



# Οργάνωση και λειτουργία πιλοτικής μονάδας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με χρήση υδρογόνου από φυσικό αέριο με ταυτόχρονη δέσμευση και αξιοποίηση του άνθρακα

Διπλωματική Εργασία

## Εκπονούσες:

Αντωνιάδου Μαρία 63

Καλούτσα Παρασκευή 81

## Επιβλέπων:

Τσανακτσίδης Κωνσταντίνος

## Επόπτες:

Στημονιάρης Αδάμος

Γκάρας Στυλιανός

*Κοζάνη, 2021*



## Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματεύεται την οργάνωση και τη λειτουργία μιας πιλοτικής μονάδας, η οποία παράγει ηλεκτρική ενέργεια χρησιμοποιώντας το υδρογόνο του μεθανίου ( $\text{CH}_4$ ), που αποτελεί το κύριο συστατικό του φυσικού αερίου. Παράλληλα, εξετάζεται η δέσμευση και αξιοποίηση του άνθρακα που προέρχεται και αυτό από το μεθάνιο, ώστε να υπάρχουν όσο το δυνατόν λιγότερες επιπτώσεις στο περιβάλλον.

Διεξάγεται μια έρευνα στην οποία θα τεθούν ερωτήματα που θα καθορίσουν τις αποφάσεις μας που αναφέρονται στον σχεδιασμό πιλοτικής μονάδας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας χρησιμοποιώντας αποτελέσματα προηγούμενων παρόμοιων μεταξύ τους ερευνών.

Κρίνεται αναγκαίο να τονιστεί η σημασία της χρήσης του φυσικού αερίου που επιλέχθηκε έναντι άλλων πηγών ενέργειας λόγω της εξοικονόμησης χρημάτων που προσφέρει, της αυξανόμενης συχνότητας τα τελευταία χρόνια αλλά και η ελάχιστη επίδραση στην ρύπανση της ατμόσφαιρας και του υπέδαφους. Ακόμα, θα μελετηθεί η διεργασία με την οποία θα παραχθεί το υδρογόνο από το φυσικό αέριο και στην συνέχεια η παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας. Θα γίνει χρήση του Visio ώστε να δημιουργηθεί το απαιτούμενο τυπικό διάγραμμα ροής.

Τέλος, ένας σημαντικός παράγοντας που θα μελετηθεί είναι η δέσμευση και η αξιοποίηση του άνθρακα ο οποίος προέρχεται από το μεθάνιο. Συγκεκριμένα, η δέσμευση αφορά εφαρμογές όπως είναι οι αναπνευστικές συσκευές, η δέσμευση από το ρεύμα καυσαερίων, η προσρόφηση του σε  $\text{CaO}$  ή σε στερεά μεγάλου εμβαδού κτλ. Η αξιοποίηση του διοξειδίου του άνθρακα μπορεί να γίνει στην βιομηχανία τροφίμων, στην χημική βιομηχανία αλλά και για παραγωγή συνθετικών πολυμερών και καυσίμων.

Σαν συμπέρασμα προκύπτει ότι μια παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από το υδρογόνο του φυσικού αερίου και ο συνδιασμός μιας μονάδας δέσμευσης και αξιοποίησης του άνθρακα είναι ένα σύστημα που μπορεί να μειώσει σε μεγάλο βαθμό τους ρύπους και να βελτιώσει την ποιότητα ζωής των ανθρώπων.

**Λέξεις – Κλειδιά:** ηλεκτρική ενέργεια, υδρογόνο, φυσικό αέριο, άνθρακας, μεθάνιο, κυψέλες καυσίμου

## *Abstract*

This dissertation deals with the organization and operation of a pilot plant, which generates electricity using methane hydrogen ( $\text{CH}_4$ ), which is the main component of natural gas. At the same time, the capture and utilization of carbon derived from methane is examined in order to have as few effects on the environment as possible.

A survey is being conducted to ask questions that will determine our decisions regarding the design of a pilot power plant using the results of previous similar surveys.

It is necessary to emphasize the importance of the use of natural gas chosen over other energy sources due to the money savings it offers, the increasing frequency in recent years and the minimal impact on air and subsoil pollution. Also, the process by which hydrogen will be produced from natural gas and then the production of electricity will be studied. Visio will be used to create the required standard flow diagram.

Finally, an important factor to be studied is the capture and utilization of methane-derived carbon. Specifically, the binding concerns applications such as breathing apparatus, the capture by the exhaust gas stream, its adsorption in  $\text{CaO}$  or in large solids, etc. The utilization of carbon dioxide can be done in the food industry, in the chemical industry but also for the production of synthetic polymers and fuels.

As a conclusion it follows that generating electricity from hydrogen gas and combining a carbon capture and recovery unit is a system that can greatly reduce pollutants and improve people's quality of life.

**Keywords:** electricity, hydrogen, gas, coal, methane, fuel cells

## *Ευχαριστίες*

Με την παρούσα διπλωματική εργασία ολοκληρώνονται οι σπουδές μας στο τμήμα Χημικών Μηχανικών του Πανεπιστημίου Δυτικής Μακεδονίας και σε αυτό το σημείο θα θέλαμε να εκφράσουμε τις θερμές μας ευχαριστίες σε όλους όσους συνέβαλλαν στην πραγματοποίηση της.

Αρχικά, ευχαριστούμε θερμά τον καθηγητή και επιβλέπων της διπλωματικής εργασίας κ. Τσανακτσίδη Κωνσταντίνο για την πολύτιμη καθοδήγηση και τις συμβουλές όσον αφορά την εκπόνηση της.

Στην συνέχεια, ευχαριστούμε όλους τους καθηγητές του τμήματος για την καθοριστική συμβολή τους στην ολοκλήρωση των σπουδών μας αλλά και στην απόκτηση βασικών γνώσεων και δεξιοτήτων.

Ακόμα, θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε όλους όσους ήταν δίπλα μας, φίλους και συμφοιτητές οι οποίοι έκαναν πιο εύκολο και δημιουργικό το διάστημα της εκπόνησης της διπλωματικής εργασίας.

Τέλος, πάνω από όλα ευχαριστούμε από καρδιάς τους γονείς μας Σεραφείμ, Αθανασία και Αντιγόνη, Δημήτριος, την οικογένεια μας, καθώς όλοι μας παρείχαν απεριόριστη δύναμη, στήριξη και αγάπη.

