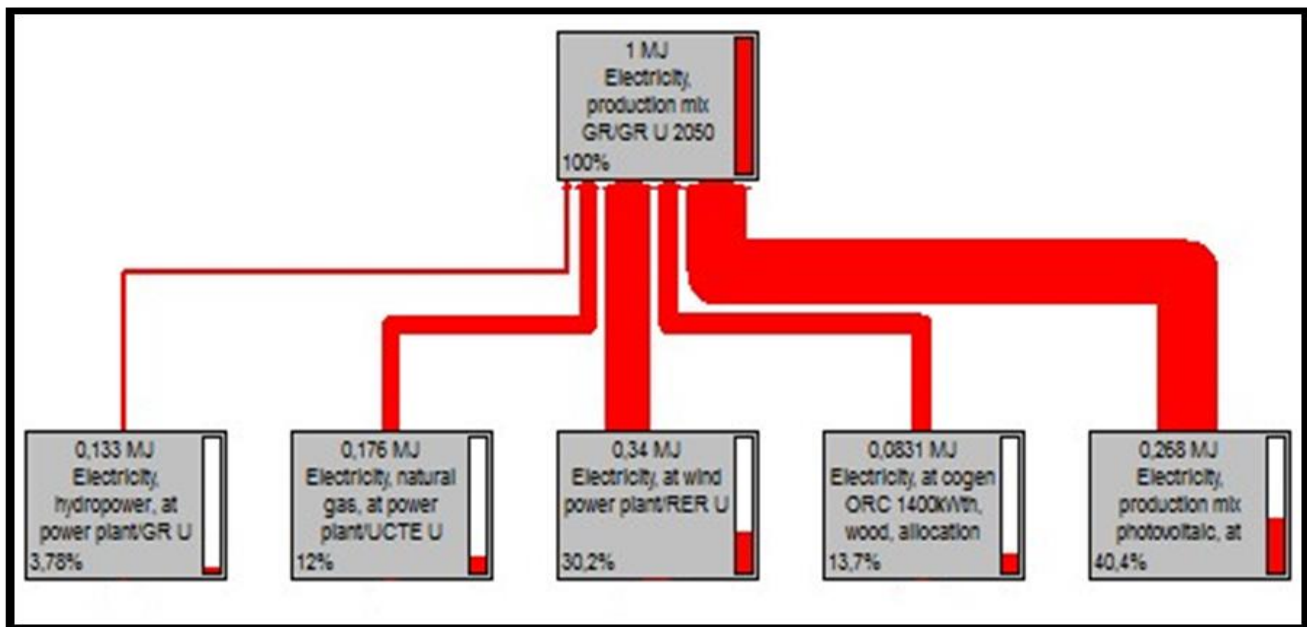
Σχήμα 5-10: Δένδρο ενεργειακών απαιτήσεων ενεργειακού μίγματος 2015 <sup>[49]</sup>

Όπως φαίνεται και στο παραπάνω σχήμα το έτος 2015 οι μεγαλύτερες ενεργειακές απαιτήσεις παρουσιάζονται στις λιγνιτικές μονάδες αφού η κύρια πηγή ηλεκτροπαραγωγής στην Ελλάδα προέρχεται από την καύση λιγνίτη με μονάδες που έχουν χαμηλό βαθμό απόδοσης. Ακολουθούν τα αιολικά πάρκα και οι μονάδες φυσικού αερίου που όπως παρατηρούμε στο δεδομένα που είχαμε βγάλει παραπάνω ότι συμμετέχουν με ίδιο ποσοστό στο ενεργειακό μας μίγμα. Τέλος οι ενεργειακές απαιτήσεις στα φωτοβολταϊκά πάρκα και στις μονάδες βιομάζας είναι πολύ μικρότερες αφού η

συμμετοχή τους στην ηλεκτροπαραγωγή είναι περιορισμένη. Το σύνολο των ενεργειακών απαιτήσεων σε ορυκτά καύσιμα το 2015 είναι **2,853 MJ-eq.**



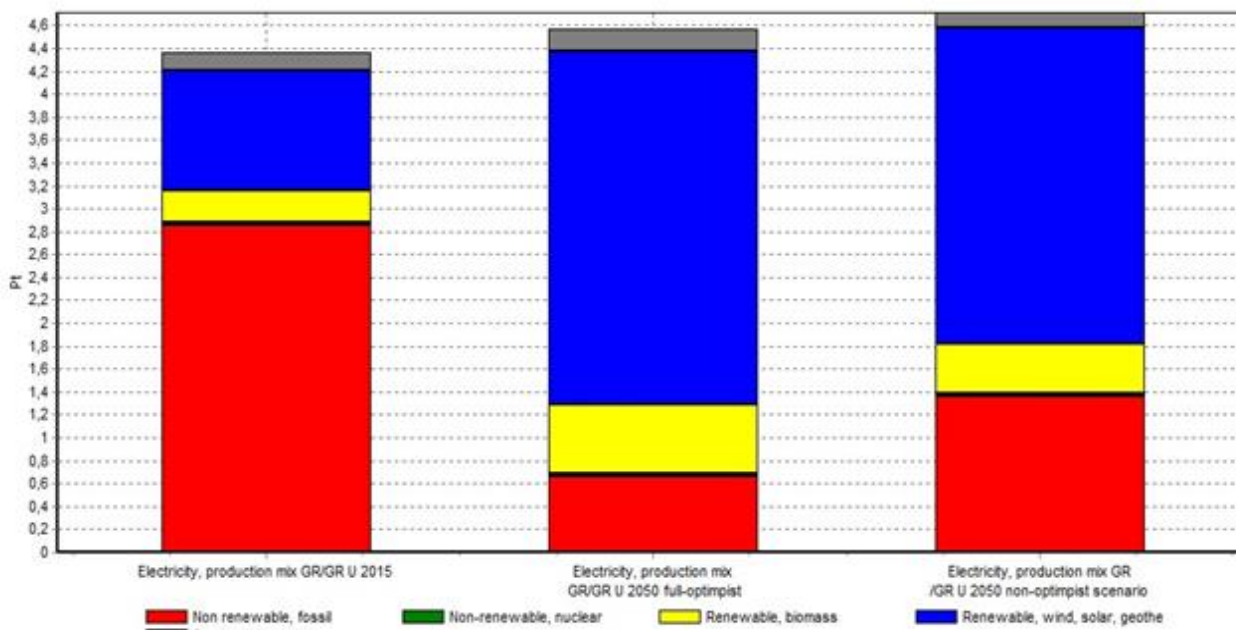
Σχήμα 5-11: Δένδρο ενεργειακών απαιτήσεων ενεργειακού μίγματος 2050 σεναρίου ΥΦ <sup>[49]</sup>



Σχήμα 5-12: Δένδρο ενεργειακών απαιτήσεων ενεργειακού μίγματος 2050 σεναρίου ΠΕΚ 70% <sup>[49]</sup>

Αντίθετα στα σεναρία μεταγενέστερης ηλεκτροπαραγωγής το έτος 2050, παρατηρείται μια τελείως διαφορετική κατάσταση με την μερίδα του λέοντος στις ενεργειακές απαιτήσεις να κατέχουν τα αιολικά και φωτοβολταϊκά πάρκα καθότι αυτά θα έχουν την μεγαλύτερη συμμετοχή στο ενεργειακό μίγμα, μειώνοντας έτσι αισθητά τις μονάδες ορυκτών καυσίμων. Τέλος με την εισαγωγή μονάδων βιομάζας σε μεγαλύτερο βαθμό το 2050 παρατηρείται σημαντική αύξηση των

ενεργειακών καταναλώσεων από αυτές σε σύγκριση με το 2015. Στο παρακάτω σχήμα εμφανίζονται οι ενεργειακές απαιτήσεις σε κάθε περίπτωση όπως διαμορφώθηκαν στο Simapro. Με το σύνολο των ενεργειακών απαιτήσεων σε ορυκτά καύσιμα για το έτος 2050 σεν. ΥΦ να είναι **1,36 MJ-eq**, ενώ για το έτος 2050 να υποχωρεί στα **0,662 MJ-eq**.



Σχήμα 5-13: Σύγκριση των ενεργειακών απαιτήσεων ανάμεσα σε κάθε σενάριο ενεργειακού μίγματος <sup>[49]</sup>

## 5.3 Δέσμευση, διαχωρισμός και συμπίεση CO<sub>2</sub>

### 5.3.1 Εφαρμογή σε βιομηχανική μονάδα

*Διαχωρισμός και συμπίεση CO<sub>2</sub> από τα καυσαέρια βιομηχανικής μονάδας*

Στην περίπτωση που λαμβάνουμε CO<sub>2</sub> από τα καυσαέρια βιομηχανικών διεργασιών παρατηρούμε από τον πίνακα 6 του παραρτήματος ότι η πυκνότητα διοξειδίου του άνθρακα είναι στο 20% του όγκου των καυσαερίων. Οπότε καλούμαστε να υπολογίσουμε την ηλεκτρική ενέργεια που θα απαιτηθεί για τον διαχωρισμό του από τα άλλα καυσαέρια με την τεχνολογία προσρόφησης με εναλλαγή πίεσης PSA που όπως έχει σημειωθεί και στην θεωρία απαιτούνται 0,25 kWh/m<sup>3</sup> καυσαερίων για την δέσμευση του 40% CO<sub>2</sub> <sup>[42]</sup>. Αφού η περιεκτικότητα CO<sub>2</sub> στα καυσαέρια βιομηχανικών διεργασιών είναι της τάξης του 20%, (Πηγή: [https://www.ipcc.ch/pdf/special-reports/srccs/srccs\\_wholereport.pdf](https://www.ipcc.ch/pdf/special-reports/srccs/srccs_wholereport.pdf))<sup>[48]</sup> γνωρίζοντας ότι V<sub>0</sub>=0,506 m<sup>3</sup>/kg <sup>[48]</sup> αναγάγουμε τον διαχωρισμό σε 1 kg CO<sub>2</sub>. Βρίσκουμε τον όγκο που καταλαμβάνει στο 20% των καυσαερίων άρα V<sub>CO<sub>2</sub></sub>=0.506/0.2=2.53 m<sup>3</sup> τελικά θα απαιτηθούν el=V<sub>CO<sub>2</sub></sub>\*0,25 => el<sub>sep</sub>=0.6325 kWh/kg για τον διαχωρισμό του διοξειδίου του άνθρακα από τα υπόλοιπα καυσαέρια των βιομηχανικών μονάδων.

Τώρα για την συμπίεση του διοξειδίου του άνθρακα είναι γνωστό ό,τι κατά την εξαγωγή του CO<sub>2</sub> από την τεχνολογία διαχωρισμού PSA αυτό ευρίσκεται σε αρχική πίεση P<sub>0</sub>=5 bar και κατά την διαδικασία της συμπίεσης καταλήγει στην τελική πίεση P<sub>1</sub>=30 bar.

(Πηγή: [DOW\\_HELMETH\\_\(621210\)\\_2014-02-07\[1\] \(ID 199125\)-NTUA\\_highlights.pdf 30](#))<sup>[44]</sup>

Το έργο που απαιτείται για την συμπίεση εξαρτάται από την θερμοδυναμική διαδικασία της συμπίεσης και περιγράφεται από την αδιαβατική εξίσωση :

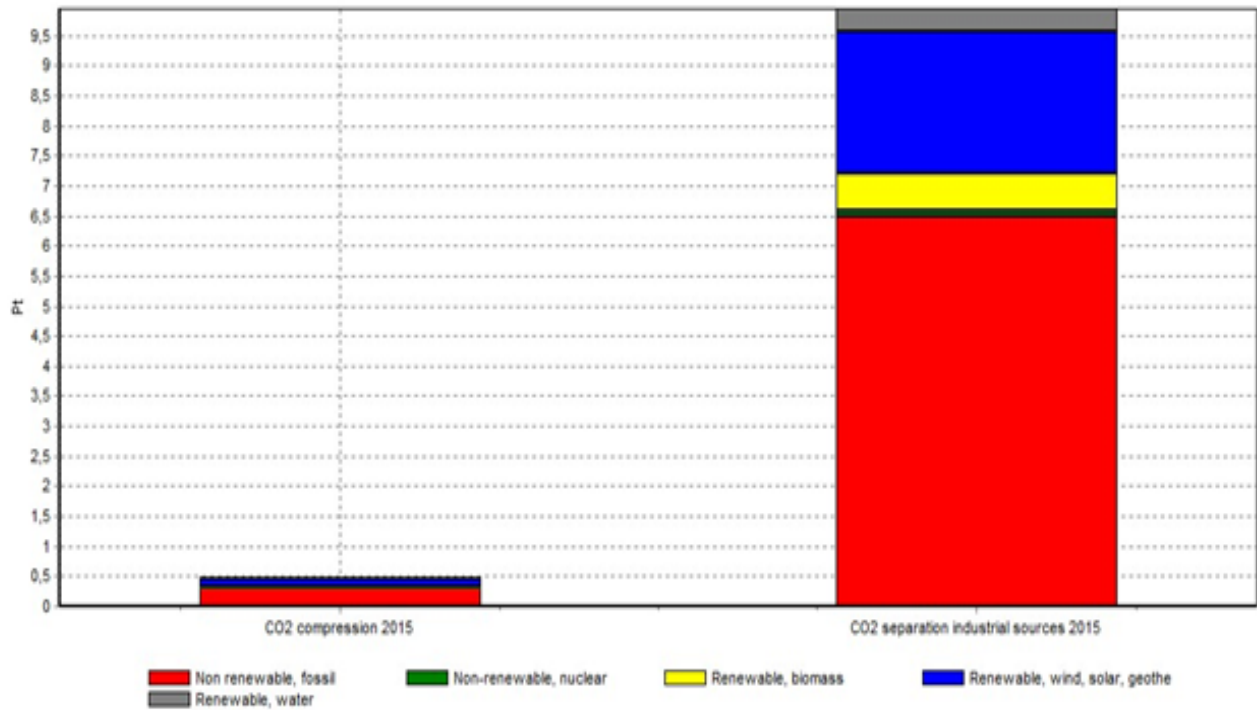
$$W = \left[ \frac{\gamma}{\gamma - 1} \right] P_0 V_0 \left[ \left( \frac{P_1}{P_0} \right)^{(\gamma - 1)/\gamma} - 1 \right] \quad (\text{Πηγή: vazakasn\_hydrogen.pdf})^{[47]}$$

Όπου W [J/kg]	Ειδικό έργο συμπίεσης
P <sub>0</sub> = 5 10 <sup>5</sup> [Pa]	Αρχική πίεση
P <sub>1</sub> = 30 10 <sup>5</sup> [Pa]	Τελική πίεση
V <sub>0</sub> = 0.10977 [m <sup>3</sup> /kg]	Αρχικός ειδικός όγκος υπολογισμένος από
	(Πηγή: <a href="http://www.peacesoftware.de/einigewerte/calc_co2.php5">http://www.peacesoftware.de/einigewerte/calc_co2.php5</a> ) <sup>[46]</sup>
γ= 1,35	Λόγος ειδικών θερμοτήτων <sup>[46]</sup>

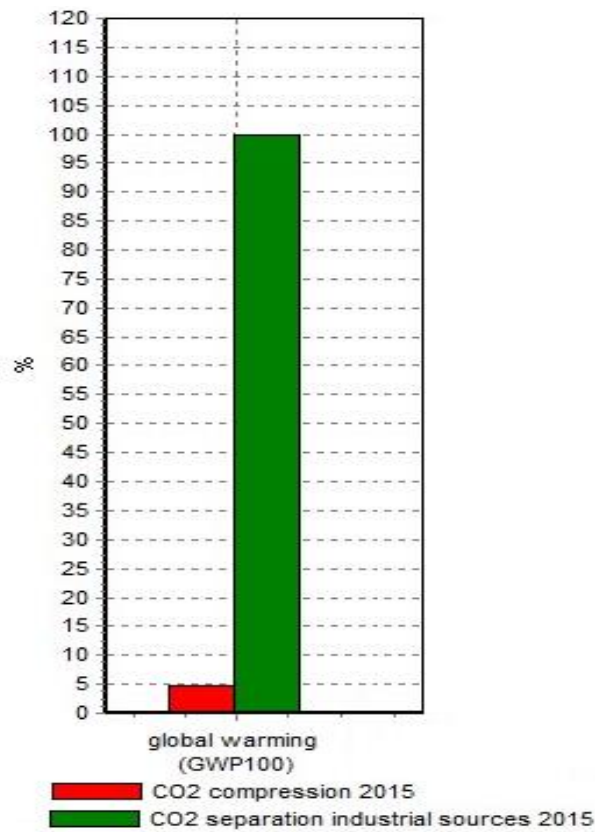
Με αντικατάσταση στο τύπο παραπάνω βρίσκουμε W=127,17 kJ/kg τα οποία τα μετατρέπουμε σε kWh/kg διαιρώντας με 3600 οπότε W=0,03477 kWh/kg και θεωρώντας έναν βαθμό απόδοσης του ηλεκτρικού συμπιεστή η=85% καταλήγουμε ότι για την συμπίεση απαιτείται e<sub>l,comp</sub>= 0.03 kWh/kg.

Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζεται μια σύγκριση των και των εκπομπών αέριων ρύπων ανάμεσα στον διαχωρισμό και την συμπίεση του CO<sub>2</sub> για το ενεργειακό μίγμα του 2015 αντίστοιχη κατάσταση επικρατεί και στα άλλα σενάρια για αυτό και δεν παρουσιάζονται. Όπως είναι αναμενόμενο και από τις τιμές που βρήκαμε παραπάνω οι ενεργειακές απαιτήσεις για την συμπίεση του CO<sub>2</sub> είναι σχεδόν αμελητέες σε σχέση με τις απαιτήσεις ενέργειας για τον διαχωρισμό του. Για αυτό τον λόγο και από το σχήμα του Simapro για τους αέριους ρύπους παρατηρούνται μεγαλύτερες εκπομπές κατά τον διαχωρισμό.



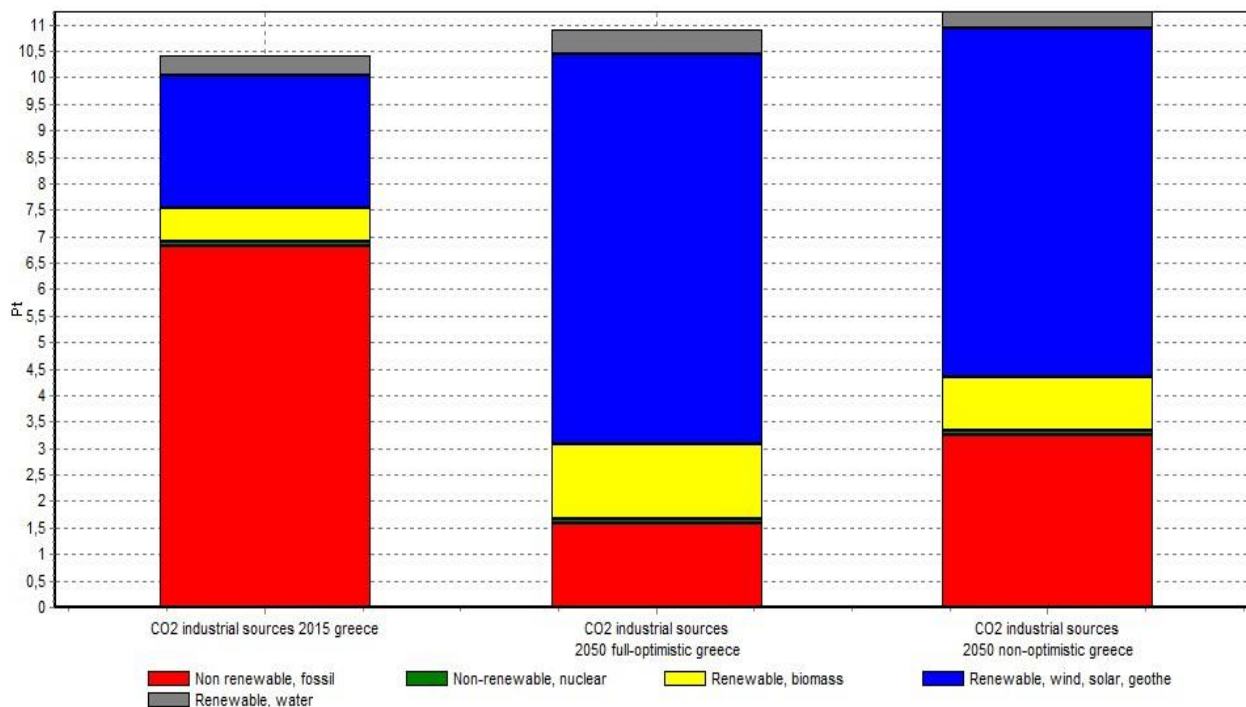


Σχήμα 5-14: Σύγκριση των ενεργειακών απαιτήσεων για τον διαχωρισμό και την συμπίεση βιομηχανικού CO<sub>2</sub> το 2015 [49]

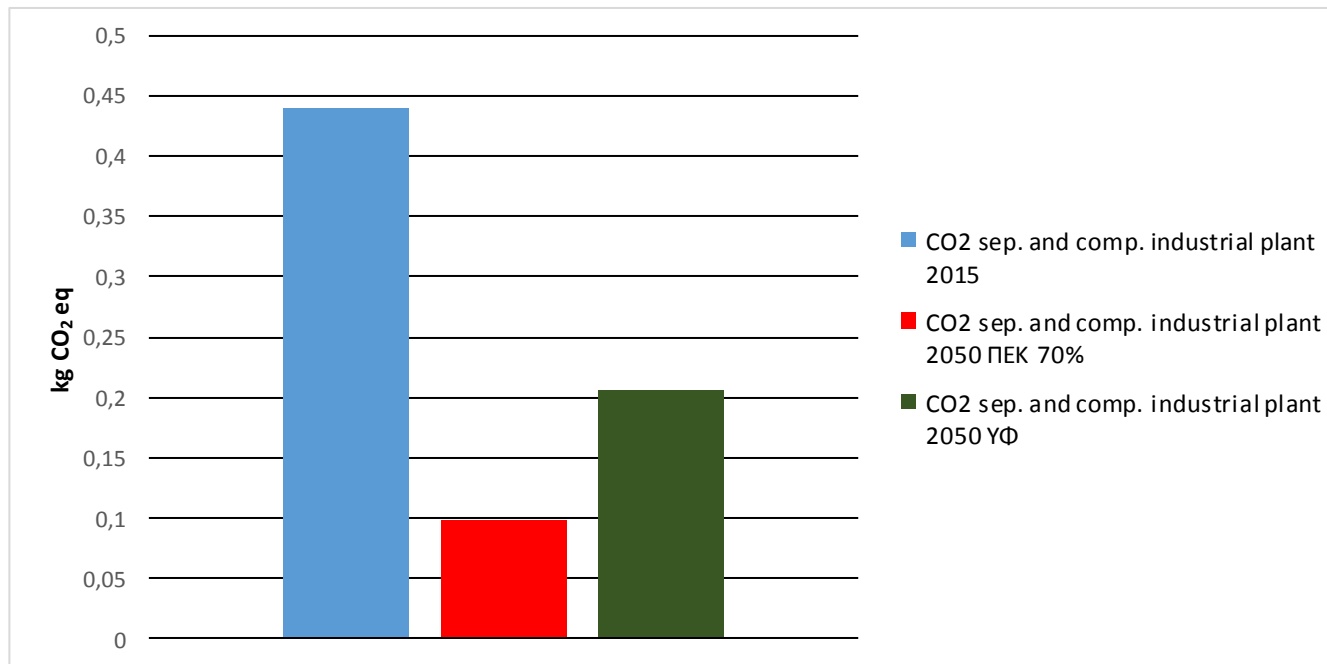


Σχήμα 5-15: Σύγκριση των αέριων ρύπων κατά τον διαχωρισμό και την συμπίεση βιομηχανικού CO<sub>2</sub> το 2015 [49]

Εν συνεχεία γίνεται μια σύγκριση των ενεργειακών απαιτήσεων και εκπομπών αέριων ρύπων για τον διαχωρισμό και τη συμπίεση CO<sub>2</sub> από βιομηχανικές μονάδες κάθε σεναρίου ενεργειακού μίγματος.