Καλούτσα Παρασκευή,

Αντωνιάδου Μαρία

## Περιεχόμενα

1. Εισαγωγή.....	1
2. Βασικές αρχές φυσικού αερίου.....	6
2.1. Ιστορικά στοιχεία .....	6
2.2. Σύσταση και ιδιότητες φυσικού αερίου.....	8
2.3. Σχηματισμός Φυσικού Αερίου.....	9
2.4. Εξαγωγή και μεταφορά.....	11
2.5. Περιφέρεια Δυτικής Μακεδονίας.....	14
2.6. Καύση φυσικού αερίου.....	15
2.7. Αξιοποίηση του Φυσικού Αερίου.....	16
2.8. Πλεονεκτήματα Φυσικού Αερίου.....	19
2.9. Πλεονεκτήματα Φυσικού Αερίου έναντι των συμβατικών υγρών καυσίμων .....	20
2.10. Υφιστάμενη κατάσταση στην Ελλάδα.....	20
2.11. Εξέλιξη ζήτησης φυσικού αερίου.....	22
3. Υδρογόνο.....	25
3.1. Ιστορική ανασκόπηση.....	25
3.2. Οι ιδιότητες του υδρογόνου.....	25
3.3. Μέθοδοι παραγωγής υδρογόνου.....	27
Ατμοαναμόρφωση υδρογονανθράκων (SMR).....	28
Μερική οξειδωση (POX) – Αεριοποίηση .....	30
Αεριοποίηση & πυρόλυση βιομάζας.....	31
Αυτόθερμη αναμόρφωση (ATR).....	31
3.4. Αποθήκευση Υδρογόνου.....	32
3.5. Ασφάλεια & υδρογόνο.....	33
3.6. Τεχνολογίες παραγωγής με υδρογόνο.....	35
3.7. Οικονομική αξιολόγηση παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με χρήση υδρογόνου από φυσικό αέριο με ταυτόχρονη δέσμευση CO <sub>2</sub> .....	36
4. Υφιστάμενη κατάσταση στον τομέα της ηλεκτρικής ενέργειας .....	38
4.1. Παραγωγή και βασικές αρχές μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας στην Ελλάδα.....	41
4.2. Ο λιγνίτης στην Ελλάδα .....	43
4.3. Απολιγνιτοποίηση.....	46
4.4. Μέθοδοι παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με την χρήση συμβατικών ορυκτών καυσίμων.....	47
4.5. Φυσικό αέριο και ηλεκτρική ενέργεια .....	48

5.	Μονάδα Παραγωγής Ηλεκτρικής Ενέργειας.....	49
5.1.	Αποθείωση.....	52
	Αποθείωση και Υδροαποθείωση.....	53
	Διεργασία αποθείωσης FGD.....	53
5.2.	Αναμορφωτής.....	56
5.3.	Αντίδραση μετατόπισης νερού/αερίου -Water Gas Shift.....	59
	Αναμόρφωση του CO.....	61
	Καταλύτης μετατόπισης υψηλής θερμοκρασίας.....	61
	Καταλύτης μετατόπισης χαμηλής θερμοκρασίας.....	62
5.4.	Στήλη PSA.....	63
	Κύκλος μονής κλίνης.....	66
	Κύκλος διπλής κλίνης.....	67
5.5.	Κυψέλες καυσίμου.....	69
	Ιστορική αναδρομή.....	69
	Γενικά για τις κυψέλες καυσίμου.....	70
	Θερμοδυναμική των κυψελών καυσίμου.....	72
	Ανώτερη και κατώτερη θερμογόνο δύναμη.....	72
	Κινητική ηλεκτροδίων.....	74
	Ηλεκτρολύτης.....	75
	Κριτήρια επιλογής ηλεκτροκαταλυτών.....	76
	Εφαρμογές κυψελών καυσίμου.....	77
	Απαραίτητη απόδοση και ισχύς.....	78
	Σύγκριση κόστους.....	79
	Προβλήματα που αφορούν το καύσιμο.....	80
	Τύποι κυψελών καυσίμου.....	81
6.	Δέσμευση και αξιοποίηση του άνθρακα.....	84
6.1.	Δέσμευση του CO <sub>2</sub> .....	89
	Δέσμευση του διοξειδίου το άνθρακα σε αναπνευστικές συσκευές με νατράσβεστο.....	89
	Δέσμευση του CO <sub>2</sub> από το ρεύμα καυσαερίων, μετά την καύση ορυκτών καυσίμων.....	89
	Διαχωρισμός και δέσμευση του διοξειδίου του άνθρακα με διαλύτες.....	90
	Κρυογενικός διαχωρισμός.....	90
	Προσρόφηση σε CaO.....	90
	Προσρόφηση σε στερεά μεγάλου εμβαδού.....	91
	Διαχωρισμός με μεμβράνες.....	91
	Καύση με οξυγόνο.....	91

Δέσμευση του CO <sub>2</sub> σε ηλεκτροχημικά κελιά.....	92
6.2. Αξιοποίηση του διοξειδίου του άνθρακα.....	92
Βιομηχανία τροφίμων .....	92
Χημική βιομηχανία.....	92
Παραγωγή συνθετικών πολυμέρων.....	93
Παραγωγή συνθετικών καυσίμων.....	93
Αποθήκευση και αξιοποίηση του CO <sub>2</sub> στη διαδικασία της διύλισης.....	94
Ενισχυμένη ανάκτηση φυσικού αερίου .....	97
Αξιοποίηση του διοξειδίου το άνθρακα στη διαδικασία της φωτοσύνθεσης .....	97
Αξιοποίηση του διοξειδίου του άνθρακα σε σύγχρονα συστήματα παραγωγής βιομάζας ..	97
7. Νομοθετικό Πλαίσιο.....	99
8. Συμπεράσματα.....	101
9. Βιβλιογραφία Κεφαλαίων .....	103
9.1. Κεφάλαιο 2.....	103
9.2. Κεφάλαιο 3.....	103
9.3. Κεφάλαιο 4.....	104
9.4. Κεφάλαιο 5.....	105
9.5. Κεφάλαιο 6.....	107
10. Αναφορές.....	108



## Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 2-1. Λύχνος Bunsen. (Βικιπαίδεια).....	7
Εικόνα 2-2. Χημική σύσταση φυσικού. Αερίου. (Φυσικό αέριο, 2018).....	8
Εικόνα 2-3. Γεωλογικοί σχηματισμοί όπου βρίσκεται πετρέλαιο μαζί με φυσικό αέριο και νερό. (ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ & ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΩΝ ΔΙΑΘΕΣΙΜΩΝ, n.d.).....	10
Εικόνα 2-4. Χώρες με παραγωγή Φυσικού Αερίου. (Φυσικό Αέριο).....	11
Εικόνα 2-5. Μεταφορά υγρού φυσικού αερίου. (Outlook for energy: A perspective to 2014, 2019).....	12
Εικόνα 2-6. Ο αγωγός TAP, μήκους περίπου 878 χλμ., συνδέεται με τον αγωγό Trans Anatolian Pipeline (TANAP) στους Κήπους στα ελληνοτουρκικά σύνορα. (Πρεμιέρα για τον αγωγό TAP που φέρνει το αζέρικο αέριο στην Ελλάδα, 2021).....	13
Εικόνα 2-7. Εθνικό Σύστημα Αγωγών Φυσικού Αερίου. (Το Εθνικό Σύστημα Φυσικού Αερίου και ο ρόλος του ΔΕΣΦΑ ως Διαχειριστή, 2018).....	14
Εικόνα 2-8. Τοποθέτηση αγωγών φυσικού αερίου στη Δυτική Μακεδονία. (Νέους αγωγούς αερίου για τη Δυτική Μακεδονία και την Πάτρα μελετάει ο ΔΕΣΦΑ – Ετοιμάζει το νέο 10ετές αναπτυξιακό πρόγραμμα έργων, 2020).....	15
Εικόνα 2-9. Διάγραμμα με τις χρήσεις του φυσικού αερίου.....	16
Εικόνα 2-10. Εισαγωγές φυσικού αερίου την περίοδο 1/1/2017 - 30/4/2018. (Μελέτη Ανάπτυξης 2019-2028, 2018).....	23
Εικόνα 3-1. Διάγραμμα ροής της ατμοαναμόρφωσης υδρογονανθράκων. (Παραγωγή υδρογόνου).....	29
Εικόνα 3-2. Διαβάθμιση επικινδυνότητας υδρογόνου. (ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ ΓΙΑ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ).....	34
Εικόνα 3-3. Κόστος παραγωγής υδρογόνου με χρήση φυσικού αερίου για διάφορες περιοχές. (Hydrogen production costs using natural gas in selected regions, 2018, 2020).....	36
Εικόνα 4-1. Τυπική διάκριση πηγών ενέργειας και αναγκών. (Ευστρατιάδης, Εισαγωγή στην Ενεργειακή Τεχνολογία, 2018).....	38
Εικόνα 4-2. Χρονική εξέλιξη χρήσης πηγών ενέργειας. (Ευστρατιάδης, Εισαγωγή στην Ενεργειακή Τεχνολογία).....	39
Εικόνα 4-3. Εργοστάσιο παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στην Ελλάδα. (Αργυρόπουλος Φώτης, 2015).....	40
Εικόνα 4-4. Ενεργειακή παραγωγή και ζήτηση ανά τομέα στην Ελλάδα. (Ευστρατιάδης, Εισαγωγή στην Ενεργειακή Τεχνολογία).....	41
Εικόνα 4-5. Λιγνίτης. (Συνδεσμος μεταλλευτικων επιχειρησεων).....	43
Εικόνα 4-6. Διάγραμμα ηλεκτροπαραγωγής από λιγνίτη. (Τεχνολογίες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας).....	46
Εικόνα 4-7. Διαφορά συμπαραγωγής με χωριστή παραγωγή Η.Ε & θερμότητας. (Παραγωγή ενέργειας από συμβατικά ορυκτά καύσιμα και εναλλακτικές πηγές ενέργειας).....	48
Εικόνα 5-1. Υδραποθείωση. (Hydrodesulfurization and Hydrodenitrogenation).....	53
Εικόνα 5-2. Σχηματική απεικόνιση του απορροφητή μίας FGD. (Αποθείωση καυσαερίων).....	55
Εικόνα 5-3. Σχηματική αναπαράσταση βιομηχανικού αντιδραστήρα αναμόρφωσης για την παραγωγή υδρογόνου. (ΜΑΡΤΑΒΑΛΤΖΗ, 2010).....	58
Εικόνα 5-4. Σχηματική αναπαράσταση παραγωγής CO <sub>2</sub> και H <sub>2</sub> . (Water Gas Shift).....	59
Εικόνα 5-5. Γραφική παράσταση θερμοκρασίας και σταθερά ισορροπίας. (Wei-Hsin Chen C.-Y. C.).....	59

Εικόνα 5-6. Προτεινόμενοι συσχετιστικοί και οξειδοαναγωγικοί μηχανισμοί της αντίδρασης μετατόπισης αερίου νερού. (Water–gas shift reaction).....	60
Εικόνα 5-7. Ταξινόμηση της αντίδρασης μετατόπισης αερίου νερού. (Wei-Hsin Chen C.-Y. C., 2020) .....	60
Εικόνα 5-8. (α) Σύστημα CPESA, (β) Σχήμα CPESA. (Hydrogen purification using compact pressure swing adsorption system for fuel cell, n.d.) .....	66
Εικόνα 5-9. Συγκέντρωση CO-CO <sub>2</sub> στη στήλη προσρόφησης. (Hydrogen purification using compact pressure swing adsorption system for fuel cell, n.d.).....	67
Εικόνα 5-10. Κυκλική διαδικασία CPESA για σύστημα διπλής κλίσης (P1 :χαμηλή πίεση, Ph: υψηλή πίεση). (Hydrogen purification using compact pressure swing adsorption system for fuel cell, n.d.) .....	68
Εικόνα 5-11. Sir William Grove. (wikipedia, n.d.) .....	69
Εικόνα 5-12. Η πρώτη δομή 4 κυψελών καυσίμου. (ΖΟΥΝΤΟΥΡΙΔΟΥ, ΑΝΑΛΥΣΗ-ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΚΥΨΕΛΩΝ ΚΑΥΣΙΜΟΥ ΚΑΙ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΚΥΨΕΛΗΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ ΜΕΜΒΡΑΝΗΣ ΑΝΤΑΛΛΑΓΗΣ ΠΡΩΤΟΝΙΩΝ (PEMFC) ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ, 2006).....	70
Εικόνα 5-13. Ηλεκτρόλυση – κυψέλη καυσίμου. (ΖΟΥΝΤΟΥΡΙΔΟΥ, ΑΝΑΛΥΣΗ-ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΚΥΨΕΛΩΝ ΚΑΥΣΙΜΟΥ ΚΑΙ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΚΥΨΕΛΗΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ ΜΕΜΒΡΑΝΗΣ ΑΝΤΑΛΛΑΓΗΣ ΠΡΩΤΟΝΙΩΝ (PEMFC) ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ, 2006).....	71
Εικόνα 5-14. Κυψέλη καυσίμου. (ΖΟΥΝΤΟΥΡΙΔΟΥ, ΑΝΑΛΥΣΗ-ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΚΥΨΕΛΩΝ ΚΑΥΣΙΜΟΥ ΚΑΙ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΚΥΨΕΛΗΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ ΜΕΜΒΡΑΝΗΣ ΑΝΤΑΛΛΑΓΗΣ ΠΡΩΤΟΝΙΩΝ (PEMFC) ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ, 2006) .....	71
Εικόνα 5-15. Θερμιδομετρική οβίδα. (Δημήτριος-Παναγιώτης, ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ ΓΙΑ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ).....	73
Εικόνα 5-16. Σύγκριση της απόδοσης των κυψελών καυσίμου με αυτή των μηχανών εσωτερικής καύσης: (α) κυψέλη καυσίμου που λειτουργεί σε χαμηλή θερμοκρασία και πίεση, (β) κυψέλη καυσίμου σε υψηλή θερμοκρασία και πίεση, (γ) κυψέλες με ενσωματωμένο αναμορφωτή καυσίμου, (δ) κινητήρας diesel, (ε) βενζινοκινητήρας. (Δημήτριος-Παναγιώτης, ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ ΓΙΑ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ) .....	79
Εικόνα 5-17. Όχημα με κυψέλη καυσίμου. (Fuel economy) .....	81
Εικόνα 6-1. Ο βιο-γεωχημικός κύκλος του άνθρακα. (ΑΝΑΚΤΗΣΗ ΚΑΙ ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗ ΤΟΥ ΔΙΟΞΕΙΔΙΟΥ ΤΟΥ ΑΝΘΡΑΚΑ, 2020) .....	85
Εικόνα 6-2. Αφρισμός πολυμερικού υλικού. (ΓΟΥΝΗΣ, ΑΝΑΚΤΗΣΗ ΚΑΙ ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗ ΤΟΥ ΔΙΟΞΕΙΔΙΟΥ ΤΟΥ ΑΝΘΡΑΚΑ, 2020).....	93
Εικόνα 6-3. Μονάδα CCS. (ΓΟΥΝΗΣ, ΑΝΑΚΤΗΣΗ ΚΑΙ ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗ ΤΟΥ ΔΙΟΞΕΙΔΙΟΥ ΤΟΥ ΑΝΘΡΑΚΑ, 2020).....	94
Εικόνα 6-4. Δέσμευση και αποθήκευση διοξειδίου του άνθρακα. (Διασφάλιση της δέσμευσης και ασφαλούς χρήσης αποθήκευσης διοξειδίου του άνθρακα στην Ευρώπη) .....	96
Εικόνα 6-5. Μέθοδος ενισχυμένης ανάκτησης πετρελαίου με διοξείδιο του άνθρακα. (ΓΟΥΝΗΣ, ΑΝΑΚΤΗΣΗ ΚΑΙ ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗ ΤΟΥ ΔΙΟΞΕΙΔΙΟΥ ΤΟΥ ΑΝΘΡΑΚΑ, 2020).....	97