Σχήμα 5-16: Σύγκριση των ενεργειακών απαιτήσεων για τον διαχωρισμό και την συμπίεση βιομηχανικού CO<sub>2</sub> ανάμεσα σε κάθε σενάριο [49]

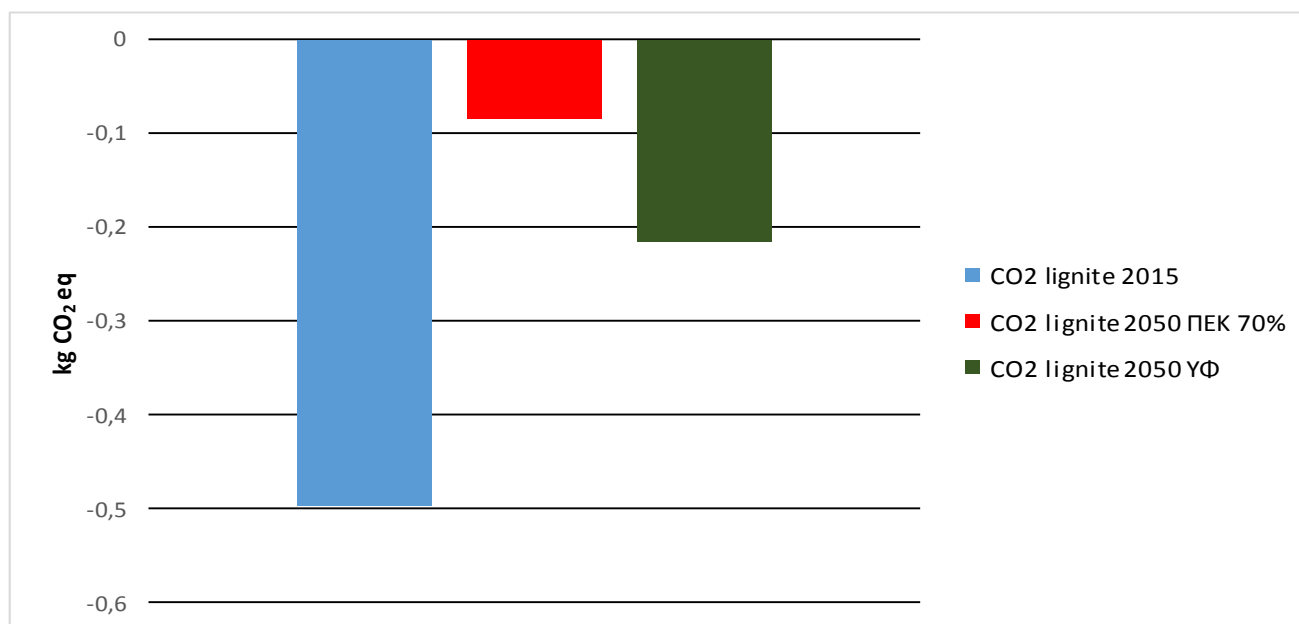


Σχήμα 5-17: Σύγκριση των εκπομπών αέριων του θερμοκηπίου για τον διαχωρισμό και την συμπίεση βιομηχανικού CO<sub>2</sub> ανάμεσα σε κάθε σενάριο [49]

Όπως φαίνεται και στα παραπάνω σχήματα η διαφορά είναι ότι για τον διαχωρισμό και την συμπίεση του CO<sub>2</sub> το 2050 έχουμε παρόμοιες ενεργειακές απαιτήσεις σε σχέση με το 2015 όμως αυτές καλύπτονται από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και όχι από μονάδες ορυκτών καυσίμων οι οποίες παράγουν περισσότερες εκπομπές αέριων ρύπων.

### 5.3.2 Εφαρμογή σε λιγνιτική μονάδα

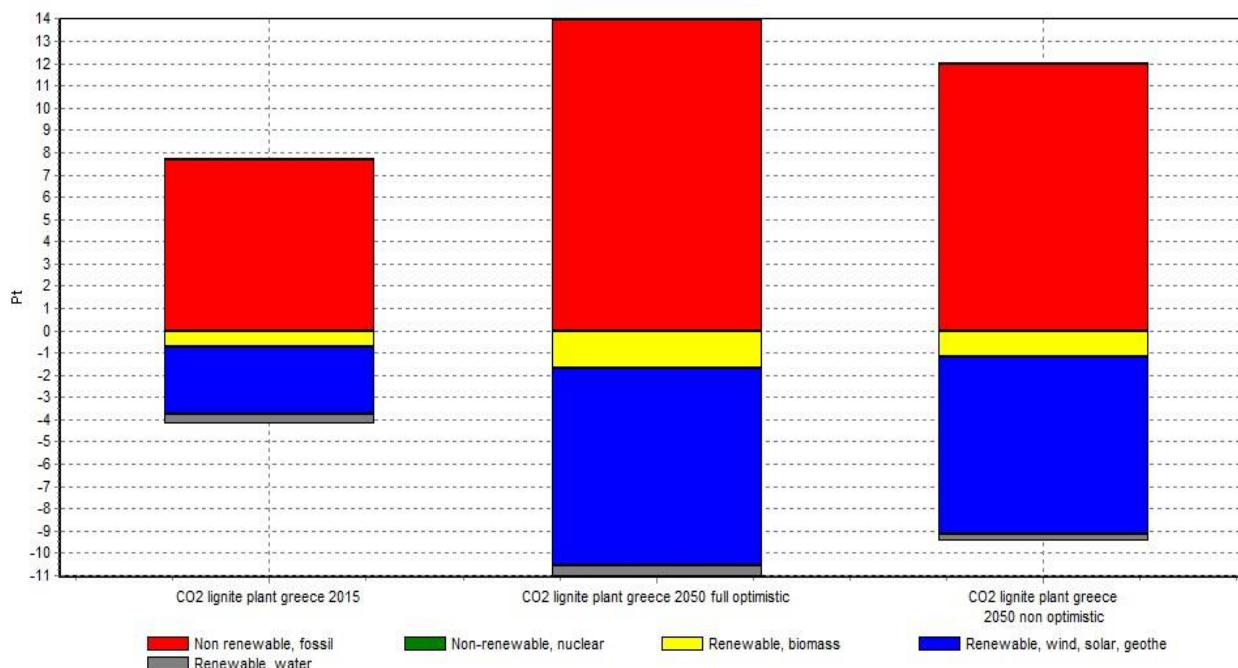
Κατά την αξιοποίηση των καυσαερίων μιας λιγνιτικής μονάδας υπάρχει μια σημαντική διαφορά σε σύγκριση με τα καυσαέρια που προέρχονται από βιομηχανίες, αυτό είναι ότι με την παραγωγή συγκεκριμένων ποσοτήτων CO<sub>2</sub> λαμβάνουμε και ηλεκτροπαραγωγή η οποία αξιοποιείται. Στην περίπτωση λιγνιτικής μονάδας και με την βοήθεια του Simapro βρήκαμε ότι για να παραχθεί 1 kWh ηλεκτρική απαιτούνται 10,2 MJ με βαθμό απόδοσης της μονάδας 35,2%.<sup>[49]</sup> Οπότε το ποσό ηλεκτροπαραγωγής που αξιοποιείται από την συγκέντρωση 1kg CO<sub>2</sub> θα είναι  $el=1/10,2=0,098$  kWh. Παρακάτω κάνουμε μια σύγκριση για την δέσμευση CO<sub>2</sub> σε κάθε σενάριο για να δούμε τις διαφορές.



Σχήμα 5-18: Εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου κατά την δέσμευση CO<sub>2</sub> μετά την καύση λιγνίτη σε μονάδα κάθε σεναρίου <sup>[49]</sup>

Όπως φαίνεται και στο παραπάνω σχήμα οι εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου κυρίως CO<sub>2</sub> περιορίζονται αισθητά με την δέσμευση του το 2015 καθώς στο ενεργειακό μίγμα το μεγαλύτερο ποσό ηλεκτροπαραγωγής προέρχεται από την καύση ορυκτών καυσίμων ενώ με τα σενάρια για το ενεργειακό μίγμα της ηλεκτροπαραγωγής το 2050 πάλι έχουμε μείωση των εκπομπών CO<sub>2</sub> σε μικρότερο βαθμό όμως αφού στην ηλεκτροπαραγωγή έχουν εισχωρήσει ΑΠΕ και τα ορυκτά καύσιμα έχουν μειωθεί.

Αυτό διακρίνεται και στο παρακάτω σχήμα των ενεργειακών απαιτήσεων όπου το 2015 που η συμμετοχή των ορυκτών καυσίμων είναι η περισσότερη βλέπουμε ότι γλυτώνουμε σε ενέργεια προερχόμενη από καύση ορυκτών καυσίμων σε σύγκριση με τα σενάρια του 2050 όπου η συμμετοχή των ΑΠΕ είναι μεγαλύτερη από τα ορυκτά καύσιμα.

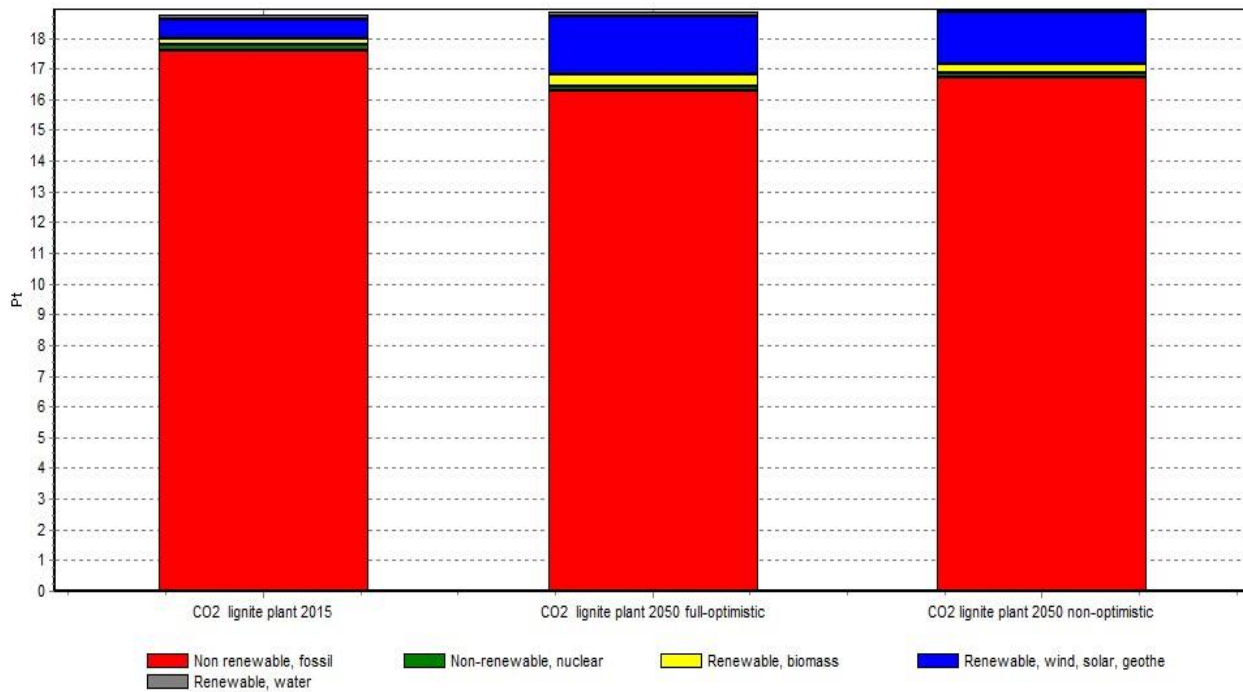


Σχήμα 5-19: Ενεργειακές απαιτήσεις κατά την δέσμευση CO<sub>2</sub> μετά την καύση λιγνίτη σε μονάδα κάθε σενάριο <sup>[49]</sup>

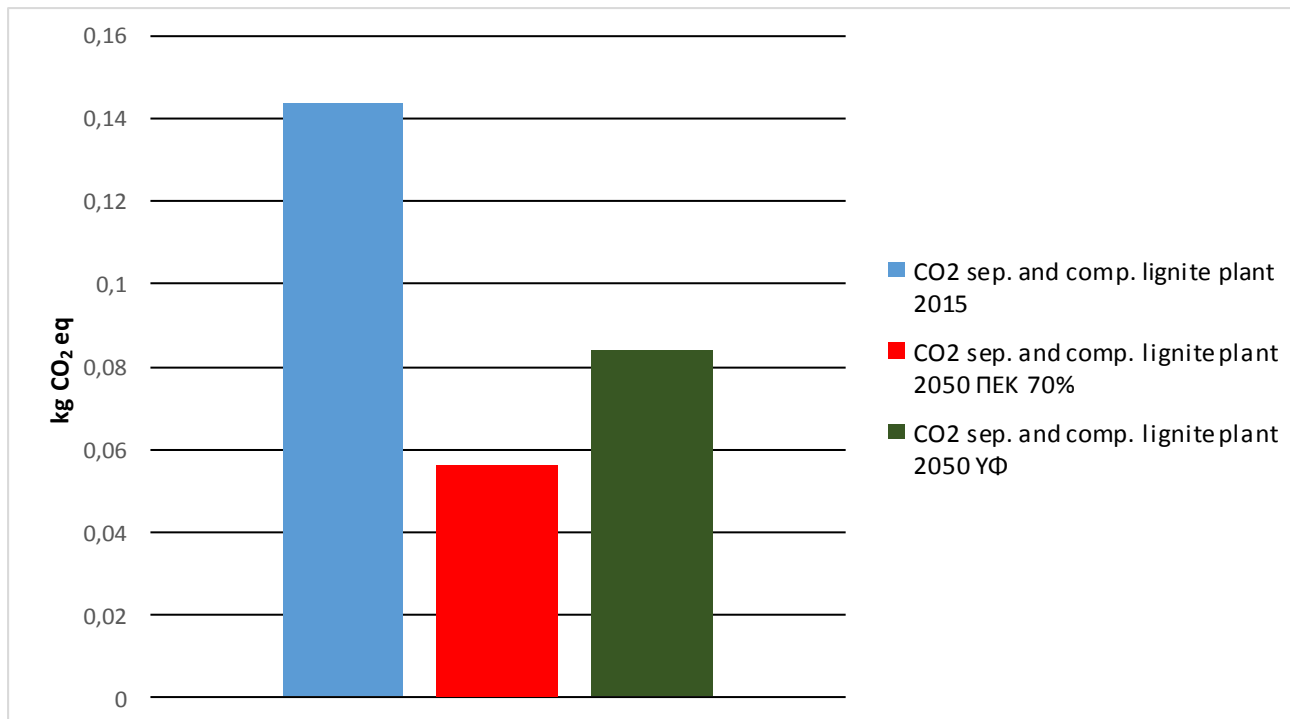
### Διαχωρισμός και συμπίεση CO<sub>2</sub> από τα καυσαέρια λιγνιτικής μονάδας

Τώρα στην περίπτωση που λαμβάνουμε CO<sub>2</sub> από τα καυσαέρια λιγνιτικής μονάδας παρατηρούμε από τον πίνακα 6 του παραρτήματος ότι η πυκνότητα διοξειδίου του άνθρακα είναι 13,5% του όγκου των καυσαερίων. Οπότε καλούμαστε να υπολογίσουμε την ηλεκτρική ενέργεια που θα απαιτηθεί για τον διαχωρισμό του από τα άλλα καυσαέρια με την τεχνολογία προσρόφησης με εναλλαγή πίεσης PSA που όπως έχει σημειωθεί και στην θεωρία απαιτούνται 0,25 kWh/m<sup>3</sup> καυσαερίων για την δέσμευση του 40% CO<sub>2</sub>. <sup>[42]</sup> Αφού η περιεκτικότητα CO<sub>2</sub> στα καυσαέρια λιγνιτικής μονάδας είναι της τάξης του 13,5% και γνωρίζοντας το V<sub>0</sub>=0,506 m<sup>3</sup>/kg. <sup>[48]</sup> Θέλουμε να αναγάγουμε τον διαχωρισμό σε 1 kg CO<sub>2</sub> βρίσκουμε τον όγκο που καταλαμβάνει το 13,5% των καυσαερίων άρα V<sub>CO2</sub>=0.506/0.135=3,748 m<sup>3</sup> τελικά θα απαιτηθούν e<sub>l</sub>=V<sub>CO2</sub>\*0,25 => e<sub>l,sep</sub>=0.937 kWh/kg. Η ενέργεια που θα απαιτηθεί για την συμπίεση του δεν θα αλλάξει οπότε και σε αυτή την περίπτωση e<sub>l,comp</sub>=0.03 kWh/kg.

Παρακάτω κάνουμε την σύγκριση για τον διαχωρισμό και την συμπίεση του CO<sub>2</sub> προερχόμενου από λιγνιτική μονάδα σε κάθε σενάριο ενεργειακού μίγματος.



Σχήμα 5-20: Σύγκριση των ενεργειακών απαιτήσεων για τον διαχωρισμό και την συμπίεση λιγνιτικού CO<sub>2</sub> ανάμεσα σε κάθε σενάριο <sup>[49]</sup>

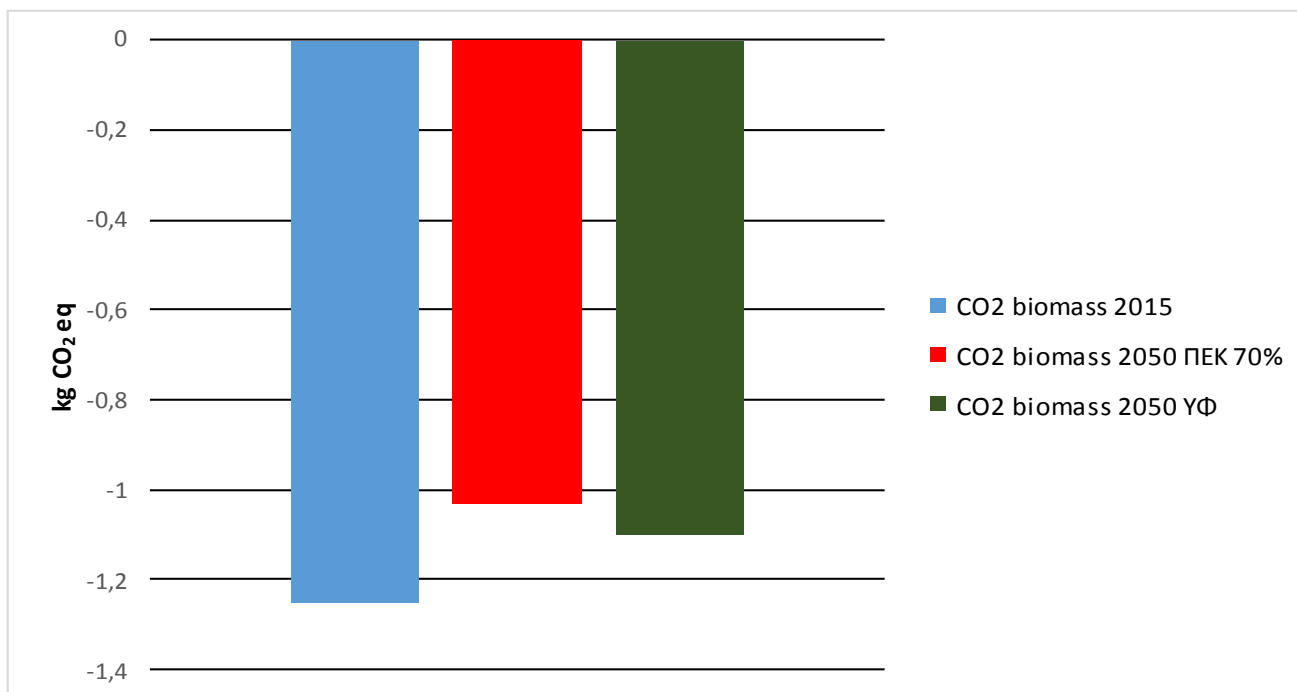


Σχήμα 5-21: Σύγκριση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου για τον διαχωρισμό και την συμπίεση λιγνιτικού CO<sub>2</sub> ανάμεσα σε κάθε σενάριο <sup>[49]</sup>

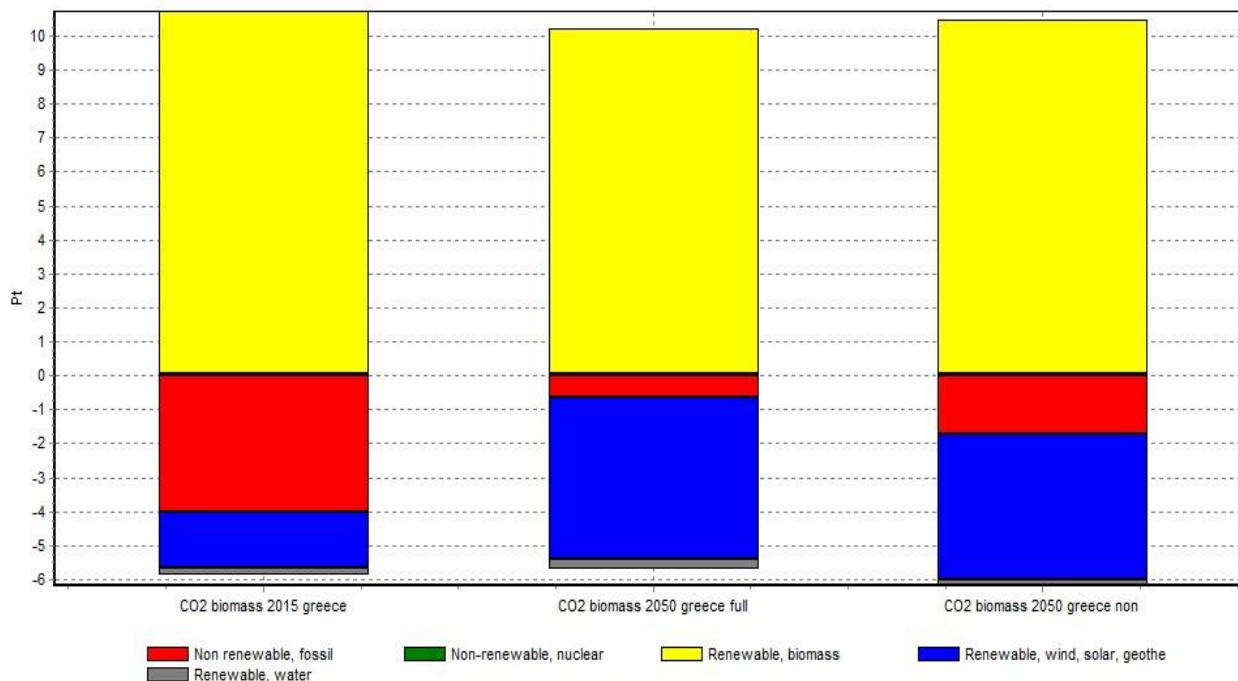
Από τα παραπάνω σχήματα προκύπτει ότι για τον διαχωρισμό και την συμπίεση CO<sub>2</sub> όπως αναμέναμε υπάρχουν μεγαλύτερες εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου το έτος 2015 και αυτό γιατί παρόλο που οι ενεργειακές απαιτήσεις είναι σχεδόν ίδιες σε κάθε σενάριο εντούτοις στο ενεργειακό μίγμα του 2015 συμμετέχει σε μεγάλο βαθμό η καύση ορυκτών καυσίμων κάνοντας την όλη διαδικασία πιο ρυπογόνα σε σύγκριση με τα σενάρια του 2050.