## Κατάλογος Πινάκων

<b>Πίνακας 2-1.</b> Μέσος όρος ετήσιων προβλέψεων. (Μελέτη Ανάπτυξης 2019-2028, 2018).....	24
Πίνακας 2-2. Παγκόσμια παραγωγή υδρογόνου από διάφορες πρώτες ύλες. (Δημήτριος-Παναγιώτης, ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ ΓΙΑ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ) .....	27
Πίνακας 2-3. Μέθοδοι παραγωγής υδρογόνου.....	27
Πίνακας 2-4. Οικονομικά και τεχνικά στοιχεία για διαφορετικές τεχνολογίες. (Υπάρχουσες τεχνολογίες και τελικές χρήσεις του καυσίμου του μέλλοντος - H <sub>2</sub> ).....	30
Πίνακας 2-5. Σύγκριση μεθόδων παραγωγής υδρογόνου.....	31
Πίνακας 2-6. Οικονομοτεχνική αποτίμηση συστημάτων αποθήκευσης H <sub>2</sub> . (ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ ΓΙΑ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ) .....	33
Πίνακας 3-1. Τυπική σύσταση και θερμογόνος δύναμη.....	42
Πίνακας 3-2. Συγκεντρωτικός πίνακας προβλεπόμενης κατανάλωσης λιγνίτη ανά ΑΗΣ για την περίοδο 2010-2050. (Νικόλαος).....	45
Πίνακας 5-1. Προδιαγραφές συστήματος CPSA. (Hydrogen purification using compact pressure swing adsorption system for fuel cell, n.d.) .....	65
Πίνακας 5-2. Η ικανότητα του προσροφητικού στη διαδικασία προσρόφησης CO και CO <sub>2</sub> . (Hydrogen purification using compact pressure swing adsorption system for fuel cell, n.d.) .....	68
Πίνακας 5-3. Αντιδράσεις κάθε τύπου κυψέλης καυσίμου. (ΖΟΥΝΤΟΥΡΙΔΟΥ, ΑΝΑΛΥΣΗ-ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΚΥΨΕΛΩΝ ΚΑΥΣΙΜΟΥ ΚΑΙ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΚΥΨΕΛΗΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ ΜΕΜΒΡΑΝΗΣ ΑΝΤΑΛΛΑΓΗΣ ΠΡΩΤΟΝΙΩΝ (PEMFC) ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ, 2006).....	82
Πίνακας 5-4. Τύποι κυψελών καυσίμου και βασικά στοιχεία. (ΖΟΥΝΤΟΥΡΙΔΟΥ, ΑΝΑΛΥΣΗ-ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΚΥΨΕΛΩΝ ΚΑΥΣΙΜΟΥ ΚΑΙ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΚΥΨΕΛΗΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ ΜΕΜΒΡΑΝΗΣ ΑΝΤΑΛΛΑΓΗΣ ΠΡΩΤΟΝΙΩΝ (PEMFC) ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ, 2006).....	83
Πίνακας 6-1. Επιδράσεις CO <sub>2</sub> σε διάφορες συγκεντρώσεις στον ανθρώπινο οργανισμό. (ΓΟΥΝΗΣ, ΑΝΑΚΤΗΣΗ ΚΑΙ ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗ ΤΟΥ ΔΙΟΞΕΙΔΙΟΥ ΤΟΥ ΑΝΘΡΑΚΑ, 2020).....	87
Πίνακας 6-2. Κατανομή του μέσου όρου των εκπομπών CO <sub>2</sub> ανά κατηγορία του ενεργειακού τομέα στην Ελλάδα για τα έτη 2008-2015. (ΑΝΑΚΤΗΣΗ ΚΑΙ ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗ ΤΟΥ ΔΙΟΞΕΙΔΙΟΥ ΤΟΥ ΑΝΘΡΑΚΑ, 2020).....	88
Πίνακας 6-3. Στοιχεία καυσίμων. (ΑΝΑΚΤΗΣΗ ΚΑΙ ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗ ΤΟΥ ΔΙΟΞΕΙΔΙΟΥ ΤΟΥ ΑΝΘΡΑΚΑ, 2020).....	88

## 1. Εισαγωγή

### **Κεφάλαιο 2<sup>ο</sup>:**

Αρχικά, παρουσιάζονται ορισμένα ιστορικά γεγονότα που αφορούν την εύρεση, την αξιοποίηση και τελικά την ελεύθερη κατανάλωση του φυσικού αερίου ώστε να γίνει κατανοητή η δημιουργία και η εξέλιξη του. Σημαντικό είναι να τονιστεί, πως οι πρώτοι πολιτισμοί που χρησιμοποίησαν το φυσικό αέριο ήταν η Κίνα και η Περσία σε εποχή 2000 π.Χ. Στην χώρα μας και συγκεκριμένα στην Αθήνα, πριν το φυσικό αέριο υπήρχε το φωτοαέριο όπου χρησιμοποιήθηκε μέχρι το 1985. Σπουδαίο γεγονός για την χώρα μας, ήταν η κατασκευή του αγωγού μεταφοράς του φυσικού αερίου μεγάλου μήκους όπου διέσχισε σχεδόν όλη την Ελλάδα αφού άρχισε από τα σύνορα με την Βουλγαρία και είχε ως τέρμα την Αττική.

Ως φυσικό αέριο ορίζεται ένα μείγμα το οποίο περιέχει διάφορα συστατικά κυρίως υδρογονάνθρακες και σχηματίζεται όπως το πετρέλαιο. Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι είναι μη τοξικό αέριο και έχει πολύ καλές ιδιότητες σε σχέση με τα άλλα καύσιμα.

Σε μεγάλο βάθος, που βρίσκεται το φυσικό αέριο, επικρατούν συνθήκες υψηλής πίεσης και ο προορισμός του είναι σε μέρη όπου δεν χρειάζεται να υποστεί περαιτέρω επεξεργασία. Περιοχές που λειτουργούν σαν «αποθήκη» του φυσικού αερίου είναι κυρίως η Λατινική Αμερική, η Ανατολική Ασία και η Αυστραλία. Ακόμα, γίνεται αναφορά για τον τρόπο μεταφοράς του φυσικού αερίου.

Στην Περιφέρεια Δυτικής Μακεδονίας η τροφοδοσία με φυσικό αέριο θα πραγματοποιηθεί με τον αγωγό ΤΑΡ.

Όσον αφορά την καύση του φυσικού αερίου, αξίζει να αναφερθεί ότι σε σχέση με άλλα καύσιμα δεν έχει τόσο μεγάλες αρνητικές συνέπειες για το περιβάλλον, καθώς δεν παράγει υψηλές ποσότητες διοξειδίου του άνθρακα και καθόλου τέφρα.

Ανάλογα με την χρήση του φυσικού αερίου μπορεί να εφαρμοστεί σε πολλούς τομείς, ενδεικτικά είναι η ηλεκτροπαραγωγή, η βιομηχανία και η παραγωγή υδρογόνου. Επιπλέον, αναφέρονται αναλυτικά τα πλεονεκτήματα του φυσικού αερίου καθώς και τα πλεονεκτήματα του έναντι των άλλων συμβατικών υγρών καυσίμων.

Τελειώνοντας με το κεφάλαιο, επισημαίνεται η υφιστάμενη κατάσταση στην Ελλάδα όσον αφορά τα τεχνικά στοιχεία του φυσικού αερίου καθώς και τα οικονομικά. Συγκεκριμένα, αναλύεται η μεταφορά του, η ποσότητα και ποιότητα αλλά και η εξέλιξη ζήτησης του.

### **Κεφάλαιο 3<sup>ο</sup>:**

Σε αυτή τη διπλωματική εργασία τονίζεται ο δυναμικός ρόλος που μπορεί να διαδραματίσει το υδρογόνο στην παροχή ηλεκτρικής ενέργειας, θερμότητας, βιομηχανίας, μεταφορών και αποθήκευση ενέργειας σε ένα ενεργειακό σύστημα χαμηλών εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα.

Στην αρχή, γίνεται μια ιστορική ανασκόπηση του αφορά το υδρογόνο και έπειτα αναφέρονται οι ιδιότητες του όπου η σημαντικότερη είναι πως δεν αφήνει περιβαλλοντικό αποτύπωμα. Το υδρογόνο βρίσκεται σε ίχνη στην ατμόσφαιρα καθώς είναι ένα ελαφρύ στοιχείο.

Στην συνέχεια, τονίζονται τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα της χρήσης του  $H_2$  με τα πρώτα να ξεπερνούν τα δεύτερα. Έπειτα, ακολουθεί η ανάλυση των μεθόδων παραγωγής υδρογόνου με διάφορες τεχνολογίες, με σημαντικότερη την ατμοαναμόρφωση του μεθανίου.

Ακόμα, μια σημαντική παράμετρο για την χρήση του υδρογόνου είναι η αποθήκευση. Παρατέθηκαν πιθανές μέθοδοι αποθήκευσης του εφόσον το  $H_2$  υποστεί κάποια επεξεργασία και τονίζεται η διαφορά αποθήκευσης του υγρού με το αέριο υδρογόνο.

Επιπλέον, σημασία δίνεται στο γεγονός ότι η καλύτερη μέθοδος αποθήκευσης υδρογόνου είναι όταν το στοιχείο είναι σε συμπιεσμένη μορφή και παρουσιάζεται ένας αναλυτικός πίνακας που δείχνει τα τεχνοοικονομικά στοιχεία.

Όσο αυξάνεται ο παγκόσμιος πληθυσμός, αυξάνεται και η απαίτηση για μεγαλύτερα ποσά ενέργειας ανά κάτοικο με αποτέλεσμα την ανάγκη δημιουργίας πλαισίου ασφαλείας όσον αφορά το υδρογόνο στην συγκεκριμένη περίπτωση. Η ανάγκη για να χρησιμοποιείται με ασφάλεια το υδρογόνο προήλθε από διάφορα ατυχήματα που έχουν συμβεί. Αυτά τα ατυχήματα μπορεί να είναι φυσιολογικά και φυσικά, όμως υπάρχουν διάφοροι τρόποι ώστε να μειωθούν.

Το υδρογόνο, έχοντας πολλαπλές λειτουργίες όπως είναι ένα αρκετά χρήσιμο αντιδραστήριο για την παραγωγή διάφορων χημικών ουσιών, είναι όπως αναφέρθηκε το καθαρότερο και πιο φιλικό καύσιμο για το περιβάλλον, το οποίο κατά την καύση του παράγει νερό, αντί των αερίων του θερμοκηπίου. Το υδρογόνο φαίνεται ότι είναι πράγματι ένα βιώσιμο εναλλακτικό καύσιμο και κατά συνέπεια ενεργειακός φορέας του μέλλοντος. Ένα παράδειγμα είναι η χρήση του στις κυψέλες καυσίμου για κίνηση, θερμότητα και παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

#### **Κεφάλαιο 4<sup>ο</sup>:**

Στο επόμενο κεφάλαιο γίνεται αναφορά στην υφιστάμενη κατάσταση στον τομέα της ηλεκτρικής ενέργειας. Συγκεκριμένα, επισημαίνεται ο ορισμός της ηλεκτρικής ενέργειας καθώς και κάποια βασικά στοιχεία αλλά επίσης η προέλευση της από πηγές ενέργειας (Ανανεώσιμες πηγές, ορυκτά καύσιμα). Τόσο τα ορυκτά καύσιμα όσο και οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας έχουν μεγάλο ποσοστό απόδοσης από 80-90%.

Καίριος παράγοντας για την τιμή και το κόστος της ηλεκτρικής ενέργειας είναι ο τρόπος παραγωγής και μεταφοράς. Επίσης, υπάρχει ευκολία στην μετατροπή της σε άλλες μορφές ενέργειας όπως είναι η θερμότητα και η ακτινοβολία. Πρώτο στην κατάταξη για το πιο διαδεδομένο καύσιμο για την ενεργειακή παραγωγή στην Ελλάδα είναι το πετρέλαιο ακολουθούμενο από τον άνθρακα και τέλος το φυσικό αέριο το οποίο σήμερα αρχίζει να κερδίζει έδαφος.

Στην συνέχεια του κεφαλαίου αναλύεται η παραγωγή και οι βασικές αρχές μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας στην Ελλάδα. Η ηλεκτροπαραγωγή στην χώρα μας προέρχεται κυρίως από θερμοηλεκτρικούς σταθμούς. Η Περιφέρεια της Δυτικής Μακεδονίας αποτελεί την ενεργειακή

καρδιά της χώρας καθώς σχεδόν το μισό της συνολικής ηλεκτρικής ενέργειας παράγεται εκεί, διότι υπάρχουν πλούσια κοιτάσματα λιγνίτη.