### 5.3.3 Εφαρμογή σε μονάδα βιομάζας

Με την αξιοποίηση των καυσαερίων μιας μονάδας βιομάζας όπως και στη λιγνιτική μονάδα και σε αυτή την περίπτωση με την παραγωγή συγκεκριμένων ποσοτήτων CO<sub>2</sub> λαμβάνουμε και ηλεκτροπαραγωγή η οποία αξιοποιείται. Με το Simapro βρίσκουμε τι γλυτώνουμε με την δέσμευση 1kg CO<sub>2</sub> από μονάδα βιομάζας από πλευράς εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου και ενεργειακών απαιτήσεων.<sup>[49]</sup>



Σχήμα 5-22: Εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου κατά την δέσμευση CO<sub>2</sub> μετά την καύση βιομάζας σε μονάδα κάθε σεναρίου<sup>[49]</sup>



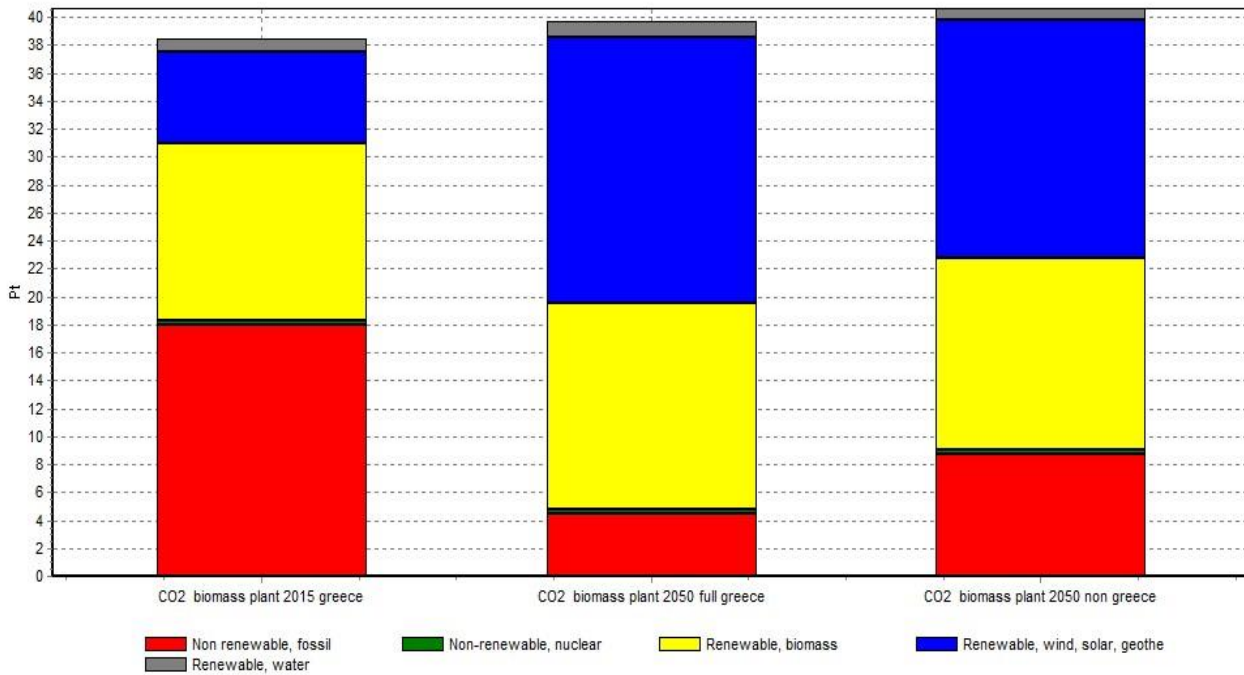
Σχήμα 5-23: Ενεργειακές απαιτήσεις κατά την δέσμευση CO<sub>2</sub> μετά την καύση βιομάζας σε μονάδα κάθε σεναρίου <sup>[49]</sup>

Από τα παραπάνω σχήματα βλέπουμε ότι γλυτώνουμε με την μονάδα δέσμευσης CO<sub>2</sub> περισσότερο ορυκτό καύσιμο από την ηλεκτροπαραγωγή του έτους 2015 κάτι που επιθυμούμε, όμως το 2050 που εισέρχονται στο ενεργειακό μίγμα οι ΑΠΕ παρατηρούμε ότι η κατανάλωση για την δέσμευση CO<sub>2</sub> προέρχεται κατά κύριο λόγο από αυτές, με τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου που δεσμεύονται παρόλα αυτά να μην μειώνονται αισθητά .

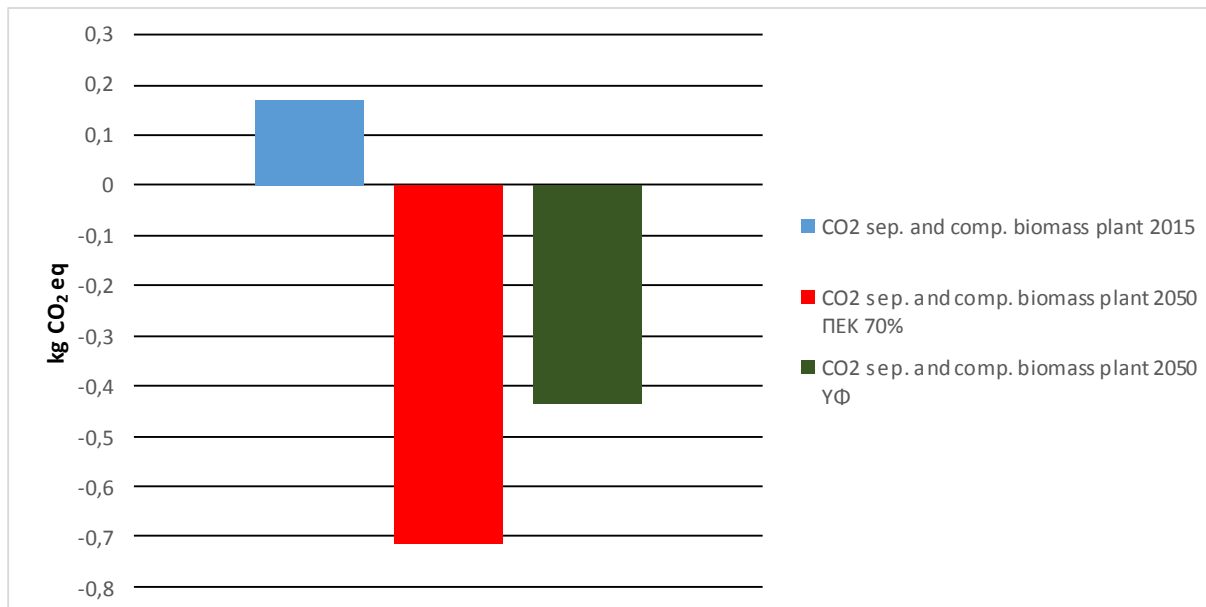
#### Διαχωρισμός και συμπίεση CO<sub>2</sub> από τα καυσαέρια μονάδας βιομάζας

Τώρα στην περίπτωση που λαμβάνουμε CO<sub>2</sub> από τα καυσαέρια μονάδας βιομάζας παρατηρούμε από τον πίνακα 6 του παραρτήματος ότι η πυκνότητα διοξειδίου του άνθρακα είναι 6% του όγκου των καυσαερίων. Οπότε καλούμαστε να υπολογίσουμε την ηλεκτρική ενέργεια που θα απαιτηθεί για τον διαχωρισμό του από τα άλλα καυσαέρια με την τεχνολογία προσρόφησης με εναλλαγή πίεσης PSA που όπως έχει σημειωθεί και στην θεωρία απαιτούνται 0,25 kWh/m<sup>3</sup> καυσαερίων για την δέσμευση του 40% CO<sub>2</sub>. <sup>[42]</sup> Αφού η περιεκτικότητα CO<sub>2</sub> στα καυσαέρια μιας μονάδας βιομάζας είναι της τάξης του 6% και γνωρίζοντας το V<sub>0</sub>=0,506 m<sup>3</sup>/kg. <sup>[48]</sup> Θέλουμε να αναγάγουμε τον διαχωρισμό σε 1 kg CO<sub>2</sub> βρίσκουμε τον όγκο που καταλαμβάνει το 6% των καυσαερίων άρα V<sub>CO2</sub>=0.506/0.06=8,433 m<sup>3</sup> τελικά θα απαιτηθούν el= V<sub>CO2</sub>\*0,25 => el<sub>sep</sub>=2.11 kWh/kg. Η ενέργεια που θα απαιτηθεί για την συμπίεση του δεν θα αλλάξει ούτε σ' αυτή την περίπτωση άρα el<sub>comp</sub>=0.03 kWh/kg.

Παρακάτω κάνουμε την σύγκριση για τον διαχωρισμό και την συμπίεση του CO<sub>2</sub> προερχόμενου από μονάδα βιομάζας σε κάθε σενάριο ενεργειακού μίγματος.



Σχήμα 5-24: Σύγκριση των ενεργειακών απαιτήσεων για τον διαχωρισμό και την συμπίεση CO<sub>2</sub> από μονάδα βιομάζας κάθε σεναρίου <sup>[49]</sup>



Σχήμα 5-25: Σύγκριση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου για τον διαχωρισμό και την συμπίεση CO<sub>2</sub> από μονάδα βιομάζας κάθε σεναρίου <sup>[49]</sup>

Για τις συνολικές εκπομπές του διαχωρισμού και της συμπίεσης εκπομπών CO<sub>2</sub> παρατηρούμε ότι το έτος του 2050 με την εισχώρηση περισσότερων μονάδων βιομάζας και ανανεώσιμων πηγών οι



εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου μειώνονται αισθητά έχοντας έτσι θετικό περιβαλλοντικό αντίκτυπο.

## 5.4 Παραγωγή υποκατάστατου φυσικού αερίου-SNG

### Θεμελιώδης περιγραφή

Στην αρχή αυτή του κεφαλαίου κάνουμε μια σχετική επανάληψη των όσων προηγήθηκαν στη θεωρία καθώς αυτό είναι το κύριο αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας. Τα τρία προβλήματα - σταθερότητα του δικτύου, αποθήκευση της ηλεκτρικής ενέργειας και του άνθρακα-δωρεάν ενεργειακός εφοδιασμός των ειδικών τμημάτων των μεταφορών - μπορούν να καλυφθούν από ανανεώσιμες πηγές μεθανίου όπως αιολική, ηλιακή, ωκεανική και υδροηλεκτρική ενέργεια. Το δίκτυο ρεύματος και το δίκτυο φυσικού αερίου συνδέονται μεταξύ τους.

Το πλεόνασμα των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, το οποίο δεν μπορεί να τροφοδοτείται στο δίκτυο λόγω σταθερότητας ή ελλείψει ζήτησης, μπορεί να αποθηκευτεί στο δίκτυο του φυσικού αερίου. Οι ανανεώσιμες πηγές μεθανίου μπορούν να μετατραπούν σε ισχύ και να σταθεροποιήσουν την λειτουργία του δικτύου με την παροχή βοηθητικών υπηρεσιών. Με τον τρόπο αυτό, η παραγωγή ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές μπορεί να μετατοπιστεί τόσο σε προσωρινή όσο και χωρική.

(Πηγή: [Sterner\\_bioenergy and rm from renewable \(thesis\).pdf](#))<sup>[43]</sup>

### **Αποθήκευση ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές, όπως το μεθάνιο με τη διασύνδεση δικτύων ηλεκτρισμού και φυσικού αερίου**

Η βασική ιδέα του μεθανίου από ανανεώσιμες πηγές βασίζεται στην αμοιβαία σύνδεση του ηλεκτρικού δικτύου με το δίκτυο του φυσικού αερίου. Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από φυσικό αέριο αποτελεί σπουδαίο τεχνολογικό επίτευγμα. Η νέα πρωτοποριακή ιδέα μετατρέπει τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας σε φυσικό αέριο, δηλαδή ένα φυσικό υποκατάστατο του φυσικού αερίου. Η ανανεώσιμη ενέργεια μετατρέπεται μέσω ηλεκτρόλυσης σε υδρογόνο. Το H<sub>2</sub> μπορεί επίσης να παραχθεί απευθείας από την ηλιακή θερμική ενέργεια ή από συνεχές ρεύμα ηλιακής ενέργειας, εξοικονομώντας τον φωτοβολταϊκό μετατροπέα και τον ανορθωτή ηλεκτρόλυσης. Το υδρογόνο συνδυάζεται με το CO<sub>2</sub> και μετατρέπονται σε μεθάνιο σε μια θερμοχημική σύνθεση (μεθανοποίηση). Πιθανές πηγές CO<sub>2</sub> είναι π.χ. ηλεκτροπαραγωγή από ορυκτά καύσιμα, μονάδες παραγωγής βιοαερίου, αεριοποίησης, αναβαθμισμένο και καθαρισμένο CO<sub>2</sub> από τις βιομηχανικές διαδικασίες όπως η παραγωγή τσιμέντου, ή το CO<sub>2</sub> που ανακτάται από τον αέρα. Το ανανεώσιμο υποκατάστατο του φυσικού αερίου (SNG) μπορεί να αποθηκευθεί, διανεμηθεί και στραφεί σε πρώτη ζήτηση στην ισορροπία ισχύος, π.χ. σε αεριοστροβίλους ή μονάδες συνδυασμένου κύκλου.<sup>[43]</sup>

Με τον τρόπο αυτό, η ανανεώσιμη ηλεκτρική ενέργεια αποθηκεύεται ως χημική ενέργεια σε υφιστάμενες δυνατότητες αποθήκευσης, το οποίο είναι ένα πλεονέκτημα έναντι του υδρογόνου. Η αποθήκευση και οι τεχνολογίες μετατροπής της ενέργειας για το φυσικό αέριο αποτελούν τεχνολογία αιχμής και είναι εμπορικότερες σε σύγκριση με τις τεχνολογίες υδρογόνου. Ένα περαιτέρω πλεονέκτημα για την αποθήκευση είναι η υψηλότερη ενεργειακή πυκνότητα του

μεθανίου. Η δυναμικότητα μεταφοράς ενέργειας μέσω αγωγών του φυσικού αερίου είναι μια τάξη μεγέθους μεγαλύτερη από ό,τι των γραμμών μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας, δίνοντας έτσι ένα ακόμα πλεονέκτημα της χρήσης του υπάρχοντος δικτύου φυσικού αερίου για την αποθήκευση ανανεώσιμης ενέργειας.<sup>[43]</sup>

Μια άλλη δυνατότητα που παρέχει θετική εξισορρόπηση ενέργειας και παρεπόμενων υπηρεσιών είναι η δεξαμενή αποθήκευσης υδρογόνου και ο έλεγχος της ισχύος της ηλεκτρόλυσης, σύμφωνα με τις απαιτήσεις λειτουργίας του δικτύου, π.χ. μείωση της ισχύος της ηλεκτρόλυσης αν αυξηθεί το φορτίο του δικτύου ή οι ικανότητες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας εφόσον πέσουν έξω.<sup>[43]</sup>

Με τον τρόπο αυτό, η παραγωγή ανανεώσιμης ενέργειας και η ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας μπορεί να προσαρμοστούν μεταξύ τους στο χώρο και στον χρόνο απόσβεσης και μπορεί να αποφευχθεί η περιστολή των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Οι ανανεώσιμες πηγές παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας καθώς και η έννοια του SNG μπορούν να παρέχουν βασικό φορτίο, να καλύπτουν την ζήτηση ισχύος ανά πάσα στιγμή και να υποκαταστήσουν την συμβατική ηλεκτροπαραγωγή στο σύνολό της.<sup>[43]</sup>

### **Ηλεκτρόλυση για την παραγωγή υδρογόνου**

Η απόδοση μετατροπής ηλεκτρικής ενέργειας σε υδρογόνο είναι στην περιοχή από 62-80%. Νερό αποσυντίθεται προς υδρογόνο και οξυγόνο με ηλεκτρόλυση. Τυπικές τεχνολογίες είναι η αλκαλική ηλεκτρόλυση, χρησιμοποιώντας καυστικό διάλυμα υδροξειδίου του καλίου (KOH) σε θερμοκρασίες 70-140 °C. Τέτοιοι ηλεκτρολύτες λειτουργούν σε πιέσεις των 1-200 bar και είναι διαθέσιμοι σε χωρητικότητες >0,1 MWeI. Δύο άλλες τεχνολογίες αναπτύσσονται αυτή τη στιγμή: με πολυμερικές μεμβράνες (PEM) δεν απαιτείται υγρός ηλεκτρολύτης και μόνο χρήση H<sub>2</sub>O, η οποία επιτρέπει ένα απλό σχέδιο. Ωστόσο, το μεγαλύτερο μειονέκτημα είναι οι μικρές χωρητικότητες (<50 kW) και η περιορισμένη διάρκεια ζωής των μεμβρανών. Παρόμοια με την τεχνολογία κυψελών για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από βιομεθάνιο ή βιοαέριο, υψηλής θερμοκρασίας ηλεκτρόλυσης, είναι διαθέσιμη για την παραγωγή υδρογόνου, που εργάζονται σε ένα εύρος θερμοκρασίας των 700-1.000 °C.<sup>[43]</sup>

### **Μεθανοποίηση**

Η μεθανοποίηση είναι η συνήθης τεχνολογία αεριοποίησης του άνθρακα και αναπτύχθηκε για την αεριοποίηση της βιομάζας. Η αποτελεσματικότητα του methanizing syngas (κύρια συστατικά H<sub>2</sub>, CO, CO<sub>2</sub>) κυμαίνεται από περίπου 75-85%. Η σύνθεση της μεθανοποίησης είναι μία εξώθερμη καταλυτική διεργασία με θερμοκρασίες 180-350 °C και με επίπεδα πίεσης από 1-100 bar. Ωστόσο, το εύρος θερμοκρασιών πρέπει να προσαρμοστεί ξεχωριστά σύμφωνα με το αέριο σύνθεσης.<sup>[43]</sup>

Μια καθαρή μεθανοποίηση CO<sub>2</sub> δεν είναι ακόμη state-of-the-art και είναι σήμερα υπό έρευνα. Πρώτες εργαστηριακές δοκιμές δείχνουν ποσοστά μεθανοποίησης CO<sub>2</sub> μέχρι 95% σε πίεση 6-7 bar και 280 °C. Εάν απαιτούνται, C<sub>2-4</sub> υδρογονάνθρακες όπως το προπάνιο και ο αέρας μπορεί να είναι προστίθεται στο SNG μετά τη μεθανοποίηση για να εκπληρώσει τα πρότυπα για ένα φυσικό υποκατάστατο του φυσικού αερίου. Επίσης, άλλα καύσιμα (DME, FT-ντίζελ, κηροζίνη ανανεώσιμες

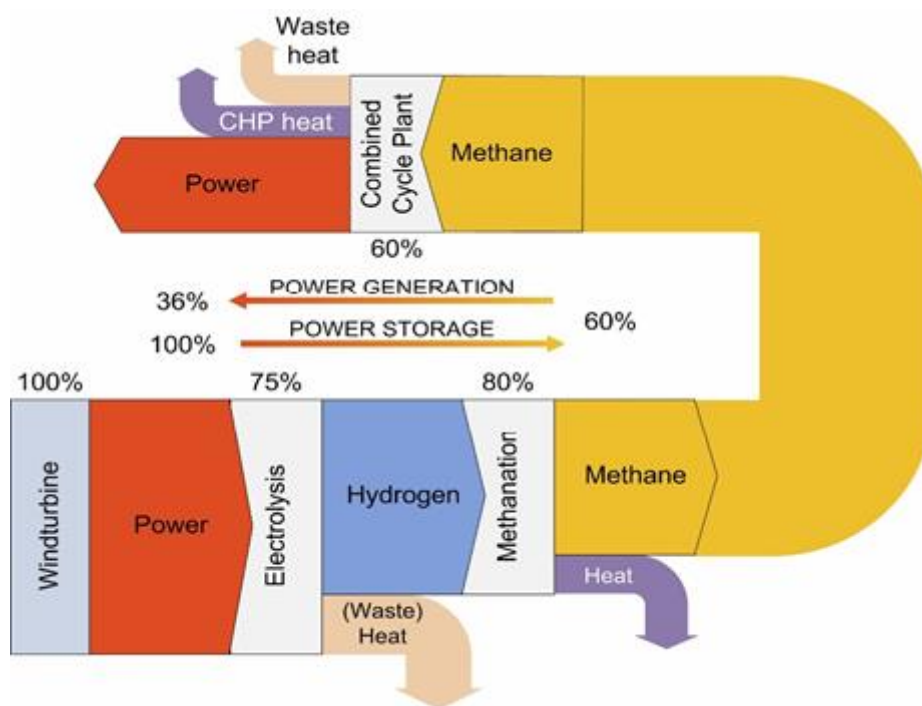
πηγές, κλπ.) που είναι ελκυστικά για μεταφορά ή βασικές πρώτες ύλες (αιθανόλη, μεθανόλη) μπορούν να προέρχονται από H<sub>2</sub> και CO<sub>2</sub>.<sup>[43]</sup>