Πιο γενικά, κάποιες χαρακτηριστικές λέξεις που αντιπροσωπεύουν την ενεργειακή κατάσταση της χώρας είναι εξαρτημένη, σπάταλη και ρυπογόνος διότι έχει υψηλό ποσοστό εισαγόμενων καυσίμων και χαμηλό δείκτη ενεργειακής απόδοσης αλλά και υψηλές εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα.

Παράλληλα, η επιδείνωση των κλιματικών δεικτών από τον λιγνίτη στην Περιφέρεια Δυτικής Μακεδονίας έφερε πιο γρήγορα την εφαρμογή του υδρογόνου για ενέργεια. Δημιουργήθηκε ένας συγκεντρωτικός πίνακας κατανάλωσης λιγνίτη για την περίοδο 2010-2050 σε αυτήν την Περιφέρεια.

Ακολουθεί μια επεξηγηματική εικόνα που απεικονίζει τα βήματα για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από λιγνίτη. Δηλαδή την καύση, την παραγωγή ατμού, την συμπύκνωση του και την εισαγωγή του στην γεννήτρια.

Έπειτα, γίνεται αναφορά στην απολιγνιτοποίηση. Συγκεκριμένα, πρόκειται για μια επαναλαμβανόμενη μείωση και τελικά παύση της χρήσης του λιγνίτη για την ηλεκτροπαραγωγή που έχει σκοπό να παρέχει ποιότητα στην υγεία των ανθρώπων και στο περιβάλλον. Αυτό είναι αναγκαίο να γίνει διότι ο λιγνίτης ευθύνεται για το 34% των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου και πολλές περιοχές όπως η Κοζάνη έχουν αποσύρει αυτού του είδους ηλεκτροπαραγωγή. Την θέση του έρχεται να αντικαταστήσει το φυσικό αέριο το οποίο οι έρευνες δείχνουν να συμφέρει από πολλές απόψεις.

Τέλος, παρουσιάζονται κάποιες μέθοδοι ηλεκτροπαραγωγής με την χρήση συμβατικών ορυκτών καυσίμων με βασικές την συμπαραγωγή και την παραγωγή από αεροστρόβιλους/ατμοστρόβιλους με την πρώτη μονάδα να υστερεί σε κόστος αλλά να πλεονεκτεί περιβαλλοντικά. Το φυσικό αέριο χρησιμοποιώντας το υδρογόνο ως καύσιμο για ηλεκτροπαραγωγή θα μειώσει σε πολύ μεγάλο βαθμό την ατμοσφαιρική ρύπανση.

### ***Κεφάλαιο 5°:***

Σε αυτό το κεφάλαιο θα παρουσιαστεί το διάγραμμα ροής για την μονάδα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από το φυσικό αέριο και θα ακολουθήσει η ανάλυση των διεργασιών της μονάδας.

Πρώτη επεξεργασία που δέχεται το φυσικό αέριο είναι αυτή της αποθείωσης. Αυτό συμβαίνει διότι η τροφοδοσία συνυπάρχει μαζί με ενώσεις οι οποίες κάνουν δύσκολη την μεταφορά αλλά και την χρήση του, όπως είναι το θείο. Στην ίδια ενότητα γίνεται ανάλυση των μεθόδων απομάκρυνσης θείου.

Δεύτερη στη σειρά είναι η αναμόρφωση. Στην παρούσα εργασία ασχοληθήκαμε με την αναμόρφωση ατμού μεθανίου (SMR) διότι έχει την υψηλότερη απόδοση σε υδρογόνο. Λόγω αυτής της διαδικασίας μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε απευθείας υδρογόνο για περαιτέρω χρήση χωρίς την ταυτόχρονη αποθήκευση του.

Η αντίδραση μετατόπισης νερού/αερίου WGS (Water Gas Shift) ακολουθεί στη συνέχεια η οποία εξαρτάται από τη θερμοκρασία καθώς όσο υψηλότερη είναι τόσο μικρότερες ποσότητες υδρογόνου παράγονται. Σε αυτή την διαδικασία παράγεται το μέγιστο υδρογόνο. Ταξινομείται σε καταλυτική και μη καταλυτική και πραγματοποιείται μια εξώθερμη αντίδραση. Συμβαίνει σε δύο στάδια, το ένα είναι ο μετατροπέας υψηλής θερμοκρασίας (HTS) και το άλλο είναι ο μετατροπέας χαμηλής θερμοκρασίας (LTS). Στο HTS χρησιμοποιούνται καταλύτες που έχουν ως βάση Fe-Cr και Ni με το μειονέκτημα ότι υπάρχει ανησυχία για την ρύπανση του περιβάλλοντος. Ενώ στο LTS χρησιμοποιούνται καταλύτες με βάση το Cu-Zn.

Η στήλη PSA (Pressure Swing Adsorption) είναι συχνά χρησιμοποιούμενη και απαραίτητη σε ένα σύστημα παραγωγής υδρογόνου αφού συμβάλει στον διαχωρισμό αλλά και τον καθαρισμό του μίγματος αερίου. Βέβαια, πρέπει να τονιστεί πως για να είναι αποτελεσματική η στήλη θα πρέπει να γνωρίζουμε τις συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας στα στάδια πριν την PSA. Επίσης, είναι μια διαδικασία αξιόπιστη και έχει μεγάλη οικονομική απόδοση. Ένα σύστημα CPSA σχεδιάστηκε συνδυάζοντας τέσσερις κλίνες προσρόφησης που λειτουργούν ταυτόχρονα σε διαφορετικές διαδικασίες στην στήλη PSA. Για να γίνει η προσρόφηση CO και CO<sub>2</sub> σε μείγματα H<sub>2</sub>/CO/CO<sub>2</sub> έγινε επιλογή του συστήματος συμπαγούς συμπίεσης ταλάντευσης πίεσης, CPSA ώστε να δημιουργηθεί παραγωγή καθαρού υδρογόνου για χρήση σε κυψέλες καυσίμου. Οι κυψέλες καυσίμου λειτουργούν ως πηγή ενέργειας για το μέλλον διότι έχουν ένα πάρα πολύ σημαντικό πλεονέκτημα, δεν προκαλούν ατμοσφαιρικούς ρύπους.

Στη συνέχεια της ενότητας παρουσιάζεται μια εκτενής περιγραφή της λειτουργίας μιας κυψέλης καυσίμου, που ως βάση της έχει την χημική αντίδραση του υδρογόνου με το οξυγόνο για την παραγωγή νερού και φυσικά μια απαραίτητη αναφορά στον ηλεκτρολύτη, το πιο σημαντικό στοιχείο της κυψέλης καθώς λειτουργεί ως δίοδος των ιόντων στο εσωτερικό του. Φυσικά, όπως είναι γνωστό η τεχνολογία των κυψελών καυσίμου τοποθετήθηκε στον κινητήρα των αυτοκινήτων ώστε να επιτευχθεί κίνηση στους τροχούς. Με την δημιουργία κυψελών καυσίμου υπάρχει η δυνατότητα να παραχθεί ηλεκτρική ενέργεια κατευθείαν από το καύσιμο σε πολύ μεγάλο ποσοστό απόδοσης. Επίσης, είναι μια εύχρηστη τεχνολογία εφόσον καταλαμβάνει μικρό όγκο και γι' αυτό χρησιμοποιείται σε οχήματα. Ο καταλύτης σε μια κυψέλη καυσίμου βοηθάει να οξειδωθεί το υδρογόνο και συνήθως είναι πλατίνα Pt, ωστόσο αυτός ο καταλύτης αυξάνει αρκετά το κόστος αυτής της τεχνολογίας. Ανάλογα με την θερμοκρασία που λειτουργεί κάθε κυψέλη, επιλέγεται και ο κατάλληλος ηλεκτροκαταλύτης. Αν ως υποστήριγμα χρησιμοποιηθεί άνθρακας, τότε γίνεται εφικτό η χρήση διάφορων καταλυτών μαζί με σκοπό να πετύχουν πιο υψηλούς ρυθμούς ηλεκτροχημικής αντίδρασης. Αναμενόμενο με όλες τις τεχνολογίες είναι και κάποια προβλήματα που μπορεί να προκύψουν έτσι κι εδώ με το πιο σημαντικό να είναι το μη αναπτυσσόμενο δίκτυο για την μεταφορά του υδρογόνου. Για τον λόγο ότι οι κυψέλες καυσίμου είναι μια καινούρια τεχνολογία, το κόστος της θα είναι αρκετό υψηλό μέχρι να γίνει μαζική παραγωγή.

### **Κεφάλαιο 6<sup>ο</sup>:**

Στο έβδομο κεφάλαιο αναφέρουμε ένα μείζον θέμα που αφορά όλον τον πλανήτη και είναι ο λόγος για τον οποίο η επιστήμη στρέφεται σε πιο φιλικά για το περιβάλλον καύσιμα, οι ρύποι. Ως "απόβλητο" μιας τέτοιας διεργασίας είναι ο άνθρακας και συγκεκριμένα το διοξείδιο του άνθρακα, βασικό θερμοκηπιακό αέριο. Στην εργασία μας έγινε μελέτη του, πηγές εκπομπών του αλλά και

δέσμευση-αξιοποίηση του μετά την καύση. Αναλύονται αρκετοί τρόποι δέσμευσης διοξειδίου του άνθρακα όπως είναι για παράδειγμα η δέσμευση του σε αναπνευστικές συσκευές με νατράσβεστο, δέσμευση με διαλύτες, προσρόφηση σε CaO κτλπ. Όσον αφορά την αξιοποίηση του διοξειδίου του άνθρακα, μπορεί να λάβει χώρα σε βιομηχανία τροφίμων, χημική βιομηχανία αλλά και για παραγωγή συνθετικών πολυμερών και καυσίμων κ.α.

#### ***Κεφάλαιο 7<sup>ο</sup>:***

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται προσπάθεια να αναλυθεί το νομοθετικό πλαίσιο καθώς ήταν δύσκολη η καταγραφή του παρά την εκτεταμένη έρευνα χωρίς να υπάρχουν πολλές πηγές ώστε να γίνει διατύπωση των νόμων που ισχύουν. Ωστόσο, παρατίθενται οι νόμοι από την ρυθμιστική αρχή ενέργειας (ΡΑΕ) για το δίκτυο διανομής φυσικού αερίου.

#### ***Κεφάλαιο 8<sup>ο</sup>:***

Στο τελευταίο κεφάλαιο, προβαίνουμε σε κάποια συμπεράσματα που αφορούν την μονάδα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και αν αυτή τελικά είναι βιώσιμη και μπορεί αν χρησιμοποιηθεί σε βιομηχανική κλίμακα. Μέχρι σήμερα όμως μπορεί να χρησιμοποιηθεί μέχρι και σε μικρούς σταθμούς παραγωγής ισχύος. Επιπλέον, γίνεται ξεκάθαρα αντιληπτό ότι ένα τέτοιο σύστημα δεν έχει παρά μόνο καλό αντίκτυπο στο περιβάλλον.



## 2. Βασικές αρχές φυσικού αερίου

### 2.1. Ιστορικά στοιχεία

Είναι γεγονός ότι υπήρχε ένα μυστήριο για το τι ακριβώς ήταν το φυσικό αέριο. Το φυσικό αέριο, λόγω του ότι είναι πολύ ελαφρύ, είχε την ιδιότητα να διαφεύγει από τον εξωτερικό φλοιό της γης ή να εγκλωβίζεται στα πετρώματα, δηλαδή στους πορώδεις σχιστόλιθους. Εξαιτίας όμως της διαρροής του σε κάποια σημεία του εδάφους και σε συνεργασία με τις καιρικές συνθήκες που επικρατούσαν, ιδιαίτερα αστραπές και κεραυνοί, ζεσπούσαν σε κάποια σημεία εστίες φωτιάς. Αυτή η ανάφλεξη του φυσικού αερίου έδωσε την αφορμή σε αρχέγονους πολιτισμούς όπως της Κίνας και της Περσίας όπου μεταξύ του 6000 π.Χ. και του 2000 π.Χ. ήταν οι πρώτοι από τους πολιτισμούς που έκαναν χρήση του φυσικού αερίου. Πολλές φορές μάλιστα αυτές οι φωτιές δημιουργούσαν διάφορες ιστορίες και μύθους. Περίπου το 1000 π.Χ. μία τέτοια ιστορία υπήρξε και στην Ελλάδα, στο όρος Παρνασσό, όπου βρέθηκαν τέτοιου τύπου “φωτιές” και αργότερα κατασκευάστηκε ένας ναός ο οποίος είναι γνωστός μέχρι και σήμερα ως το «Μαντείο των Δελφών». Αργότερα, προς τα τέλη του 1990 ανακαλύφθηκε ότι ο ναός βρισκόταν πάνω από ένα χάσμα από το οποίο ανέβαιναν αναθυμιάσεις αιθανίου, μεθανίου και αιθυλενίου. Είναι πλέον γνωστό ότι τα αέρια αυτά, προκαλούν κάποιου είδους παραισθήσεις και οράματα σε όποιον τα εισπνεύσει.