### Ανάκτηση του CO<sub>2</sub> από τον αέρα και τα καυσαέρια

Είναι δυνατόν να ανακτήσουμε το CO<sub>2</sub> από την ατμόσφαιρα. Η ενεργειακή προσπάθεια για να εξαγάγουμε 1 kg CO<sub>2</sub> ποικίλλει ανάλογα με τη διαδικασία και ανέρχεται σε 8.2 MJel στη διαδικασία ZSW. Η ζήτηση ενέργειας για την εξαγωγή CO<sub>2</sub> από καυσαέρια (βιομάζα ή τα ορυκτά καύσιμα) είναι πολύ μικρότερη, όμως η συγκέντρωση είναι πολύ μεγαλύτερη (περίπου 10% κατ' όγκο) και δεν περιλαμβάνεται στον υπολογισμό της απόδοσης της αποθήκευσης ενέργειας.<sup>[43]</sup>

### Αποδοτικότητα των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας χρήση μεθανίου

Συνδυάζοντας τις αποδόσεις της ηλεκτρόλυσης και της μεθανοποίησης καταλήγουμε σε σύνθεση SNG με αποδοτικότητα στην περιοχή του 46 έως 75%, και κατά μέσο όρο 63%. Το SNG σε απόδοση ενέργειας είναι ίσο με το πρότυπο τεχνολογιών παραγωγής ηλεκτρισμού με φυσικό αέριο, όπως αεριοστροβίλων και CHPS (Combined Heat and Power) απόδοσης έως και 60% στην μονάδα συνδυασμένου κύκλου. Η απόδοση αποθήκευσης ενέργειας είναι έτσι σε ένα εύρος 28-45%, χωρίς να περιλαμβάνεται σε αυτό το λογιστικό πλεόνασμα θερμότητας από CHPS ή απώλειες ενέργειας του αερίου τροφοδοσίας, μεταφοράς και απόσυρσης. Στην καθαρή παραγωγή SNG, το καθαρό υδρογόνο μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί άμεσα και να τροφοδοτηθεί στο δίκτυο αερίου σε έναν ορισμένο βαθμό ή να αναμιχθεί στο SNG σε μερίδιο π.χ. 5% κατ' όγκο. Η συνολική αποδοτικότητα αυξάνει ιδανικά κατά 3-9% , κατά μέσο όρο 6%, καθώς αποφεύγεται η μεθανοποίηση.<sup>[43]</sup>



Σχήμα 5-26: Εκτενές διάγραμμα ροής της ενέργειας για την παραγωγή SNG (Πηγή: *Sterner\_bioenergy and rm from renewable (thesis).pdf*)<sup>[43]</sup>

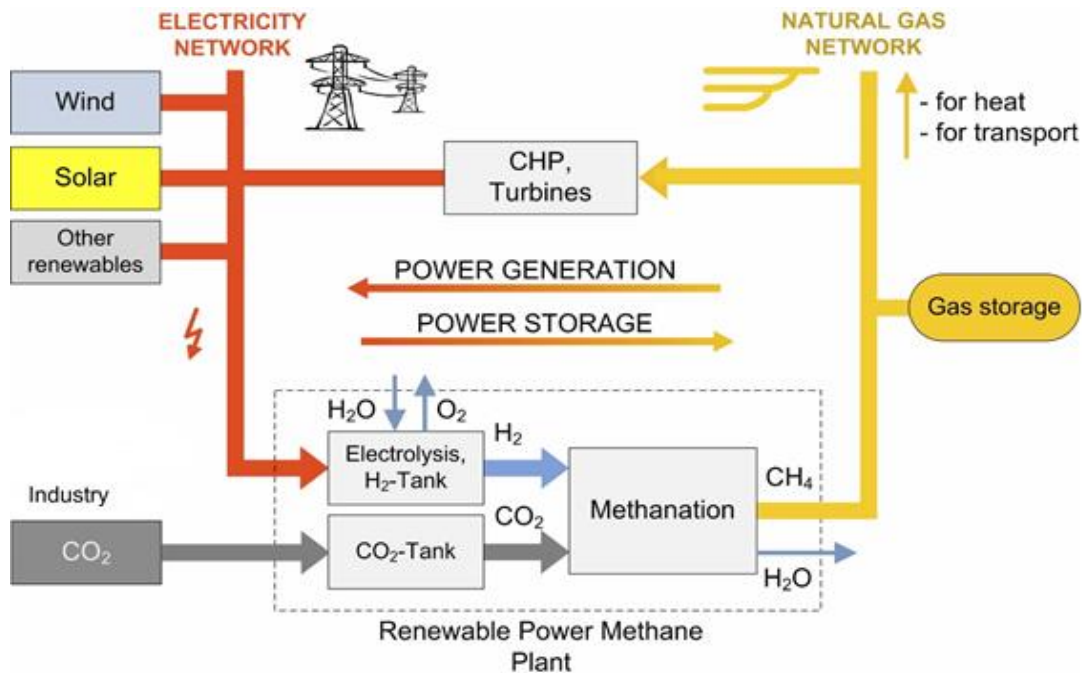
Η χρήση του ατμοσφαιρικού CO<sub>2</sub> μειώνει την απόδοση ανανεώσιμης ενέργειας σε μεθάνιο από περίπου 15% μέχρι 48%. Παραγωγή 10 MJth του SNG απαιτούν 16 MJel για την ηλεκτρόλυση, συμπεριλαμβανομένων των θερμικών «απώλειων ενέργειας» της μεθανοποίησης (μέση απόδοση 63%) και περίπου 4,8 MJel για την ανάκτηση CO<sub>2</sub> για να εξάγουμε 0,29 mA (0,58 kg) CO<sub>2</sub>. Μετατρέποντας εκ νέου σε ισχύ, η συνολική απόδοση της αποθηκευμένης ενέργειας είναι τότε περίπου 30%. Η ενεργειακή προσπάθεια για τη συμπίεση του CO<sub>2</sub> δεν περιλαμβάνεται στον υπολογισμό αυτό, αλλά αναμένεται να μην είναι πολύ υψηλή, καθώς η μονάδα μεθανοποίησης απαιτεί μέγιστες πιέσεις των 30 bar. <sup>[43]</sup>

Κλείνοντας, ανάλογα με την κατανάλωση ενέργειας των SNG (αποθήκευση ενέργειας, CHP, μεταφορές), μπορεί να χρησιμοποιηθεί περίπου το 30-60% των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Από τη μία πλευρά, αυτό επιβάλλει κάποιες ενεργειακές απώλειες από την άλλη όμως, είναι πιο χρήσιμο να χρησιμοποιήσουμε κάποιο μέρος του πλεονάσματος ισχύος από το να περιορίσουμε όλο αυτό και να χρησιμοποιήσουμε το 0%, δηλαδή αποδεχόμαστε 0% αποδοτικότητα των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Η αναγκαιότητα για μακροχρόνια αποθήκευση ενέργειας και φορέων ενέργειας με ουδέτερο ισοζύγιο άνθρακα με υψηλής ενέργειας πυκνότητα για τις μεταφορές είναι εκεί και πρέπει να τηρούνται. Σε αυτό το πλαίσιο, το SNG είναι μια αποτελεσματική ιδέα για να εξυπηρετήσει το σκοπό αυτό και να καλυφθούν τα υφιστάμενα κενά κατά τη μετάβαση των συστημάτων ενέργειας βασιζόμενων σε ανανεώσιμες πηγές. <sup>[43]</sup>

#### 5.4.1 Παραγωγή SNG από βιομηχανική μονάδα

Πολλές βιομηχανικές διεργασίες έχουν CO<sub>2</sub> ως απόβλητο αέριο το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε μονάδες μεθανοποίησης. Για παράδειγμα, οι χώροι τσιμεντοβιομηχανιών παρουσιάζουν υψηλές εκπομπές CO<sub>2</sub>, καθώς ο ασβεστόλιθος είναι αυτός που εκπέμπει μεγάλες ποσότητες CO<sub>2</sub> όταν θερμαίνεται μέχρι τους 1500°C και αυτή η διαδικασία πύρωσης είναι εξαιρετικά υψηλής ενέργειας και συνεπώς εντατικών εκπομπών. Άλλες διεργασίες είναι η κατασκευή χαλύβων, τα διυλιστήρια και χημικές βιομηχανίες, όπως η παραγωγή υλικών και πλαστικών (π.χ. μελαμίνη, αμμωνία, αλουμίνιο). Η ενσωμάτωση εγκατάστασης δέσμευσης διοξειδίου του άνθρακα εντός μιας μονάδας μεθανοποίησης μπορεί να μειώσει αισθητά τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου από τις βιομηχανικές μονάδες. Ακόμα το CO<sub>2</sub> μπορεί να συμπιεστεί ή να υγροποιηθεί και να μεταφερθεί εύκολα στις μονάδες μεθανοποίησης. Το τεχνο-οικονομικό όφελος από βιομηχανικές πηγές εκπομπών CO<sub>2</sub> μπορεί να είναι 100% καθαρό CO<sub>2</sub> με τη ροή του να είναι διαθέσιμη με πολύ χαμηλό ή ακόμη και μηδενικό κόστος, γεγονός που καθιστά αυτές τις πηγές ελκυστικές για τις μονάδες μεθανοποίησης: αξιοποιώντας τις αναπόφευκτες εκπομπές CO<sub>2</sub> πριν αυτές απελευθερωθούν στον αέρα. Όπως περιεγράφηκε και στην θεωρία για την αντίδραση της μεθανοποίησης απαιτείται ηλεκτρική ενέργεια για την ηλεκτρόλυση του νερού και ποσότητες CO<sub>2</sub> που στην συγκεκριμένη περίπτωση ανακτώνται από τα καυσαέρια βιομηχανικών μονάδων. Την ηλεκτρική ενέργεια που απαιτείται για την μεθανοποίηση θα την λαμβάνουμε σύμφωνα με τα σενάρια ενεργειακού μίγματος του κεφαλαίου 5.2 ενώ για τον διαχωρισμό και την συμπίεση CO<sub>2</sub> θα κάνουμε χρήση των

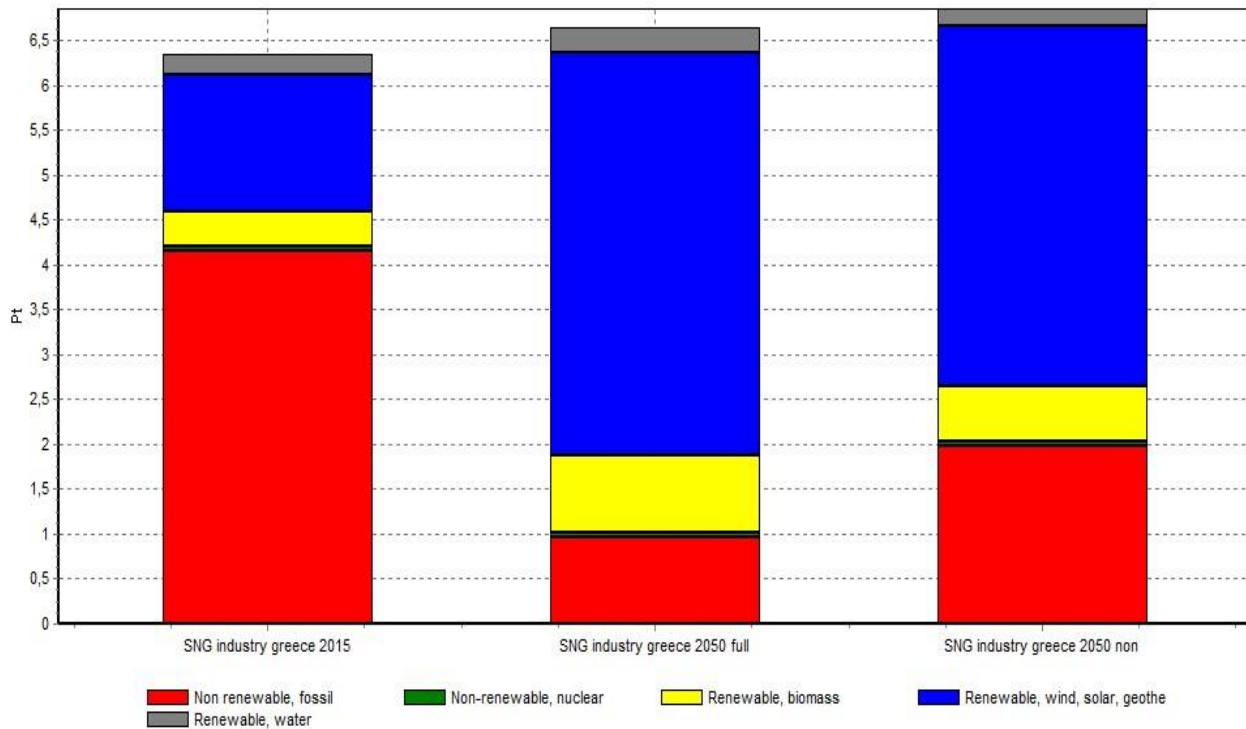
δεδομένων από το κεφάλαιο 5.3. Στην παρακάτω εποπτική απεικόνιση παρουσιάζεται μια τέτοια μονάδα μεθανοποίησης που αξιοποιεί τις εκπομπές CO<sub>2</sub> βιομηχανικών μονάδων.<sup>[43]</sup>



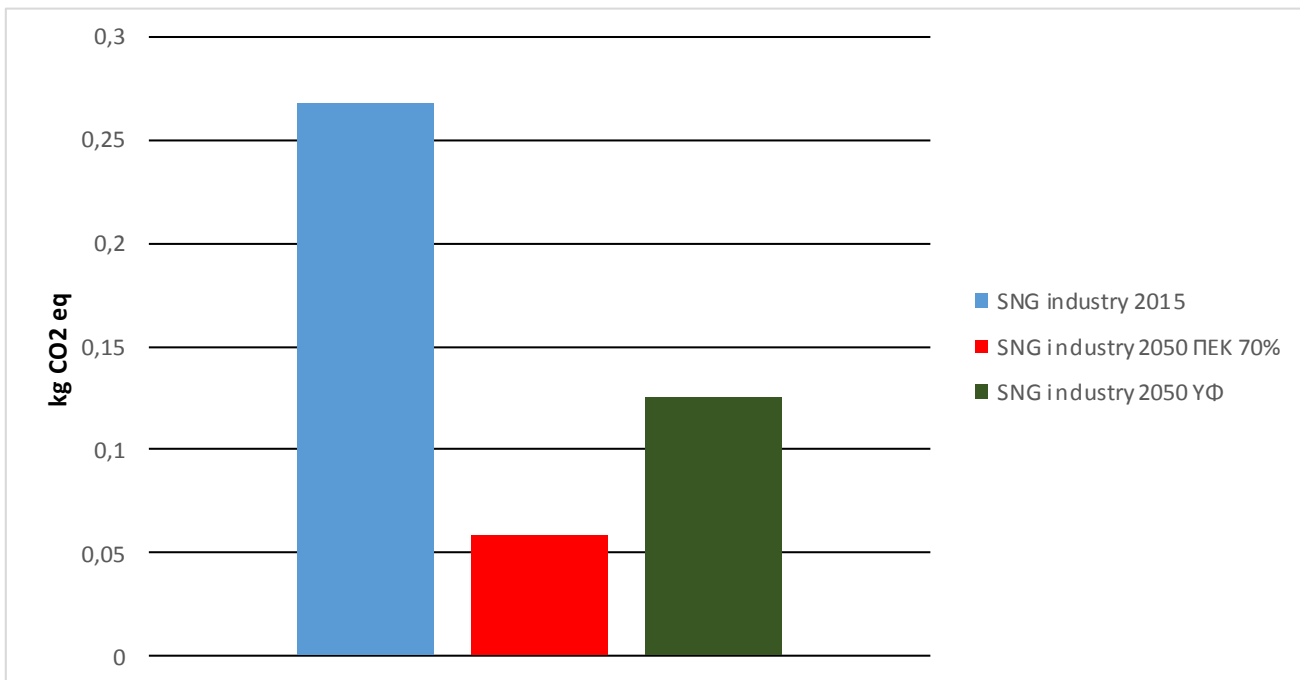
Σχήμα 5-27: Εγκατάσταση παραγωγής SNG από την δέσμευση CO<sub>2</sub> βιομηχανικών μονάδων<sup>[43]</sup>

#### 5.4.1.1 Ενεργειακές απαιτήσεις και εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου για την παραγωγή SNG από βιομηχανική μονάδα

Για την χημική αντίδραση της μεθανοποίησης βρήκαμε ότι απαιτούνται 4 kg ιονισμένου νερού και 14,35 kWh από άποψη ενέργειας για την διαδικασία της ηλεκτρόλυσης επιπρόσθετα απαιτούνται 2 kg συμπιεσμένου CO<sub>2</sub> για την παραγωγή 1 m<sup>3</sup> SNG ή κάνοντας χρήση της ανωτέρου θερμογόνου δύναμης του φυσικού αερίου, 39 MJ παραγόμενου SNG. (Πηγή: [www.elsevier.com/locate/he](http://www.elsevier.com/locate/he))<sup>[41]</sup>. Παρακάτω εμφανίζονται οι ενεργειακές απαιτήσεις και οι εκπομπές αερίων ρύπων για την παραγωγή ενός MJ υποκατάστατου φυσικού αερίου από βιομηχανικές μονάδες σε κάθε σενάριο.



Σχήμα 5-28: Ενεργειακές απαιτήσεις για την παραγωγή SNG από βιομηχανική μονάδα κάθε σεναρίου <sup>[49]</sup>



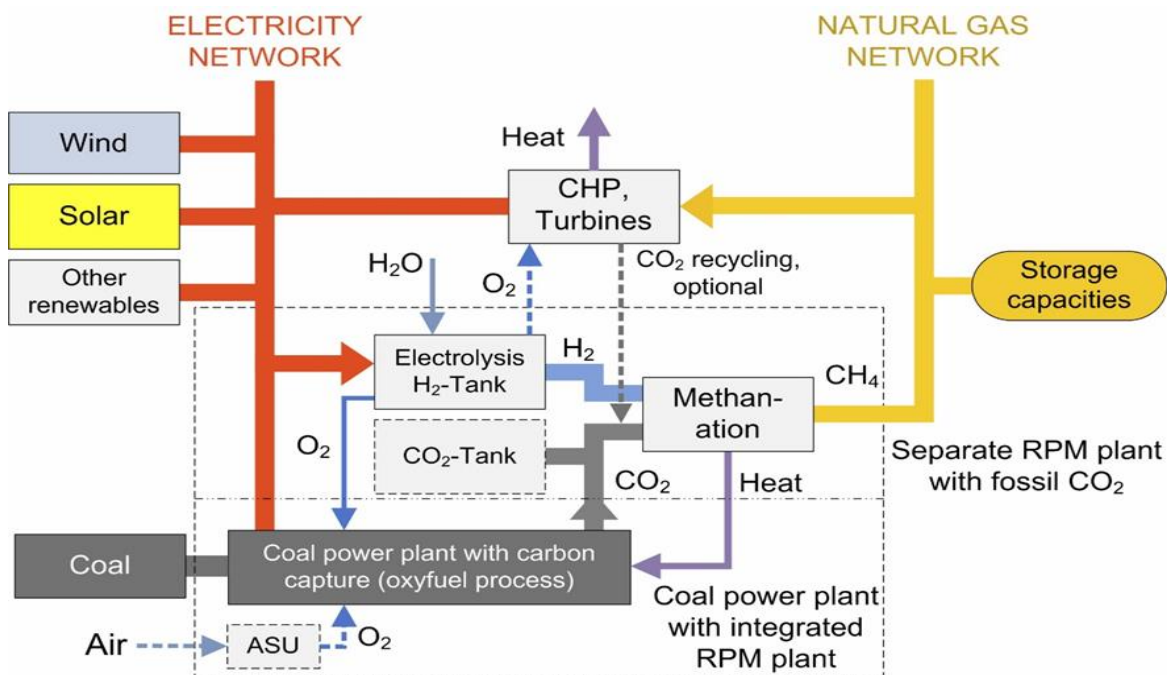
Σχήμα 5-29: Εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου για την παραγωγή SNG από βιομηχανική μονάδα κάθε σεναρίου <sup>[49]</sup>

Και σε αυτή την περίπτωση οι διαφορές εστιάζονται στο ενεργειακό μίγμα που έχουμε σε κάθε σενάριο κάνοντας έτσι την παραγωγή SNG από την αξιοποίηση εκπομπών CO<sub>2</sub> από βιομηχανικές μονάδες το έτος 2050 πολύ πιο φιλική προς το περιβάλλον σε σύγκριση με το έτος 2015.

### 5.4.2 Παραγωγή SNG από λιγνιτική μονάδα

Η ιδέα του SNG μπορεί επίσης να συνδυαστεί με μονάδες ηλεκτροπαραγωγής από ορυκτά καύσιμα, όπως λιγνιτικές μονάδες, με την αποθήκευση του διαχωρισμένου CO<sub>2</sub> στο δίκτυο του φυσικού αερίου με αποτέλεσμα την αύξηση της χρήσης του μεριδίου ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές. Με τον διαχωρισμό του CO<sub>2</sub> κατά την διεργασία της μεθανοποίησης, είναι δυνατή η ανακύκλωση του CO<sub>2</sub>.<sup>[43]</sup>

Υπάρχουν διάφορες τεχνολογίες δέσμευσης για τις μονάδες ηλεκτροπαραγωγής από ορυκτά καύσιμα. Το CO<sub>2</sub> μπορεί να διαχωριστεί μετά τη διαδικασία καύσης (post-combustion), στη διαδικασία αεριοποίησης (pre-combustion) ή κατά την καύση με οξυγόνο (oxyfuel process). Το δεσμευμένο CO<sub>2</sub> ορυκτής προέλευσης μπορεί να υγροποιηθεί και να μεταφερθεί με φορτηγά, τρένα, αγωγούς ή δεξαμενόπλοια στο χώρο του σταθμού μεθανοποίησης και να μετατραπεί σε μεθάνιο με τη χρήση του υδρογόνου. Το σχήμα απεικονίζει ένα σενάριο καύσης ορυκτού καυσίμου με την μέθοδο oxyfuel. Πλεονάζον οξυγόνο από την ανανεώσιμη ηλεκτρόλυση μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως μέσο καύσης και υποκατάστατο οξυγόνο στην μονάδα διαχωρισμού του ατμοσφαιρικού αέρα.<sup>[43]</sup>

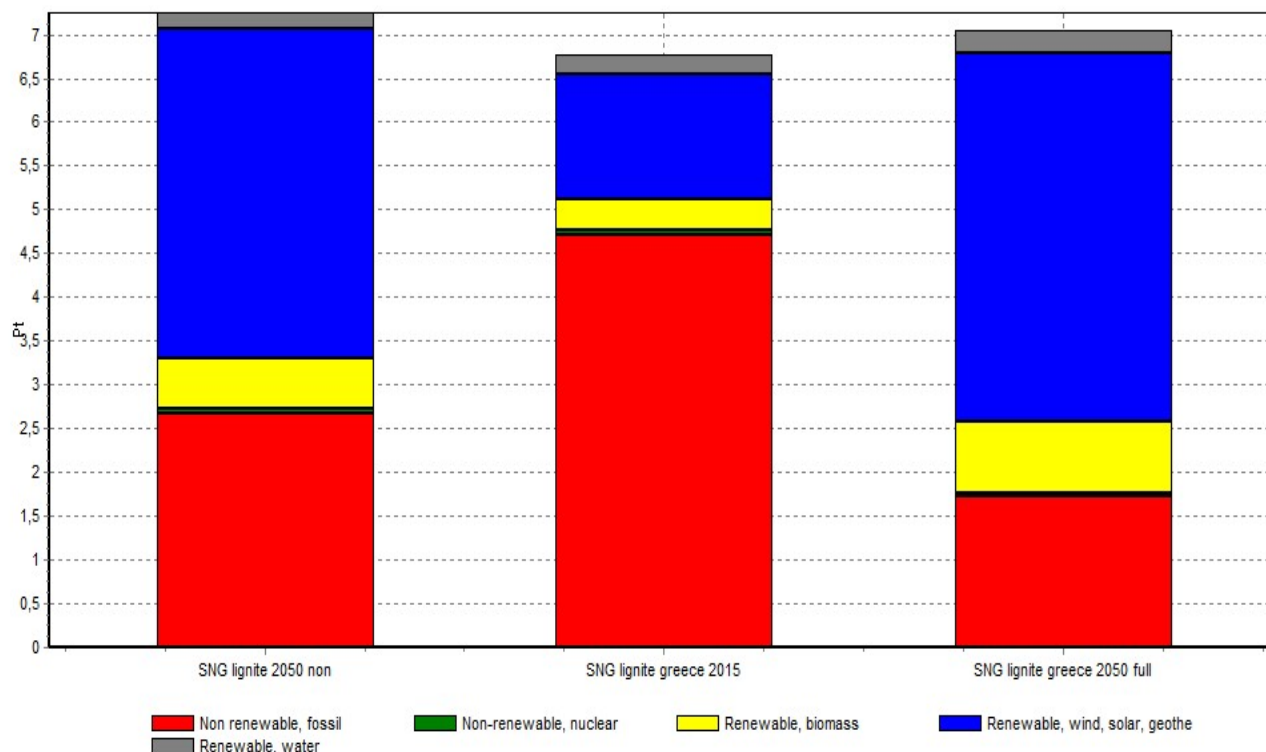


Σχήμα 5-30: Εγκατάσταση παραγωγής SNG από την δέσμευση CO<sub>2</sub> λιγνιτικών μονάδων<sup>[43]</sup>

Το παραγόμενο SNG δεν είναι «κλιματικά ουδέτερο» όπως είναι για παράδειγμα το SNG από τη βιομάζα ή όπως άλλων αυτόνομων σεναρίων γιατί χρησιμοποιείται CO<sub>2</sub> ορυκτής προέλευσης. Ωστόσο, καθώς το πλεόνασμα ανανεώσιμης ενέργειας χρησιμοποιείται και αποθηκεύεται, μπορεί να αντικαταστήσει τα ορυκτά καύσιμα από την παραγωγή ενέργειας του SNG, οπότε το αποθηκευμένο ορυκτό CO<sub>2</sub> χρησιμοποιείται για την αποφυγή άλλων ορυκτών εκπομπών CO<sub>2</sub>. Το καθαρό αποτέλεσμα είναι περιβαλλοντικά θετικό, δεδομένου ότι π.χ. η αιολική ενέργεια χρησιμοποιείται και δεν απορρίπτεται λόγω των προβλημάτων σταθερότητας του ηλεκτρικού δικτύου και το CO<sub>2</sub> ορυκτής προέλευσης, αποθηκεύεται προσωρινά σε μορφή SNG στο δίκτυο φυσικού αερίου. <sup>[43]</sup>

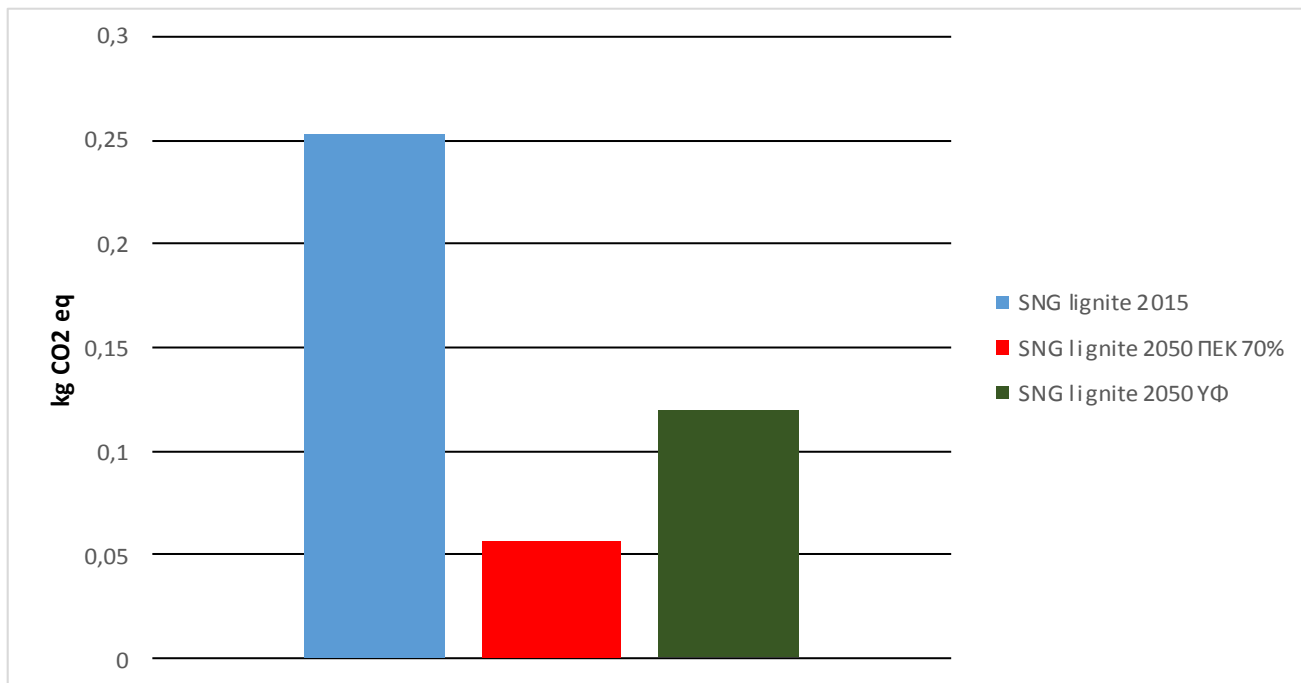
#### 5.4.2.1 Ενεργειακές απαιτήσεις και εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου για την παραγωγή SNG από λιγνιτική μονάδα

Τώρα για την παραγωγή SNG από λιγνιτική μονάδα και για την χημική αντίδραση της μεθανοποίησης απαιτούνται 4 kg ιονισμένου νερού και 14,35 kWh από άποψη ενέργειας για την διαδικασία της ηλεκτρόλυσης επιπρόσθετα απαιτούνται 2 kg συμπιεσμένου CO<sub>2</sub> για την παραγωγή 1 m<sup>3</sup> SNG ή κάνοντας χρήση της ανωτέρου θερμογόνου δύναμης του φυσικού αερίου, 39 MJ παραγόμενου SNG. <sup>[41]</sup> Παρακάτω εμφανίζονται οι ενεργειακές απαιτήσεις και οι εκπομπές αερίων ρύπων για την παραγωγή ενός 1 MJ υποκατάστατου φυσικού αερίου από λιγνιτικές μονάδες σε κάθε σενάριο.



Σχήμα 5-31: Ενεργειακές απαιτήσεις για την παραγωγή SNG από λιγνιτική μονάδα κάθε σεναρίου <sup>[49]</sup>





Σχήμα 5-32: Εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου για την παραγωγή SNG από λιγνιτική μονάδα κάθε σεναρίου <sup>[49]</sup>

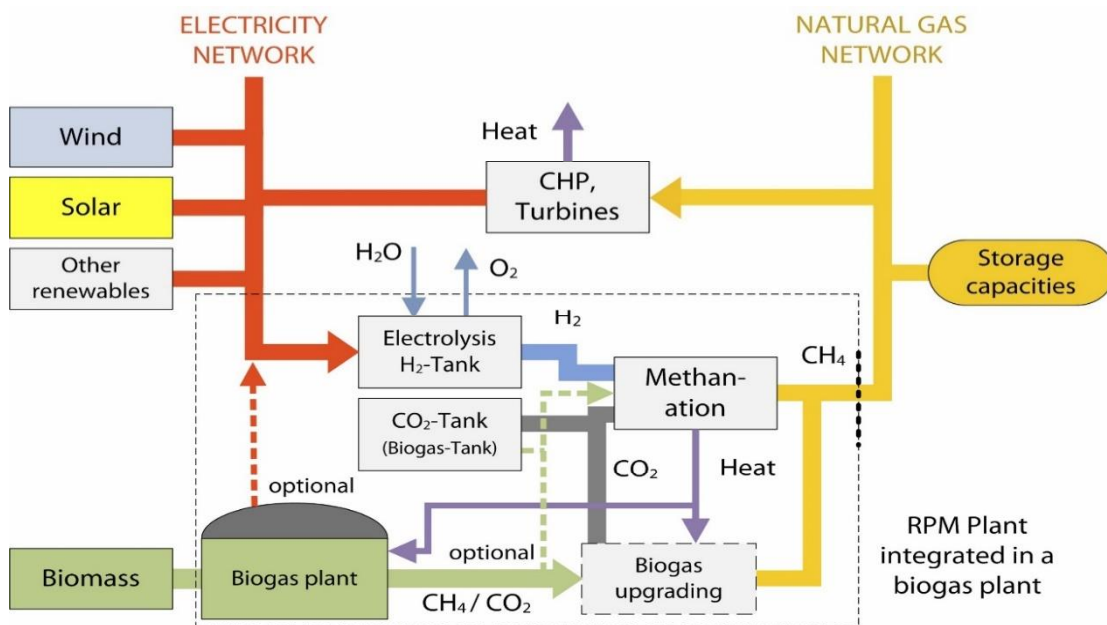
### 5.4.3 Παραγωγή SNG από μονάδα βιομάζας

Η βασική ιδέα μπορεί να συνδυαστεί με δύο κύριες γραμμές μετατροπής της βιοενέργειας: ζύμωση και αεριοποίηση. Η παραγωγή βιομεθανίου είναι ευεργετική καθώς το CO<sub>2</sub> έχει ήδη διαχωριστεί στη διαδικασία και από άλλους λόγους που είναι παρόμοιοι με το SNG. Μια καταβόθρα CO<sub>2</sub> μπορεί να δημιουργηθεί στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας με SNG σε συνδυασμό με την μονάδα δέσμευσής του. <sup>[43]</sup>

#### Ενσωμάτωση σε μονάδες παραγωγής βιοαερίου

Η έννοια του SNG μπορεί να ενσωματωθεί σε μονάδες παραγωγής βιοαερίου με χρήση CO<sub>2</sub> από τη διαδικασία αναβάθμισης βιοαερίου. Η σημερινή τεχνολογία διαχωρίζει CO<sub>2</sub>, αλλά απελευθερώνεται στην ατμόσφαιρα και δεν αποθηκεύεται μόνιμα. Το αποκομμένο CO<sub>2</sub> μπορεί να μετατραπεί σε μεθάνιο. Εάν το υδρογόνο είναι ελάχιστο, μόνον μέρη του διαχωρισμένου CO<sub>2</sub> χρησιμοποιούνται. Μια άλλη επιλογή είναι η άμεση τροφοδοσία βιοαερίου (CH<sub>4</sub> + CO<sub>2</sub>) στη μονάδα μεθανοποίησης SNG για την παραγωγή μεθανίου. Η δεξαμενή CO<sub>2</sub> μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε αυτή την περίπτωση ως δεξαμενή αποθήκευσης βιοαερίου. Αυτό εξοικονομεί το κόστος για μια μονάδα αναβαθμισμένου βιοαερίου. <sup>[43]</sup>

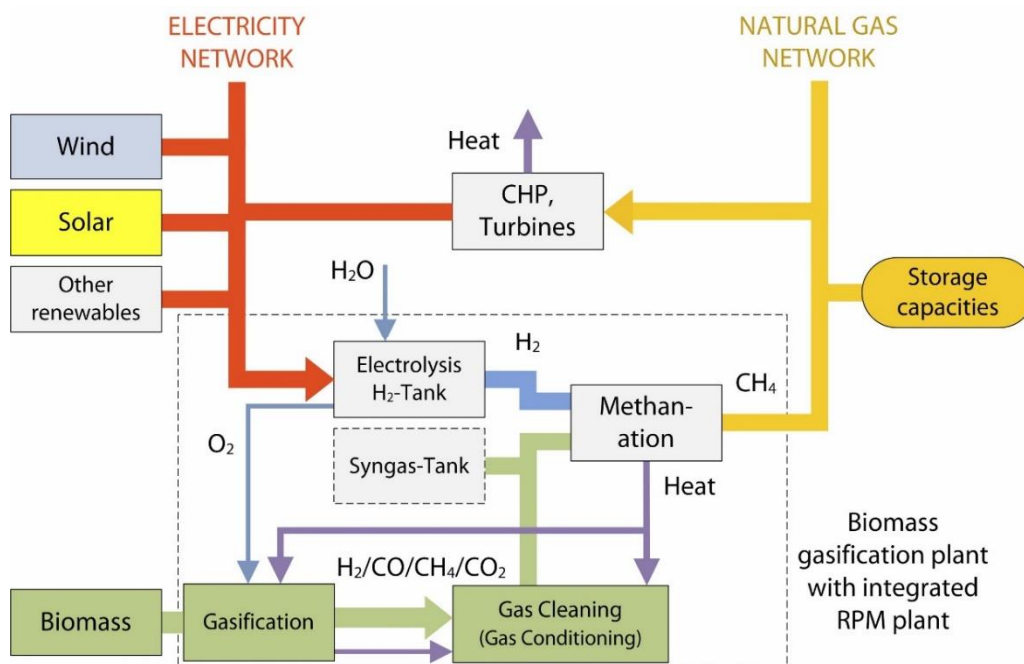
Σε αμφότερες τις περιπτώσεις, η διαρροή μεθανίου μπορεί να ελαχιστοποιηθεί, η απόδοση σε μεθάνιο σχεδόν διπλασιάζεται και η απορριπτόμενη θερμότητα χρησιμοποιείται εντός της μονάδας βιοαερίου στη μονάδα αναβάθμισης ή στην ίδια τη συσκευή ζύμωσης. Προαιρετικά, το πλεονάζον οξυγόνο μπορεί να χρησιμοποιηθεί στη διαδικασία της ζύμωσης. <sup>[43]</sup>



Σχήμα 5-33: Εγκατάσταση παραγωγής SNG από την δέσμευση CO<sub>2</sub> μονάδας εξαγωγής βιοαερίου [43]

#### Ενσωμάτωση σε μονάδες αεριοποίησης βιομάζας

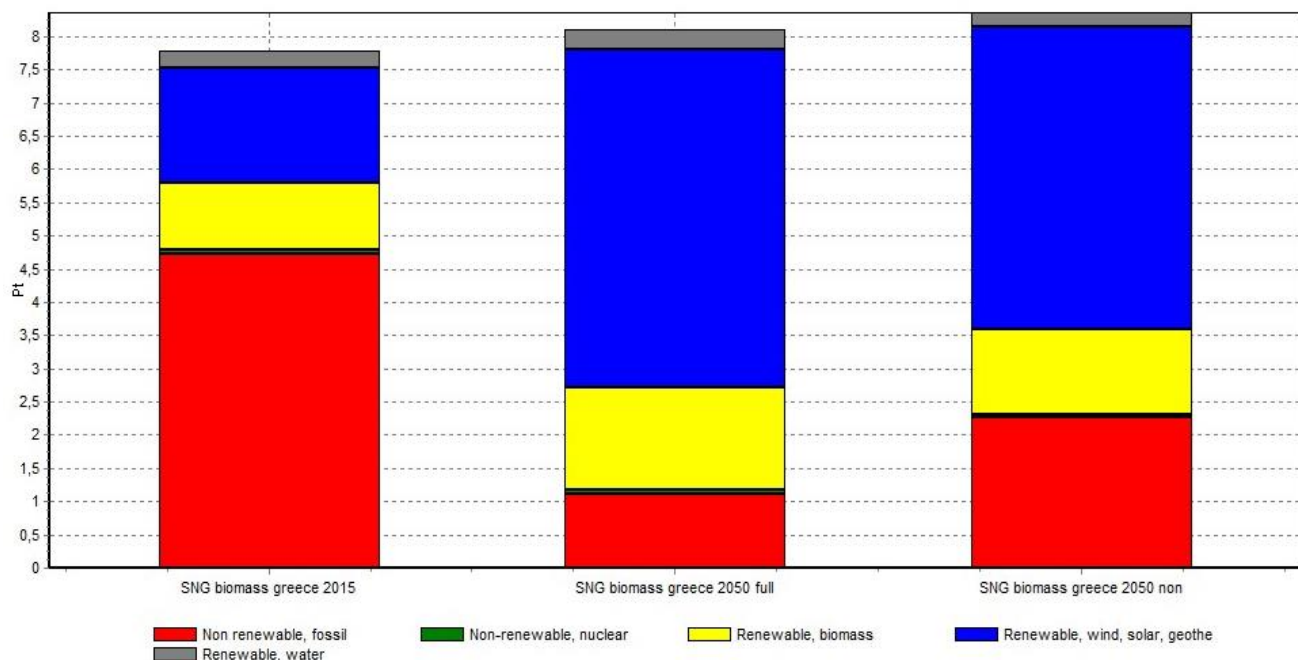
Στερεά πρώτη ύλη βιομάζας μπορεί να μετατραπεί σε βιομεθάνιο μέσω αεριοποίησης και μεθανοποίησης με τέτοια μονάδα παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα. [43]



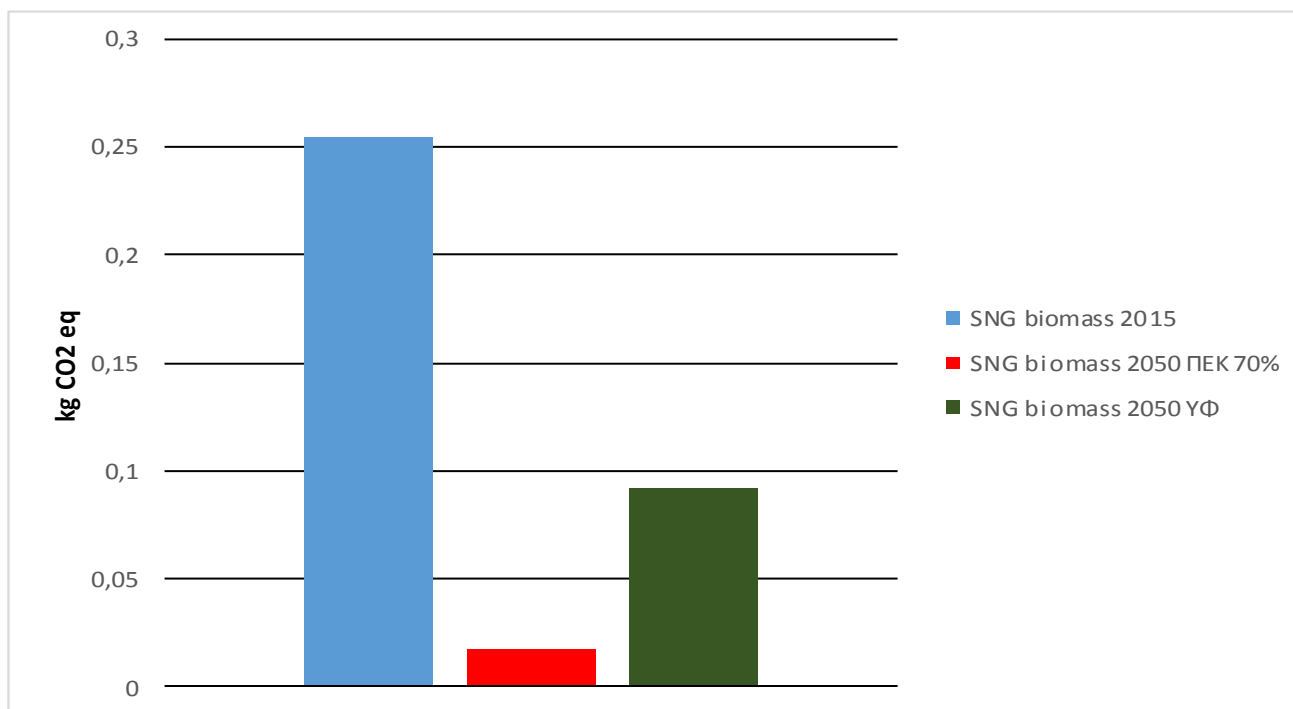
Σχήμα 5-34: Εγκατάσταση παραγωγής SNG από την δέσμευση CO<sub>2</sub> μονάδας αεριοποίησης βιομάζας [43]

#### 5.4.3.1 Ενεργειακές απαιτήσεις και εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου για την παραγωγή SNG από μονάδα βιομάζας

Για την χημική αντίδραση της μεθανοποίησης βρήκαμε ότι απαιτούνται 4 kg ιονισμένου νερού και 14,35 kWh από άποψη ενέργειας για την διαδικασία της ηλεκτρόλυσης επιπρόσθετα απαιτούνται 2 kg συμπιεσμένου CO<sub>2</sub> για την παραγωγή 1 m<sup>3</sup> SNG ή κάνοντας χρήση της ανωτέρου θερμογόνου δύναμης του φυσικού αερίου, 39 MJ παραγόμενου SNG.<sup>[41]</sup> Παρακάτω εμφανίζονται οι ενεργειακές απαιτήσεις και οι εκπομπές αέριων ρύπων για την παραγωγή ενός MJ υποκατάστατου φυσικού αερίου από μονάδες βιομάζας σε κάθε σενάριο.



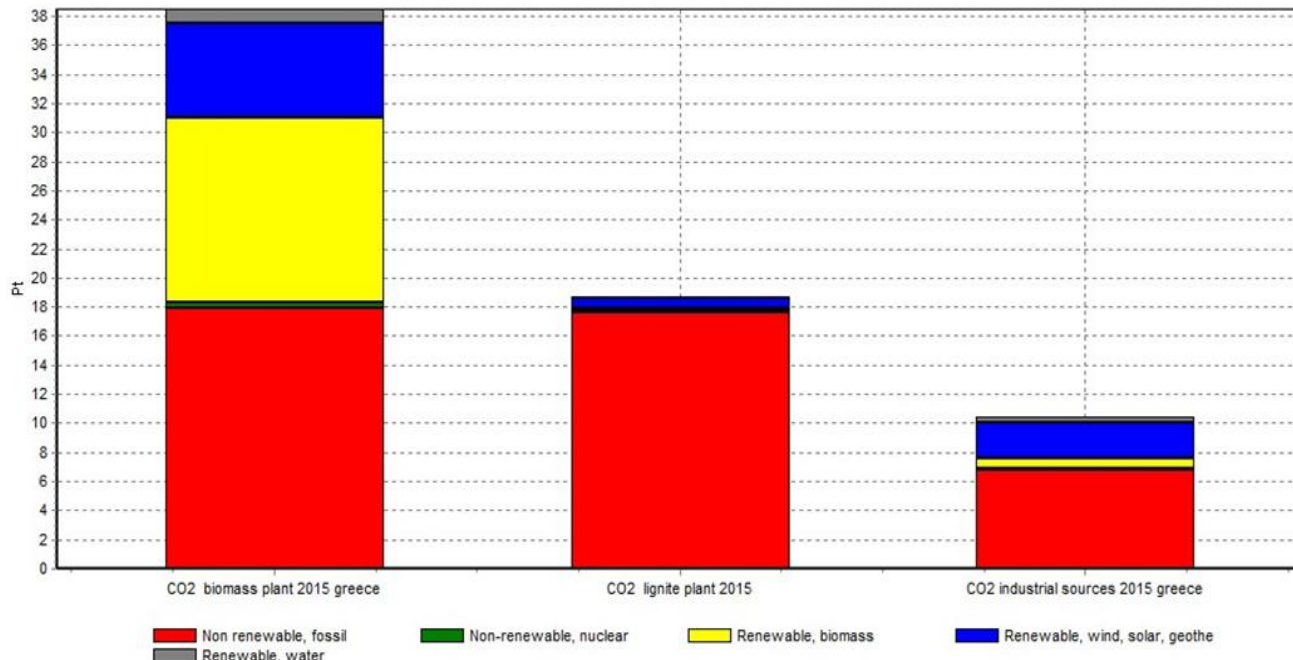
Σχήμα 5-35: Ενεργειακές απαιτήσεις για την παραγωγή SNG από μονάδα βιομάζας κάθε σενάριο<sup>[49]</sup>



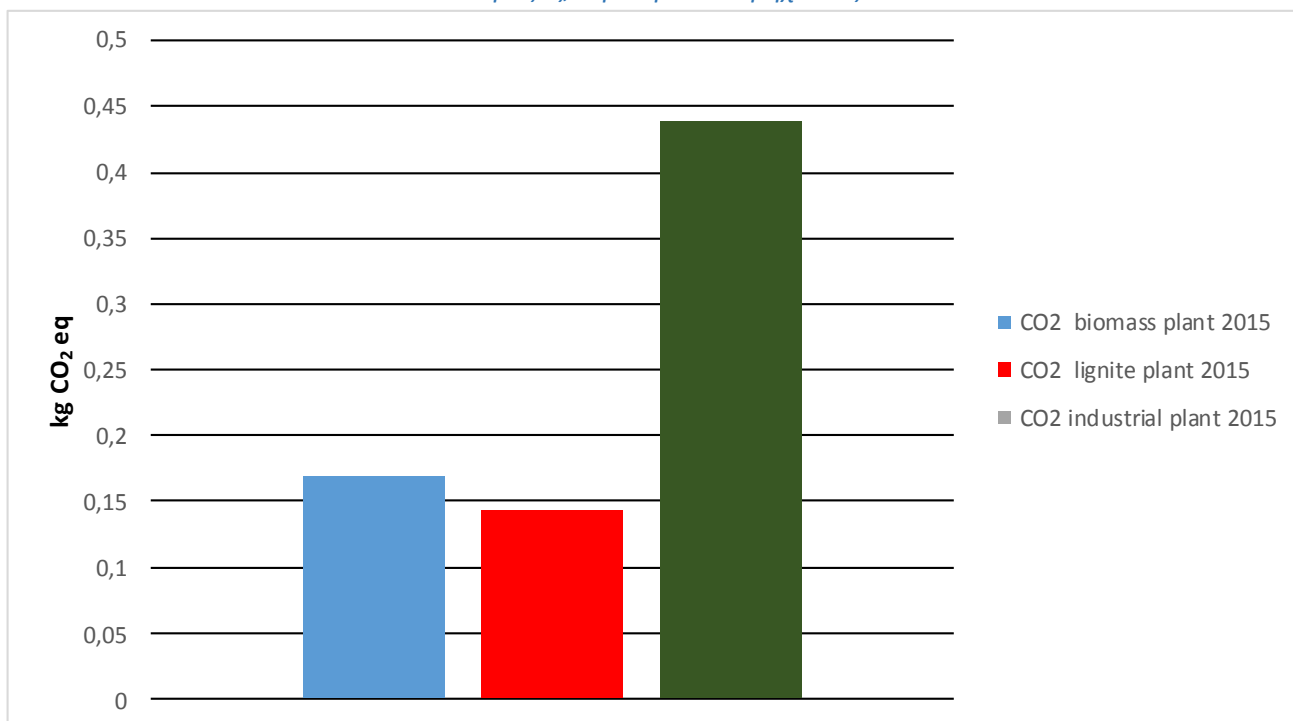
Σχήμα 5-36: Εκπομπές αέριων του θερμοκηπίου για την παραγωγή SNG από μονάδα βιομάζας κάθε σενάριο<sup>[49]</sup>

## 5.5 Σύγκριση των εξεταζόμενων εφαρμογών

### 5.5.1 Σύγκριση αποτελεσμάτων για τον διαχωρισμό και την συμπίεση CO<sub>2</sub>



Σχήμα 5-37: Ενεργειακές απαιτήσεις για τον διαχωρισμό και την συμπίεση CO<sub>2</sub> το έτος 2015 από μονάδα βιομάζας, λιγνίτη και βιομηχανίας <sup>[49]</sup>

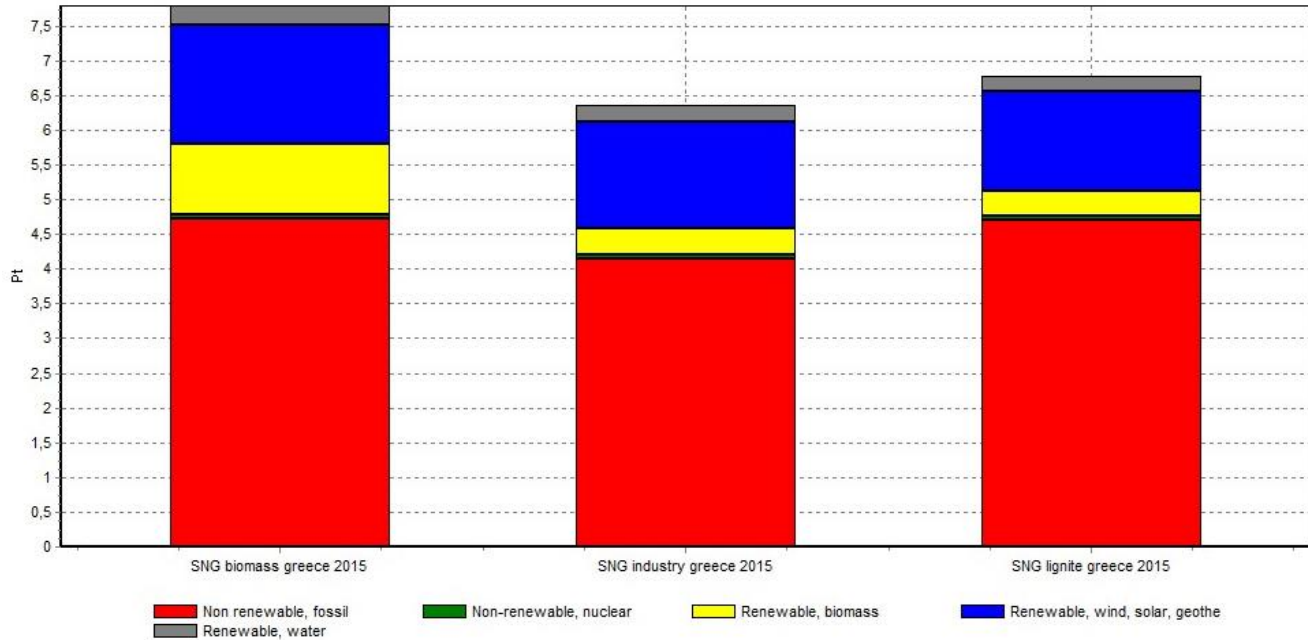


Σχήμα 5-38: Εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου για τον διαχωρισμό και την συμπίεση CO<sub>2</sub> το έτος 2015 από μονάδα βιομάζας, λιγνίτη και βιομηχανίας <sup>[49]</sup>

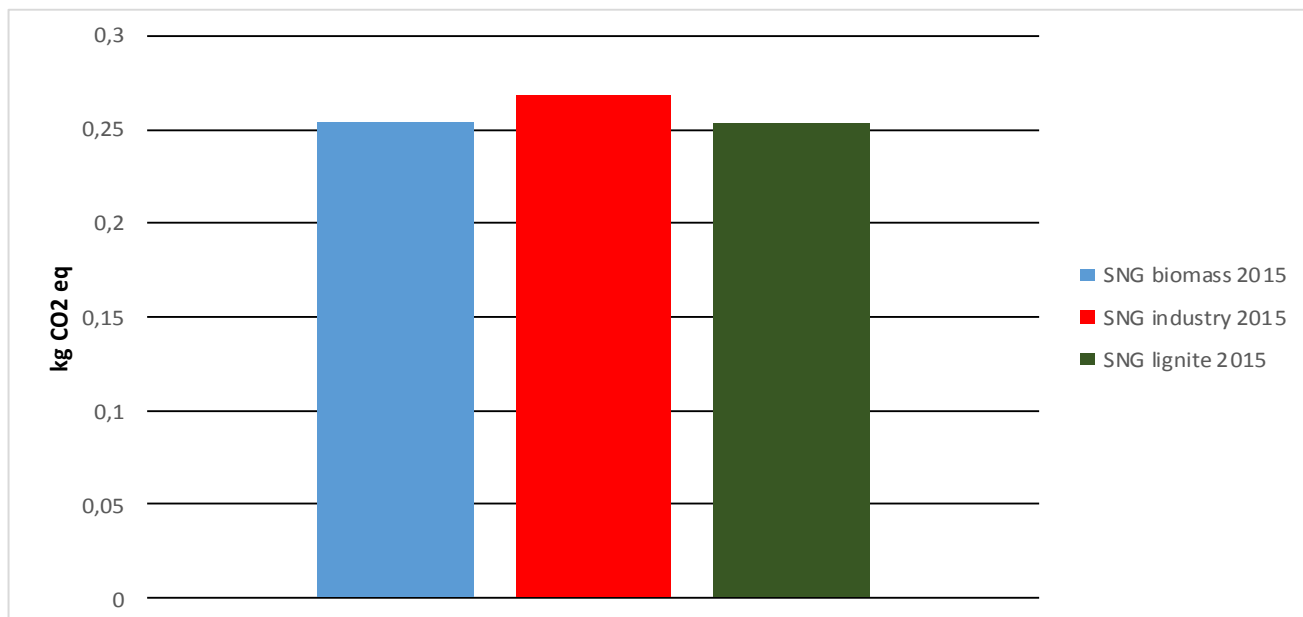
Από την σύγκριση των σχημάτων για τις ενεργειακές απαιτήσεις του διαχωρισμού και της συμπίεσης CO<sub>2</sub> κάθε σεναρίου προκύπτει ότι θα απαιτηθούν μεγαλύτερες καταναλώσεις για την δέσμευσή του από τα καυσαέρια μονάδας βιομάζας καθώς η περιεκτικότητά τους σε CO<sub>2</sub> είναι

φτωχότερη σε σύγκριση με την περιεκτικότητα CO<sub>2</sub> στα καυσαέρια λιγνιτικής μονάδας και ακόμα μικρότερη σε σχέση με την περιεκτικότητά τους σε βιομηχανικές μονάδες. Ενώ από την σύγκριση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου προκύπτει κάτι που αναμέναμε, καθώς παρατηρούνται περισσότερες εκπομπές στην περίπτωση βιομηχανικών μονάδων καθώς τα καυσαέρια τους δεν αποδίδουν αξιοποιήσιμη ηλεκτρική ενέργεια όπως συμβαίνει με τις αντίστοιχες λιγνιτικές μονάδες και μονάδες βιομάζας. Αντίστοιχη κατάσταση επικρατεί και στα σενάρια του 2050 γι' αυτό και δεν παρουσιάζονται.

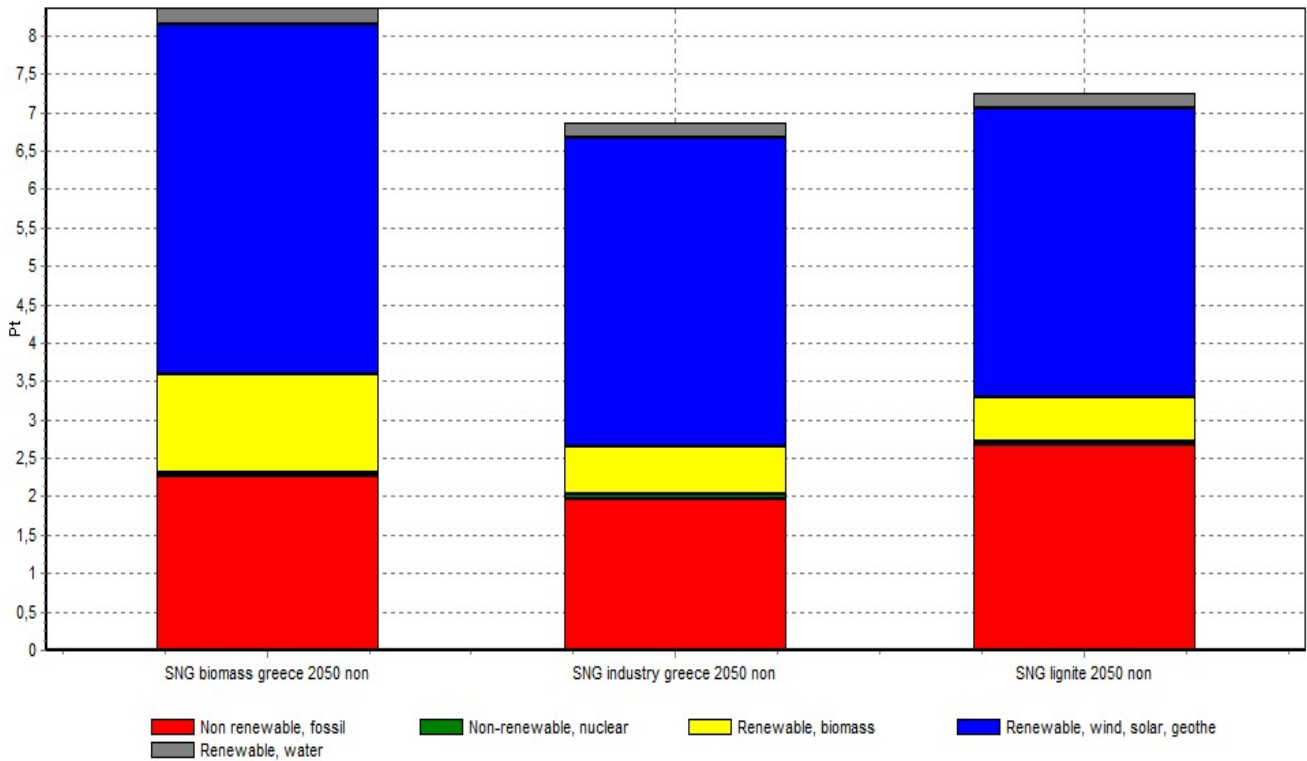
### 5.5.2 Σύγκριση των εξεταζόμενων εφαρμογών για την παραγωγή SNG



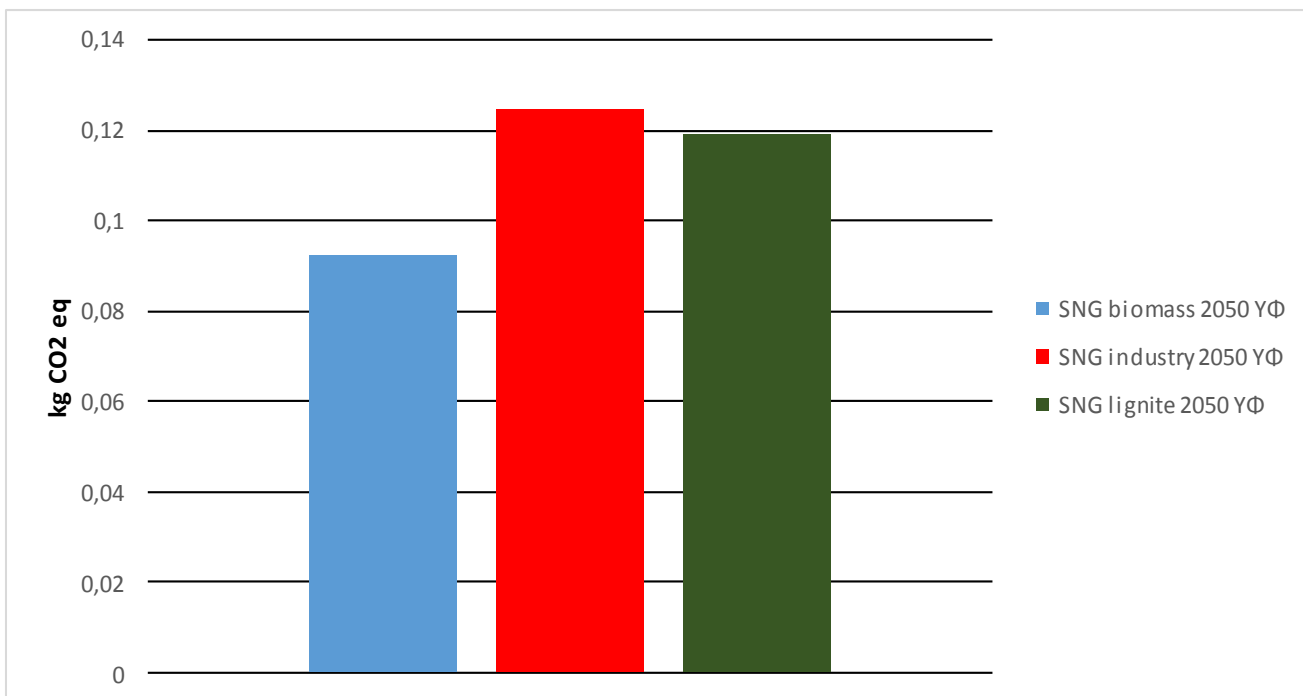
Σχήμα 5-39: Σύγκριση των ενεργειακών απαιτήσεων για την παραγωγή SNG κάθε εφαρμογής το έτος 2015, με την ισχύουσα πολιτική έχουμε 1,29 MJ-ε<sub>q</sub>/MJ μεταφερόμενου Φ.Α. <sup>[49]</sup>



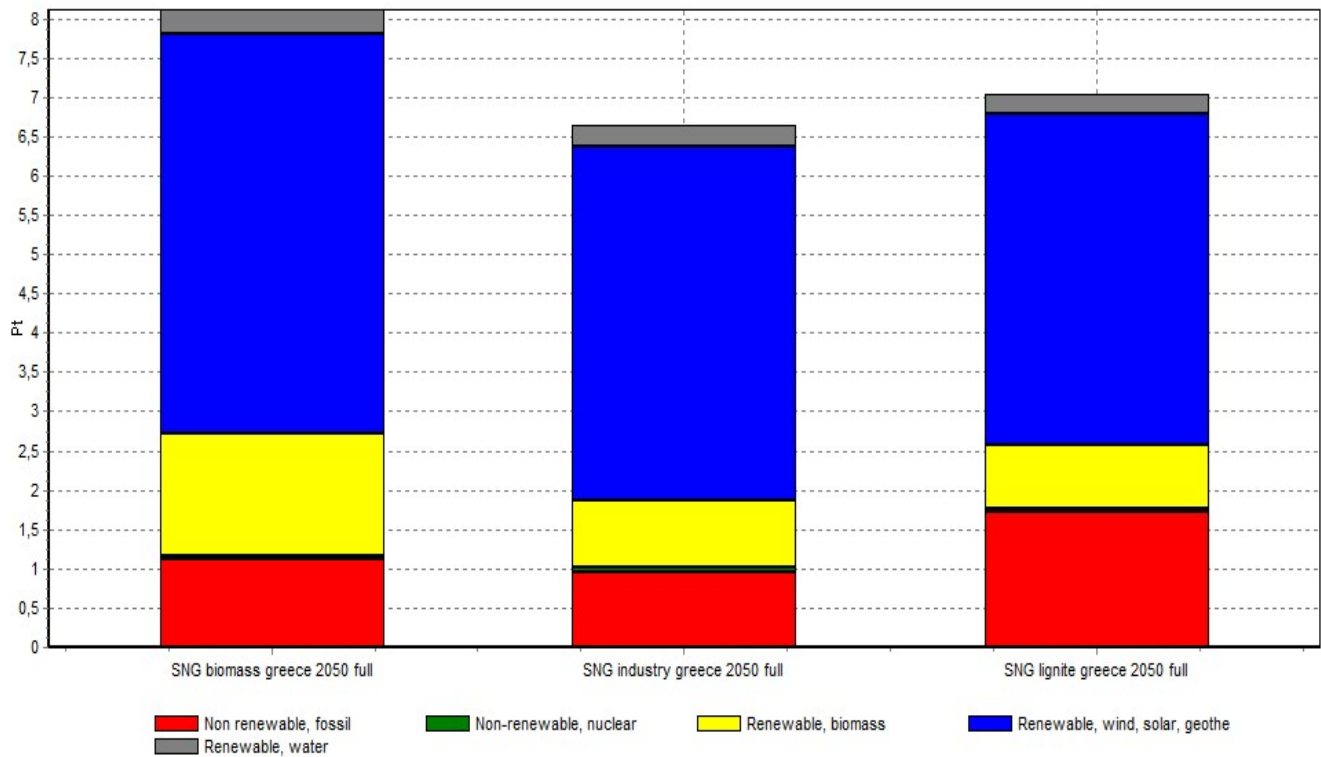
Σχήμα 5-40: Σύγκριση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου για την παραγωγή SNG κάθε εφαρμογής το έτος 2015, με την ισχύουσα πολιτική έχουμε 0,0224 kg CO<sub>2</sub>-ε<sub>q</sub>/MJ μεταφερόμενου Φ.Α. <sup>[49]</sup>



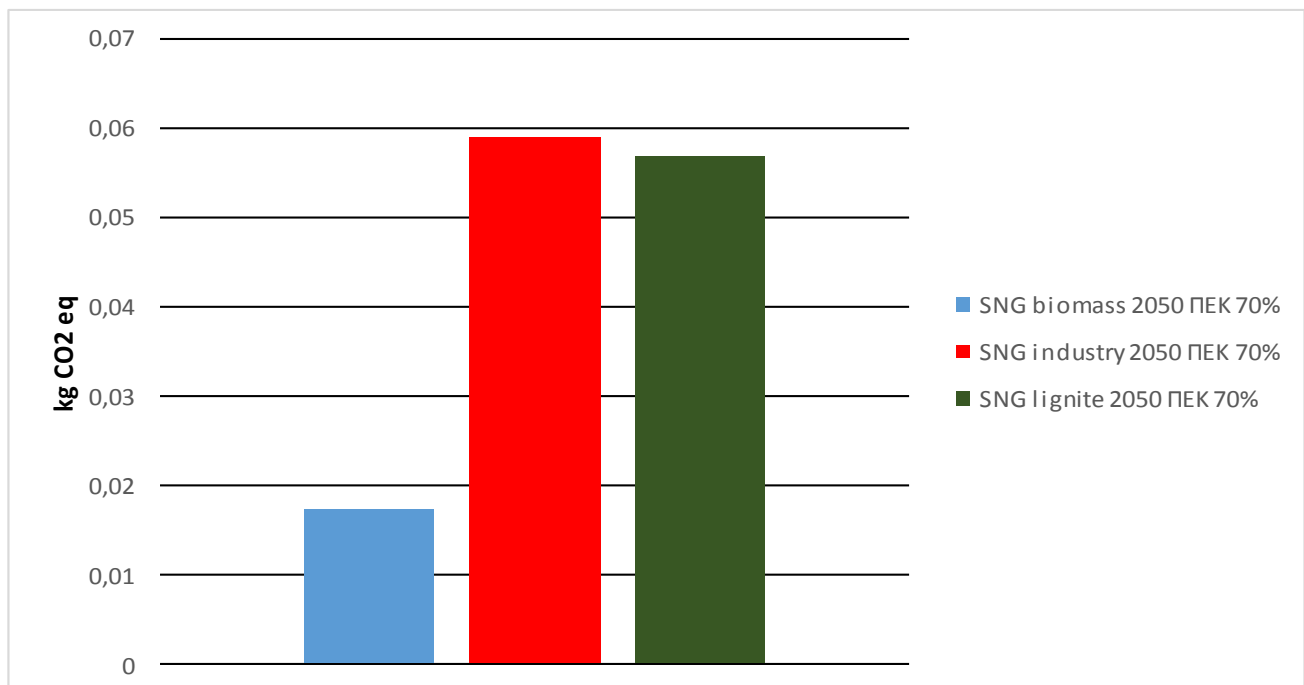
Σχήμα 5-41: Σύγκριση των ενεργειακών απαιτήσεων για την παραγωγή SNG κάθε εφαρμογής το έτος 2050 σεναρίου ΥΦ, με την ισχύουσα πολιτική έχουμε 1,29 MJ-ε<sub>q</sub>/MJ μεταφερόμενου Φ.Α. <sup>[49]</sup>



Σχήμα 5-42: Σύγκριση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου για την παραγωγή SNG κάθε εφαρμογής το έτος 2050 σεναρίου ΥΦ, με την ισχύουσα πολιτική έχουμε 0,0224 kg CO<sub>2</sub>-ε<sub>q</sub>/MJ μεταφερόμενου Φ.Α. <sup>[49]</sup>



Σχήμα 5-43: Σύγκριση των ενεργειακών απαιτήσεων για την παραγωγή SNG κάθε εφαρμογής το έτος 2050 σεναρίου ΠΕΚ 70%, με την ισχύουσα πολιτική έχουμε 1,29 MJ-ε<sub>q</sub>/MJ μεταφερόμενου Φ.Α. <sup>[49]</sup>



Σχήμα 5-44: Σύγκριση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου για την παραγωγή SNG κάθε εφαρμογής το έτος 2050 σεναρίου ΠΕΚ 70%, με την ισχύουσα πολιτική έχουμε 0,0224 kg CO<sub>2</sub>-ε<sub>q</sub>/MJ μεταφερόμενου Φ.Α. <sup>[49]</sup>

## Κεφάλαιο 6: Συμπεράσματα

### Έτος 2015:

Από την Ανάλυση Κύκλου Ζωής για την παραγωγή υποκατάστατου φυσικού αερίου για το έτος 2015 από τις τρεις διαφορετικές μονάδες μελετώντας τις ενεργειακές απαιτήσεις τους στο Σχήμα 5-39 καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι και στις τρεις περιπτώσεις οι απαιτήσεις σε ενέργεια προερχόμενες από ορυκτό καύσιμο, ηλιακή και αιολική ενέργεια και γεωθερμία είναι ποσοτικά ίσες. Η διαφορά έγκειται στην ενέργεια από την μονάδα βιομάζας στην οποία απαιτείται περισσότερη ανανεώσιμη βιομάζα προς καύση για την παραγωγή ενός (1) MJ SNG σε σχέση με το μίγμα ενέργειας που απαιτείται για την παραγωγή ενός (1) MJ SNG από τις άλλες μονάδες .

Από το Σχήμα 5-40 παρατηρείται ότι οι εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου από τις τρεις μονάδες είναι ποσοτικά ίσες. Το περιβαλλοντικό αποτύπωμα για την παραγωγή SNG από αυτές τις τρεις μονάδες το 2015 θα είναι ποιοτικά ίδιο λόγω ενεργειακού μίγματος.

### Έτος 2050 σενάριο ΥΦ:

Όμοια για το έτος 2050 σεναρίου ΥΦ διαπιστώνουμε από το Σχήμα 5-41 ότι οι ενεργειακές απαιτήσεις αυξάνονται συγκριτικά με το 2015 κατά περίπου μια μονάδα για την παραγωγή ενός (1) MJ SNG όμως λόγω της αλλαγής του ενεργειακού μίγματος μειώνονται οι απαιτήσεις από ορυκτά καύσιμα και αυξάνονται εκείνες των ΑΠΕ. Για την παραγωγή SNG από μονάδα βιομάζας και σε αυτή την περίπτωση είναι περισσότερη η απαιτούμενη ενέργεια από την καύση βιομάζας.

Από το Σχήμα 5-42 των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου όπως είναι λογικό η παραγωγή ενός (1) MJ SNG από μονάδα βιομάζας είναι φιλικότερη προς το περιβάλλον λόγω του ότι καίμε ανανεώσιμο καύσιμο στην εφαρμογή μας δίνοντας έτσι χαμηλότερες εκπομπές αερίων ρύπων.

### Έτος 2050 σενάριο ΠΕΚ 70%:

Τώρα για το έτος 2050 σεναρίου ΠΕΚ 70% και σύμφωνα με το Σχήμα 5-43 η βασική διαφορά είναι στο ενεργειακό μίγμα καθώς έχει μειωθεί κατά πολύ η ηλεκτροπαραγωγή από ορυκτά καύσιμα και ταυτόχρονα έχει εμπλουτιστεί το μίγμα με ανανεώσιμες πηγές ενέργειας.

Αντίστοιχα για τις εκπομπές των αερίων του θερμοκηπίου από το Σχήμα 5-44 το συμπέρασμα είναι ίδιο με το σχήμα των ενεργειακών απαιτήσεων.

Το τελικό μας συμπέρασμα βάσει των σεναρίων που έχουμε κάνει για το ενεργειακό μίγμα είναι ότι η παραγωγή υποκατάστατου φυσικού αερίου είναι περιβαλλοντικά φιλικότερη με το σενάριο ηλεκτροπαραγωγής ΠΕΚ 70%. Αυτό οφείλεται στο γεγονός οι εκπομπές αέριων ρύπων υποδιπλασιάζονται σε σύγκριση με τις τωρινές συνθήκες. Τέλος είναι προτιμότερο να παράγουμε SNG από μονάδα βιομάζας λόγω καύσης ανανεώσιμου υλικού που είναι φιλικότερο στο περιβάλλον σε σχέση με τις λιγνιτικές και βιομηχανικές μονάδες.-Επιπλέον η παραγωγή ενός (1) MJ SNG από μονάδα βιομάζας το έτος 2050 σεναρίου ΠΕΚ 70% είναι φιλικότερη προς το περιβάλλον ακόμη και από την συμβατική μεταφορά Φυσικού Αερίου από την Ρωσία με αγωγούς υψηλής πίεσης και αυτό διακρίνεται και από τους εξαγόμενους πίνακες με τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου στο παράρτημα, καθώς κατά την μεταφορά ενός (1) MJ Φ.Α. εκπέμπονται **0,0224 kg CO<sub>2</sub> eq** ενώ για την παραγωγή ενός (1) MJ SNG από μονάδα βιομάζας εκπέμπονται μόλις **0,0173 kg CO<sub>2</sub> eq**.



## Βιβλιογραφία

1. [dspace.lib.uom.gr/bitstream/2159/15651/6/GrompanopoulosStratisMsc2013.pdf](https://dspace.lib.uom.gr/bitstream/2159/15651/6/GrompanopoulosStratisMsc2013.pdf)
2. [www.education.nationalgeographic.com/encyclopedia/natural\\_gas](http://www.education.nationalgeographic.com/encyclopedia/natural_gas)
3. [www.naturalgas.org](http://www.naturalgas.org)
4. [www2.epa.gov/hydraulicfracturing/process-hydraulic-fracturing](http://www2.epa.gov/hydraulicfracturing/process-hydraulic-fracturing)
5. [www.netl.doe.gov/research/oil\\_and\\_gas](http://www.netl.doe.gov/research/oil_and_gas)
6. [www.greenplug.nu/hydraulic-fracturing-what-is-hydraulic-fracturing/](http://www.greenplug.nu/hydraulic-fracturing-what-is-hydraulic-fracturing/)
7. [www.shetlandtimes.co.uk/2010/09/21/environmentalists-target-drilling-ship-in-protest-at-west-of-shetland-work](http://www.shetlandtimes.co.uk/2010/09/21/environmentalists-target-drilling-ship-in-protest-at-west-of-shetland-work)
8. [www.volcanic-heater.com/natural-gas-processing-market.php](http://www.volcanic-heater.com/natural-gas-processing-market.php)
9. <http://www.mappery.com/map-of/Europe-Proposed-Natural-Gas-Pipelines-Map>
10. [www.endlessmtnlifestyles.com/?p=1134](http://www.endlessmtnlifestyles.com/?p=1134)
11. [www.electrical-engineering-portal.com/detecting-cyber-intrusion-in-scada-system](http://www.electrical-engineering-portal.com/detecting-cyber-intrusion-in-scada-system)
12. [www.eia.gov/pub/oil\\_gas/natural\\_gas/analysis\\_publications/ngpipeline/undrgrnd\\_storage.html](http://www.eia.gov/pub/oil_gas/natural_gas/analysis_publications/ngpipeline/undrgrnd_storage.html)
13. [www.theglobeandmail.com/report-on-business/breakthrough/how-the-liquefied-natural-gas-works/article13261693/](http://www.theglobeandmail.com/report-on-business/breakthrough/how-the-liquefied-natural-gas-works/article13261693/)
14. [www.laohamutuk.org/Oil/LNG/chap3.htm](http://www.laohamutuk.org/Oil/LNG/chap3.htm)
15. [www.lusas.com/case/civil/lng\\_tank\\_design.html](http://www.lusas.com/case/civil/lng_tank_design.html)
16. <http://snmevents.com/zhoushan-changhong-buys-6-semi-submersible-rigs-from-transocean/>
17. Tanja Schaaf\* , Jochen Grünig, Markus Roman Schuster, Tobias Rothenfluh and Andreas Orth: Methanation of CO<sub>2</sub> - storage of renewable energy in a gas distribution system (Energy, Sustainability and Society), <http://www.energysustainsoc.com/content/pdf/s13705-014-0029-1.pdf>
18. Emmanuel Zoulias, Elli Varkaraki, Nicolaos Lymberopoulos, Christodoulos N. Christodoulou and George N. Karagiorgis: “A review on water electrolysis” <http://www.cres.gr/kape/publications/papers/dimosieyseis/ydrogen/A%20REVIEW%20ON%20WATER%20ELECTROLYSIS.pdf>
19. Tom Smolinka: “Overview on water electrolysis for hydrogen production and storage” (2012), Production and Storage Symposium - Water electrolysis and hydrogen as part of the future Renewable Energy System, Copenhagen/Denmark.

- [http://www.hydrogennet.dk/fileadmin/user\\_upload/PDF-filer/Aktiviteter/Kommende\\_aktiviteter/Elektrolysesymposium/Tom\\_Smolinka.pdf](http://www.hydrogennet.dk/fileadmin/user_upload/PDF-filer/Aktiviteter/Kommende_aktiviteter/Elektrolysesymposium/Tom_Smolinka.pdf)
20. Diogo M. F. Santos, César A. C. Sequeira, José L. Figueiredo: "Hydrogen production by alkaline water electrolysis", Quím. [http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0100-40422013000800017](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-40422013000800017)
  21. <http://www.elygrid.com/alkaline-electrolysis/>
  22. M. A. Laguna-Bercer:, "Recent advances in high temperature electrolysis using Solid Oxide Fuel Cells: A review " <http://solidcell.com/techElectrolyzer.htm>
  23. Svein Sunde: "Electrolysis for hydrogen production" (2006), Haldor Topsøe Catalysis Forum, Hornbæk, Denmark, August 24 – 25, 2006  
[http://www.topsoe.com/sites/default/files/sunde\\_0.pdf](http://www.topsoe.com/sites/default/files/sunde_0.pdf)
  24. K. E. Ayers, E. B. Anderson, C. B. Capuano, B. D. Carter, L. T. Dalton, G. Hanlon, J. Manco, and M. Niedzwiecki: "Research Advances Towards Low Cost, High Efficiency PEM Electrolysis" (2010), Proton Energy Systems, <http://ecst.ecsdl.org/content/33/1/3.full.pdf>
  25. <https://sites.google.com/site/svsscience2014/chemistry/c2/salts-and-electrolysis>
  26. <http://protononsite.com/products/hydrogen-generator>
  27. [http://www.terrancell.com/tech\\_pemelectro.html](http://www.terrancell.com/tech_pemelectro.html)
  28. <http://www.hi2h2.com/theory.htm>
  29. [http://www.promitheas.org.gr/default.asp?pid=415&langid=18&\)](http://www.promitheas.org.gr/default.asp?pid=415&langid=18&)
  30. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3947793/>
  31. Καρβούνης Σ. και Γεωργακέλος Δ. Διαχείριση Περιβάλλοντος- Επιχειρήσεις και Βιώσιμη Ανάπτυξη. Εκδόσεις Σταμούλης Αθήνα 2003
  32. Λάζογλου Κ. Συγκριτική ανάλυση τριών εναλλακτικών σεναρίων διαχείρισης των αστικών στερεών απορριμμάτων του νομού Ξάνθης βάσει ανάλυσης κύκλου ζωής. Μεταπτυχιακή Διατριβή - Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο. Διεπιστημονικό - Διατμηματικό Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών "Περιβάλλον και Ανάπτυξη". Αθήνα, 2009,  
[http://dspace.lib.ntua.gr/bitstream/handle/123456789/2934/lazoglouk\\_wastemanagement.pdf?sequence=\)](http://dspace.lib.ntua.gr/bitstream/handle/123456789/2934/lazoglouk_wastemanagement.pdf?sequence=1)
  33. <http://www.start2see.com.au/site/index.php/life-cycle-services/life-cycle-assessments>
  34. Curran M.A. Environmental Life-Cycle Assessment. McGraw-Hill (1996)
  35. SETAC – Society of Environmental Toxicology and Chemistry, Guidelines for Life Cycle

- Assessment: A “Code of Practice”, SETAC (1993)
36. WEC (World Energy Council). Comparison of energy systems using life cycle assessment. WEC (2004), <http://www.worldenergy.org/documents/lca2.pdf>
  37. EPA. U.S. Environmental Protection Agency and Science Applications International Corporation. LCAccess – LCA 101, (2001)
  38. ISO 14040. Environmental management - Life cycle assessment - Principles and framework, (2006)
  39. Γιαννόπουλος, Δημήτριος Χ.; Giannopoulos, Dimitrios Ch, ‘Ανάπτυξη Μεθοδολογίας Πολυκριτηριακής Αξιολόγησης Καινοτόμων Ενεργειακών Τεχνολογιών σε Περιβάλλον Αβεβαιότητας’, Phd-Dimitrios\_Giannopoulos.pdf
  40. [http://www.solidworks.com/sustainability/design/2722\\_ENU\\_HTML.htm](http://www.solidworks.com/sustainability/design/2722_ENU_HTML.htm)
  41. Myriam De Saint Jean, Pierre Baurens, Chakib Bouallou “International Journal of Hydrogen Energy, [www.elsevier.com/locate/he](http://www.elsevier.com/locate/he)
  42. Life Cycle Assessment of Biogas Production from Different Substrates, <http://www.esu-services.ch/fileadmin/download/publicLCI/stucki-2011-biogas-substrates.pdf>
  43. Sterner\_bioenergy and rm from renewable (thesis).pdf
  44. DOW\_HELMETH\_(621210)\_2014-02-07[1] (ID 199125)-NTUA\_highlights.pdf
  45. EnPlan-RoadMap 2050\_dtld-Apr-12.pdf
  46. [http://www.peacesoftware.de/einigewerte/calc\\_co2.php5](http://www.peacesoftware.de/einigewerte/calc_co2.php5)
  47. vazakasn\_hydrogen.pdf
  48. CARBON CAPTURE AND STORAGE (Intergovernmental Panel on Climate Change) [https://www.ipcc.ch/pdf/special-reports/srccs/srccs\\_wholereport.pdf](https://www.ipcc.ch/pdf/special-reports/srccs/srccs_wholereport.pdf)
  49. Simapro 7,0
  50. [https://en.wikipedia.org/wiki/NEL\\_pipeline](https://en.wikipedia.org/wiki/NEL_pipeline)

## Παράρτημα

Εδώ παρουσιάζονται οι πίνακες που προέκυψαν από την μελέτη των παραπάνω εφαρμογών στο λογισμικό Simapro 7,0 και βάσει των οποίων έγιναν τα διαγράμματα της διπλωματικής εργασίας. Κυρίως είναι οι πίνακες που αντιστοιχούν στις εκπομπές αέριων ρύπων καθώς για τις ενεργειακές απαιτήσεις το λογισμικό παρέιχε διαγράμματα τα οποία παρουσίαζαν τις τιμές πάνω στον άξονα.

No	Substance	Compartment	Unit	Natural gas, high pressure GR U
	<b>Total of all compartments</b>		<b>kg CO2 eq</b>	<b>0,0224</b>
	Remaining substances		kg CO2 eq	0,0000258
1	Carbon dioxide, fossil	Air	kg CO2 eq	0,0132
2	Methane, fossil	Air	kg CO2 eq	0,00912
3	Dinitrogen monoxide	Air	kg CO2 eq	0,0000624
4	Carbon monoxide, fossil	Air	kg CO2 eq	0,0000314

Πίνακας 1: Εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου για την μεταφορά φυσικού αερίου με αγωγούς υψηλής πίεσης <sup>[49]</sup>

No	Category	Substance	Unit	Total
	<b>Raw material inputs</b>	<b>Total of all compartments</b>	<b>MJ-Eq</b>	<b>1,290566471</b>
	Raw material inputs	Remaining substances	MJ-Eq	
1	Tree only	Gas, natural, in ground	MJ-Eq	
2	Tree only	Oil, crude, in ground	MJ-Eq	

Πίνακας 2: : Ενεργειακές απαιτήσεις για την μεταφορά φυσικού αερίου με αγωγούς υψηλής πίεσης <sup>[49]</sup>

- Σχεδόν το σύνολο των αερίων του θερμοκηπίου προέρχεται από την χερσαία εξόρυξη φυσικού αερίου και σε ελάχιστο βαθμό από την εξόρυξη πετρελαίου κάτι που διακρίνεται στο Σχήμα 5-04 ωστόσο ο Πίνακας 2 που μας έδωσε το Simapro δείχνει μόνο το σύνολο των ρύπων και για αυτό κάνω την συγκεκριμένη διευκρίνιση.

No	Substance	Compartment	Unit	Electricity, production mix GR/GR U 2015	Electricity, production mix GR/GR U 2050 full-optimist scenario	Electricity, production mix GR/GR U 2050 non-optimist scenario
	<b>Total of all compartments</b>		<b>kg CO2 eq</b>	<b>0,66</b>	<b>0,146</b>	<b>0,309</b>
	Remaining substances		kg CO2 eq	0,004464	0,003071	0,002761
1	Carbon dioxide, fossil	Raw	kg CO2 eq	-0,08676	-0,19404	-0,13788
2	Dinitrogen monoxide	Air	kg CO2 eq	0,08748	0,19512	0,1386
3	Methane, fossil	Air	kg CO2 eq	0,6444	0,13392	0,29772
4	Carbon monoxide, fossil	Air	kg CO2 eq	0,011268	0,007272	0,007956

Πίνακας 3: Εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου για την ηλεκτροπαραγωγή κάθε σεναρίου στην ηπειρωτική Ελλάδα <sup>[49]</sup>

- Η ένδειξη 2050 full-optimist scenario αναφέρεται στο ενεργειακό μίγμα του 2050 σεναρίου ΠΕΚ 70% ενώ η ένδειξη non-optimist scenario αναφέρεται στο ενεργειακό μίγμα του 2050 σεναρίου ΥΦ.

No	Substance	Compartment	Unit	Electricity, production mix GR/GR U 2015	Electricity, production mix GR/GR U 2050 full-optimist scenario	Electricity, production mix GR/GR U 2050 non-optimist scenario
	<b>Total of all compartments</b>		<b>MJ-Eq</b>	<b>2,852934106</b>	<b>0,662</b>	<b>1,36</b>
	Remaining substances		MJ-Eq	0,661940137	0,000366	0,000374
1	Coal, brown, in ground	Raw	MJ-Eq	0	0,0095	0,783
2	Coal, hard, unspecified, in ground	Raw	MJ-Eq	0	0,0178	0,0182
3	Gas, natural, in ground	Raw	MJ-Eq	1,358960935	0,591	0,519
4	Oil, crude, in ground	Raw	MJ-Eq	0	0,0429	0,0385

**Πίνακας 4: Ενεργειακές απαιτήσεις σε μη ανανεώσιμα, ορυκτά καύσιμα (non-renewable, fossil) για την ηλεκτροπαραγωγή κάθε σεναρίου στην ηπειρωτική Ελλάδα** <sup>[49]</sup>

Παρακάτω παρουσιάζονται πίνακες που διαθέτουν χαρακτηριστικά του διοξειδίου του άνθρακα από τους οποίους κυρίως χρησιμοποιήθηκαν τα δεδομένα εκείνα που έχουν να κάνουν με την περιεκτικότητά του στα καυσαέρια από διάφορες μονάδες-πηγές.

Property	Value
Molecular weight	44.01
Critical temperature	31.1 °C
Critical pressure	73.9 bar
Critical density	467 kg m <sup>-3</sup>
Triple point temperature	-56.5 °C
Triple point pressure	5.18 bar
Boiling (sublimation) point (1.013 bar)	-78.5 °C
<b>Gas Phase</b>	
Gas density (1.013 bar at boiling point)	2.814 kg m <sup>-3</sup>
Gas density (@ STP)	1.976 kg m <sup>-3</sup>
Specific volume (@ STP)	0.506 m <sup>3</sup> kg <sup>-1</sup>
C <sub>p</sub> (@ STP)	0.0364 kJ (mol <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> )
C <sub>v</sub> (@ STP)	0.0278 kJ (mol <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> )
C <sub>p</sub> /C <sub>v</sub> (@ STP)	1.308
Viscosity (@ STP)	13.72 μN.s m <sup>-2</sup> (or μPa.s)
Thermal conductivity (@ STP)	14.65 mW (m K <sup>-1</sup> )
Solubility in water (@ STP)	1.716 vol vol <sup>-1</sup>
Enthalpy (@ STP)	21.34 kJ mol <sup>-1</sup>
Entropy (@ STP)	117.2 J mol K <sup>-1</sup>
Entropy of formation	213.8 J mol K <sup>-1</sup>
<b>Liquid Phase</b>	
Vapour pressure (at 20 °C)	58.5 bar
Liquid density (at -20 °C and 19.7 bar)	1032 kg m <sup>-3</sup>
Viscosity (@ STP)	99 μN.s m <sup>-2</sup> (or μPa.s)
<b>Solid Phase</b>	
Density of carbon dioxide snow at freezing point	1562 kg m <sup>-3</sup>
Latent heat of vaporisation (1.013 bar at sublimation point)	571.1 kJ kg <sup>-1</sup>

**Πίνακας 5: Φυσικές ιδιότητες του διοξειδίου του άνθρακα** <sup>[42]</sup>

Process	CO <sub>2</sub> concentration in gas stream % by vol.	Number of sources	Emissions (mtCO <sub>2</sub> )	% of total CO <sub>2</sub> emissions	Cumulative total CO <sub>2</sub> emissions (%)	Average emissions/source (mtCO <sub>2</sub> per source)
<b>CO<sub>2</sub> from fossil fuels or minerals</b>						
<b>Power</b>						
Coal	12 to 15	2,025	7,984	59.69	59.69	3.94
Natural gas	3	985	759	5.68	65.37	0.77
Natural gas	7 to 10	743	752	5.62	70.99	1.01
Fuel oil	8	515	654	4.89	75.88	1.27
Fuel oil	3	593	326	2.43	78.31	0.55
Other fuels*	NA	79	61	0.45	78.77	0.77
Hydrogen	NA	2	3	0.02	78.79	1.27
<b>Natural-gas sweetening</b>						
	NA <sup>b</sup>	NA	50 <sup>c</sup>	0.37	79.16	
<b>Cement production</b>						
Combined	20	1175	932	6.97	86.13	0.79
<b>Refineries</b>						
	3 to 13	638	798	5.97	92.09	1.25
<b>Iron and steel industry</b>						
Integrated steel mills	15	180	630 <sup>d</sup>	4.71	96.81	3.50
Other processes <sup>d</sup>	NA	89	16	0.12	96.92	0.17
<b>Petrochemical industry</b>						
Ethylene	12	240	258	1.93	98.85	1.08
Ammonia: process	100	194	113	0.84	99.70	0.58
Ammonia: fuel combustion	8	19	5	0.04	99.73	0.26
Ethylene oxide	100	17	3	0.02	99.75	0.15
<b>Other sources</b>						
Non-specified	NA	90	33	0.25	100.00	0.37
		<b>7,584</b>	<b>13,375</b>	<b>100</b>		<b>1.76</b>
<b>CO<sub>2</sub> from biomass*</b>						
Bioenergy	3 to 8	213	73			0.34
Fermentation	100	90	17.6			<b>0.2</b>

Πίνακας 6: Παραγωγή διοξειδίου του άνθρακα από διάφορες μονάδες-πηγές <sup>[42]</sup>

Όπου το STP αναφέρεται σε σταθερή θερμοκρασία και πίεση 0 °C και 1.013 bar.

Impact category	Unit	CO <sub>2</sub> compression 2015	CO <sub>2</sub> separation industrial sources 2015
Non renewable, fossil	MJ-Eq	0,308	6,5
Non-renewable, nuclear	MJ-Eq	0,00366	0,0802
Renewable, biomass	MJ-Eq	0,0289	0,609
Renewable, wind, solar, geothe	MJ-Eq	0,113	2,39
Renewable, water	MJ-Eq	0,0177	0,375

Πίνακας 7: Ενεργειακές απαιτήσεις για τον διαχωρισμό και την συμπίεση βιομηχανικού CO<sub>2</sub> το έτος αναφοράς 2015 [49]

- Για τις εκπομπές αέριων ρύπων δεν αναφέρεται ο αντίστοιχος πίνακας καθώς οι τιμές που δίνει η συμπίεση διοξειδίου του άνθρακα είναι μόλις στο 5% σε σχέση με εκείνες του διαχωρισμού του όπως φαίνεται και στο σχήμα 5-15 που δόθηκε επί τοις εκατό από το Simapro.

Impact category	Unit	CO <sub>2</sub> industrial sources 2015	CO <sub>2</sub> industrial sources 2050 ΠΕΚ 70%	CO <sub>2</sub> industrial sources 2050 ΥΦ
abiotic depletion	kg Sb eq	0,00422	0,000787	0,00195
<b>global warming (GWP100)</b>	<b>kg CO<sub>2</sub> eq</b>	<b>0,439</b>	<b>0,097</b>	<b>0,205</b>
ozone layer depletion (ODP)	kg CFC-11 eq	1,5E-08	1,13E-08	9,97E-09
human toxicity	kg 1,4-DB eq	0,179	0,0538	0,0938
fresh water aquatic ecotox.	kg 1,4-DB eq	0,0997	0,00678	0,0419
marine aquatic ecotoxicity	kg 1,4-DB eq	696	28,1	279
terrestrial ecotoxicity	kg 1,4-DB eq	0,00161	0,000179	0,000416
photochemical oxidation	kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	0,0001	1,22E-05	3,89E-05
acidification	kg SO <sub>2</sub> eq	0,0025	0,000244	0,00095
eutrophication	kg PO <sub>4</sub> --- eq	0,000111	8,46E-05	9,12E-05

Πίνακας 8: Εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου για τον διαχωρισμό και την συμπίεση βιομηχανικού CO<sub>2</sub> σε κάθε σενάριο [49]

Impact category	Unit	CO <sub>2</sub> lignite plant 2015	CO <sub>2</sub> lignite plant 2050 ΠΕΚ 70%	CO <sub>2</sub> lignite plant 2050 ΥΦ
abiotic depletion	kg Sb eq	0,00565	0,00978	0,00838
<b>global warming (GWP100)</b>	<b>kg CO<sub>2</sub> eq</b>	<b>-0,497</b>	<b>-0,0853</b>	<b>-0,216</b>
ozone layer depletion (ODP)	kg CFC-11 eq	-1,7E-08	-1,2E-08	-1,1E-08
human toxicity	kg 1,4-DB eq	0,193	0,344	0,296
fresh water aquatic ecotox.	kg 1,4-DB eq	0,185	0,297	0,255
marine aquatic ecotoxicity	kg 1,4-DB eq	1330	2130	1830
terrestrial ecotoxicity	kg 1,4-DB eq	0,000334	0,00206	0,00177
photochemical oxidation	kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	0,000121	0,000227	0,000195
acidification	kg SO <sub>2</sub> eq	0,00336	0,00607	0,00522
eutrophication	kg PO <sub>4</sub> --- eq	6,93E-05	0,000101	9,27E-05

Πίνακας 9: Εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου για την δέσμευση CO<sub>2</sub> μετά την καύση λιγνίτη σε μονάδα κάθε σεναρίου [49]

Impact category	Unit	CO <sub>2</sub> lignite 2015 sep. and comp.	CO <sub>2</sub> lignite 2050 ΠΕΚ 70% sep. and comp.	CO <sub>2</sub> lignite 2050 ΥΦ sep. and comp.
abiotic depletion	kg Sb eq	0,0118	0,0109	0,0112
<b>global warming (GWP100)</b>	<b>kg CO<sub>2</sub> eq</b>	<b>0,144</b>	<b>0,056</b>	<b>0,0839</b>
ozone layer depletion (ODP)	kg CFC-11 eq	5,16E-09	4,23E-09	3,88E-09
human toxicity	kg 1,4-DB eq	0,454	0,421	0,432
fresh water aquatic ecotox.	kg 1,4-DB eq	0,33	0,307	0,316
marine aquatic ecotoxicity	kg 1,4-DB eq	2340	2170	2230
terrestrial ecotoxicity	kg 1,4-DB eq	0,00269	0,00232	0,00238
photochemical oxidation	kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	0,000267	0,000245	0,000252
acidification	kg SO <sub>2</sub> eq	0,00701	0,00643	0,00661
eutrophication	kg PO <sub>4</sub> --- eq	0,000231	0,000224	0,000226

Πίνακας 10: Εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου για τον διαχωρισμό και την συμπίεση λιγνιτικού CO<sub>2</sub> σε κάθε σενάριο <sup>[49]</sup>

Impact category	Unit	CO <sub>2</sub> biomass 2015	CO <sub>2</sub> biomass 2050 ΠΕΚ 70%	CO <sub>2</sub> biomass 2050 ΥΦ
abiotic depletion	kg Sb eq	-0,00254	-0,000316	-0,00107
<b>global warming (GWP100)</b>	<b>kg CO<sub>2</sub> eq</b>	<b>-1,25</b>	<b>-1,03</b>	<b>-1,1</b>
ozone layer depletion (ODP)	kg CFC-11 eq	-6,4E-09	-4,05E-09	-3,16E-09
human toxicity	kg 1,4-DB eq	-0,0232	0,058	0,0321
fresh water aquatic ecotox.	kg 1,4-DB eq	-0,0575	0,0028	-0,02
marine aquatic ecotoxicity	kg 1,4-DB eq	-439	-6,25	-169
terrestrial ecotoxicity	kg 1,4-DB eq	-0,000611	0,00032	0,000165
photochemical oxidation	kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	-0,0000496	0,00000739	-0,00000989
acidification	kg SO <sub>2</sub> eq	-0,000964	0,0005	0,0000418
eutrophication	kg PO <sub>4</sub> -- eq	0,000206	0,000223	0,000219

Πίνακας 11: Εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου για την δέσμευση CO<sub>2</sub> μετά την καύση βιομάζας σε μονάδα κάθε σεναρίου <sup>[49]</sup>



Impact category	Unit	CO <sub>2</sub> biomass plant 2015	CO <sub>2</sub> biomass plant 2050 ΠΕΚ 70%	CO <sub>2</sub> biomass plant 2050 ΥΦ
abiotic depletion	kg Sb eq	0,0111	0,00222	0,00522
<b>global warming (GWP100)</b>	<b>kg CO<sub>2</sub> eq</b>	<b>0,169</b>	<b>-0,716</b>	<b>-0,435</b>
ozone layer depletion (ODP)	kg CFC-11 eq	4,18E-08	3,25E-08	2,9E-08
human toxicity	kg 1,4-DB eq	0,55	0,226	0,33
fresh water aquatic ecotox.	kg 1,4-DB eq	0,264	0,0237	0,114
marine aquatic ecotoxicity	kg 1,4-DB eq	1810	82,9	731
terrestrial ecotoxicity	kg 1,4-DB eq	0,00459	0,000882	0,0015
photochemical oxidation	kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	0,000273	4,65E-05	0,000115
acidification	kg SO <sub>2</sub> eq	0,00711	0,00128	0,0031
eutrophication	kg PO <sub>4</sub> --- eq	0,000563	0,000496	0,000512

**Πίνακας 12: Εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου για τον διαχωρισμό και την συμπίεση CO<sub>2</sub> μονάδας βιομάζας κάθε σεναρίου <sup>[49]</sup>**

Impact category	Unit	CO <sub>2</sub> biomass plant 2015	CO <sub>2</sub> lignite plant 2015	CO <sub>2</sub> industrial sources 2015
abiotic depletion	kg Sb eq	0,0111	0,0118	0,00422
<b>global warming (GWP100)</b>	<b>kg CO<sub>2</sub> eq</b>	<b>0,169</b>	<b>0,144</b>	<b>0,439</b>
ozone layer depletion (ODP)	kg CFC-11 eq	4,18E-08	5,16E-09	1,5E-08
human toxicity	kg 1,4-DB eq	0,55	0,454	0,179
fresh water aquatic ecotox.	kg 1,4-DB eq	0,264	0,33	0,0997
marine aquatic ecotoxicity	kg 1,4-DB eq	1810	2340	696
terrestrial ecotoxicity	kg 1,4-DB eq	0,00459	0,00269	0,00161
photochemical oxidation	kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	0,000273	0,000267	0,0001
acidification	kg SO <sub>2</sub> eq	0,00711	0,00701	0,0025
eutrophication	kg PO <sub>4</sub> --- eq	0,000563	0,000231	0,000111

**Πίνακας 13: Εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου για τον διαχωρισμό και την συμπίεση CO<sub>2</sub> το έτος 2015 από μονάδα βιομάζας, λιγνίτη και βιομηχανίας <sup>[49]</sup>**

Impact category	Unit	SNG industry greece 2015	SNG industry greece 2050 ΠΕΚ 70%	SNG industry greece 2050 ΥΦ
abiotic depletion	kg Sb eq	0,00257	0,000478	0,00119
<b>global warming (GWP100)</b>	<b>kg CO2 eq</b>	<b>0,268</b>	<b>0,0589</b>	<b>0,125</b>
ozone layer depletion (ODP)	kg CFC-11 eq	9,16E-09	6,96E-09	6,13E-09
human toxicity	kg 1,4-DB eq	0,108	0,0315	0,0559
fresh water aquatic ecotox.	kg 1,4-DB eq	0,0606	0,0039	0,0253
marine aquatic ecotoxicity	kg 1,4-DB eq	424	16,8	170
terrestrial ecotoxicity	kg 1,4-DB eq	0,000981	0,000106	0,000251
photochemical oxidation	kg C2H4	0,000061	7,37E-06	2,36E-05
acidification	kg SO2 eq	0,00152	0,000148	0,000578
eutrophication	kg PO4--- eq	6,73E-05	5,15E-05	5,55E-05

Πίνακας 14: Εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου για την παραγωγή SNG από βιομηχανική μονάδα κάθε σεναρίου <sup>[49]</sup>

Impact category	Unit	SNG lignite 2050 ΥΦ	SNG lignite 2015	SNG lignite 2050 ΠΕΚ 70%
abiotic depletion	kg Sb eq	0,00166	0,00296	0,000998
<b>global warming (GWP100)</b>	<b>kg CO2 eq</b>	<b>0,119</b>	<b>0,253</b>	<b>0,0568</b>
ozone layer depletion (ODP)	kg CFC-11 eq	5,81E-09	8,66E-09	6,59E-09
human toxicity	kg 1,4-DB eq	0,0732	0,122	0,0503
fresh water aquatic ecotox.	kg 1,4-DB eq	0,0394	0,0724	0,0193
marine aquatic ecotoxicity	kg 1,4-DB eq	270	508	127
terrestrial ecotoxicity	kg 1,4-DB eq	0,000352	0,00104	0,000216
photochemical oxidation	kg C2H4	3,45E-05	6,95E-05	1,93E-05
acidification	kg SO2 eq	0,000868	0,00175	0,000465
eutrophication	kg PO4--- eq	6,24E-05	7,35E-05	5,86E-05

Πίνακας 15: Εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου για την παραγωγή SNG από λιγνιτική μονάδα κάθε σεναρίου <sup>[49]</sup>

Impact category	Unit	SNG biomass 2015	SNG biomass 2050 ΠΕΚ 70%	SNG biomass 2050 ΥΦ
abiotic depletion	kg Sb eq	0,00292	0,000552	0,00135
<b>global warming (GWP100)</b>	<b>kg CO2 eq</b>	<b>0,254</b>	<b>0,0173</b>	<b>0,0922</b>
ozone layer depletion (ODP)	kg CFC-11 eq	1,05E-08	8,04E-09	7,1E-09
human toxicity	kg 1,4-DB eq	0,127	0,0403	0,068
fresh water aquatic ecotox.	kg 1,4-DB eq	0,069	0,00477	0,029
marine aquatic ecotoxicity	kg 1,4-DB eq	481	19,6	193
terrestrial ecotoxicity	kg 1,4-DB eq	0,00113	0,000142	0,000306
photochemical oxidation	kg C2H4	6,98E-05	9,13E-06	2,75E-05
acidification	kg SO2 eq	0,00176	0,000201	0,000688
eutrophication	kg PO4--- eq	9,05E-05	7,26E-05	7,71E-05

Πίνακας 16: Εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου για την παραγωγή SNG από μονάδα βιομάζας κάθε σεναρίου <sup>[49]</sup>

Impact category	Unit	SNG biomass 2015	SNG industry 2015	SNG lignite 2015
abiotic depletion	kg Sb eq	0,00292	0,00257	0,00296
<b>global warming (GWP100)</b>	<b>kg CO2 eq</b>	<b>0,254</b>	<b>0,268</b>	<b>0,253</b>
ozone layer depletion (ODP)	kg CFC-11 eq	1,05E-08	9,16E-09	8,66E-09
human toxicity	kg 1,4-DB eq	0,127	0,108	0,122
fresh water aquatic ecotox.	kg 1,4-DB eq	0,069	0,0606	0,0724
marine aquatic ecotoxicity	kg 1,4-DB eq	481	424	508
terrestrial ecotoxicity	kg 1,4-DB eq	0,00113	0,000981	0,00104
photochemical oxidation	kg C2H4	6,98E-05	0,000061	6,95E-05
acidification	kg SO2 eq	0,00176	0,00152	0,00175
eutrophication	kg PO4--- eq	9,05E-05	6,73E-05	7,35E-05

Πίνακας 17: Σύγκριση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου για την παραγωγή SNG κάθε εφαρμογής το έτος 2015 <sup>[49]</sup>

Impact category	Unit	SNG biomass 2050 ΥΦ	SNG industry 2050 ΥΦ	SNG lignite 2050 ΥΦ
abiotic depletion	kg Sb eq	0,00135	0,00119	0,00166
<b>global warming (GWP100)</b>	<b>kg CO2 eq</b>	<b>0,0922</b>	<b>0,125</b>	<b>0,119</b>
ozone layer depletion (ODP)	kg CFC-11 eq	7,1E-09	6,13E-09	5,81E-09
human toxicity	kg 1,4-DB eq	0,068	0,0559	0,0732
fresh water aquatic ecotox.	kg 1,4-DB eq	0,029	0,0253	0,0394
marine aquatic ecotoxicity	kg 1,4-DB eq	193	170	270
terrestrial ecotoxicity	kg 1,4-DB eq	0,000306	0,000251	0,000352
photochemical oxidation	kg C2H4	2,75E-05	2,36E-05	3,45E-05
acidification	kg SO2 eq	0,000688	0,000578	0,000868
eutrophication	kg PO4--- eq	7,71E-05	5,55E-05	6,24E-05

**Πίνακας 18: Σύγκριση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου για την παραγωγή SNG κάθε εφαρμογής το έτος 2050 σεναρίου ΥΦ<sup>[49]</sup>**

Impact category	Unit	SNG biomass 2050 ΠΕΚ 70%	SNG industry 2050 ΠΕΚ 70%	SNG lignite 2050 ΠΕΚ 70%
abiotic depletion	kg Sb eq	0,000552	0,000478	0,000998
<b>global warming (GWP100)</b>	<b>kg CO2 eq</b>	<b>0,0173</b>	<b>0,0589</b>	<b>0,0568</b>
ozone layer depletion (ODP)	kg CFC-11 eq	8,04E-09	6,96E-09	6,59E-09
human toxicity	kg 1,4-DB eq	0,0403	0,0315	0,0503
fresh water aquatic ecotox.	kg 1,4-DB eq	0,00477	0,0039	0,0193
marine aquatic ecotoxicity	kg 1,4-DB eq	19,6	16,8	127
terrestrial ecotoxicity	kg 1,4-DB eq	0,000142	0,000106	0,000216
photochemical oxidation	kg C2H4	9,13E-06	7,37E-06	1,93E-05
acidification	kg SO2 eq	0,000201	0,000148	0,000465
eutrophication	kg PO4--- eq	7,26E-05	5,15E-05	5,86E-05

**Πίνακας 19: Σύγκριση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου για την παραγωγή SNG κάθε εφαρμογής το έτος 2050 σεναρίου ΠΕΚ 70%<sup>[49]</sup>**

Για τον υπολογισμό του δείκτη GWP 100 global warming και κατά μεγάλο ποσοστό στην σύγκριση που κάναμε μεταξύ των εφαρμογών το λογισμικό εμφάνιζε και άλλους σχετικούς δείκτες οι οποίοι δεν εξετάζονται στην παρούσα διπλωματική. Όμως παρόλα αυτά στους πίνακες του παραρτήματος συμπεριελήφθησαν όλοι οι δείκτες που εμφάνιζε το Simapro αλλά με πιο έντονο σχηματισμό εμφανίζεται ο δείκτης αερίων του θερμοκηπίου GWP 100 που μας ενδιαφέρει ιδιαίτερα κατά την Ανάλυση Κύκλου Ζωής των παραπάνω εφαρμογών.