Είναι σημαντικό να τονιστεί ότι οι πρωτόγονοι πολιτισμοί στα σημεία που παρατηρούσαν την έκλυση του αερίου έστηναν συστήματα συλλογής και μετέφεραν το φυσικό αέριο μέσω αγωγών κατασκευασμένων από μπαμπού. Στη συνέχεια, χρησιμοποιώντας το φυσικό αέριο έβραζαν το θαλασσινό νερό ώστε να το μετατρέψουν σε πόσιμο διαχωρίζοντας το από το αλάτι. Η πρώτη χώρα στην Ευρώπη που ανακάλυψε το φυσικό αέριο ήταν η Αγγλία στα μέσα του 17ου αιώνα και αξιοσημείωτο είναι ότι τη δεκαετία του 1820 (19ος αιώνας) στην άλλη άκρη της γης, στην πόλη Fredonia της Αμερικής ο φωτισμός της γινόταν με την χρήση του φυσικού αερίου. Στα τέλη του ίδιου αιώνα δεν υπήρχαν έργα και υποδομές που να υποστήριζαν την μεταφορά του φυσικού αερίου σε μακρινές αποστάσεις με αποτέλεσμα η αποκλειστική του χρήση να είναι για φωτισμό.

Με τον ερχομό όμως του ηλεκτρικού ρεύματος σταμάτησε να χρησιμοποιείται το φυσικό αέριο για φωτισμό. Το 1885 ο Robert Bunsen σκέφτηκε και δημιούργησε αυτό που είναι σήμερα γνωστό ως λύχνος Bunsen (Εικόνα 2-1).



*Εικόνα 2-1. Λύχνος Bunsen. (Βικιπαίδεια)*

Κατασκεύασε μία συσκευή μέσα στην οποία έκανε ανάμιξη του φυσικού αερίου με τον αέρα με κατάλληλες δοσολογίες, δημιουργώντας έτσι μια φλόγα η οποία είναι εφικτό να χρησιμοποιηθεί για το μαγείρεμα αλλά και σε ένα εργαστήριο για την καύση, την αποστείρωση και σαφώς για τη θέρμανση. Η βαλβίδα καθορίζει την ποσότητα του αέρα ο οποίος επηρεάζει την καύση. Πιο συγκεκριμένα, μεγάλη ροή αέρα συνεπάγεται πλήρη καύση και θερμότερη αντίδραση ενώ μικρότερη ροή αέρα, ατελής και ψυχρότερη αντίδραση.

Η εφεύρεση του λύχνου Bunsen έδωσε πολλές καινούριες δυνατότητες για τη χρήση του φυσικού αερίου στην Αμερική και φυσικά σε όλο τον κόσμο. Το 1920 αναπτύχθηκε η μέθοδος μεταφοράς του φυσικού αερίου ενώ μετά τον Β΄ Παγκόσμιο Πόλεμο ακολούθησε αυξητική κατανάλωση του καθώς πλέον είχε γίνει αξιόπιστη και ασφαλής η μεταφορά του όπου και στις μέρες μας συνεχίζεται έτσι.

Όσον αφορά τη χώρα μας πριν το φυσικό αέριο υπήρξε το φωταέριο. Για πρώτη φορά στην Αθήνα ένα εργοστάσιο παρήγαγε φωταέριο όπου η παραγωγή διήρκησε έως και το 1985. Το 1979 αποτέλεσε έτος αφετηρία για να προμηθευτεί το φυσικό αέριο από τη Ρωσία μετά από συνάντηση των πρωθυπουργών Ρωσίας και Ελλάδας, ενώ το 1983 οργανώνεται η πρώτη μελέτη για το φυσικό αέριο, στην Ελλάδα από τη Δημόσια Επιχείρηση Πετρελαίου (ΔΕΠ). Στην συνέχεια, το 1987 η διακρατική συμφωνία μεταξύ Ελλάδας και Ρωσίας για να εξοπλιστεί η Ελλάδα με ρωσικό φυσικό αέριο. Υπογράφεται διακρατική συμφωνία μεταξύ Ελλάδας και Αλγερίας το 1988 για να εφοδιαστεί η χώρα μας με υδροποιημένο φυσικό αέριο. Τον Σεπτέμβριο του 1988 ιδρύεται η Δημόσια Επιχείρηση Αερίου (ΔΕΠΑ).

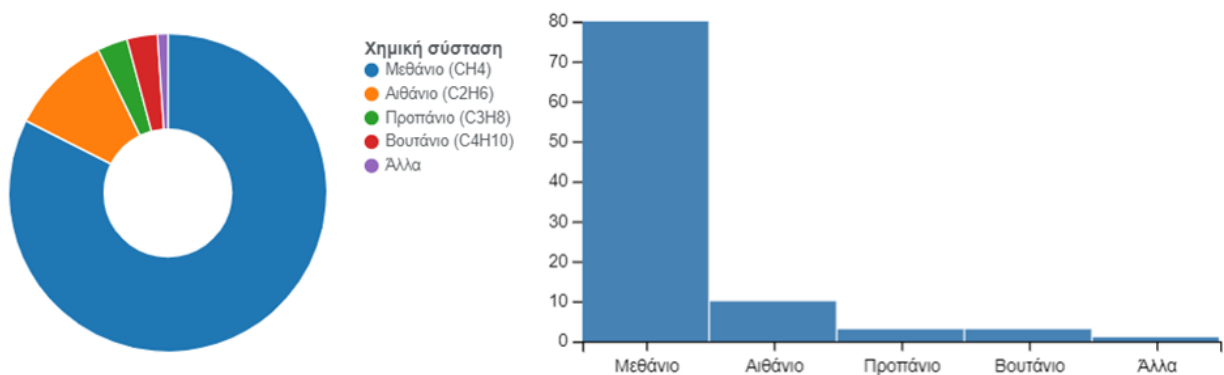
Το 1990 υπογράφεται η πρώτη συμφωνία για να κατασκευαστεί ο αγωγός μεταφοράς του φυσικού αερίου με μήκος 512 km που θα αρχίζει από τα ελληνοβουλγαρικά σύνορα και θα τελειώνει στην Αττική. Το 1992 αρχίζουν τα έργα κατασκευής του κεντρικού αγωγού του Εθνικού συστήματος για να μεταφέρεται το φυσικό αέριο.

Το 2000 αρχίζει η λειτουργία του σταθμού ΥΦΑ στη νήσο Ρεβυθούσα και υπογράφεται 3 χρόνια μετά, η πρώτη διακρατική συμφωνία για τον εφοδιασμό της χώρας μας με φυσικό αέριο ανάμεσα στην Ελλάδα και στην Τουρκία. Το 2005 από τη Βουλή των Ελλήνων ψηφίστηκε ο Ν.

3428/2005 για την απελευθέρωση της αγοράς φυσικού αερίου και μετά από δύο χρόνια αρχίζει η λειτουργία του ελληνοτουρκικού αγωγού. Λίγο αργότερα, το 2011 ψηφίζεται ο Ν. 4001/2011 περί λειτουργίας Ενεργειακών Αγορών Ηλεκτρισμού και Φυσικού Αερίου, για παραγωγή, έρευνα και δίκτυα μεταφοράς υδρογονανθράκων, ενώ το 2015 ψηφίζεται ο Ν. 4336/2015 ο οποίος απαιτούσε να διαχωριστούν οι Εταιρίες Παροχής Αερίου σε κλάδους Προμήθειας και Διανομής. Τέλος, το 2018 κάθε πολίτης έχει την ελευθερία να αγοράζει και να καταναλώνει το φυσικό αέριο.

## 2.2. Σύσταση και ιδιότητες φυσικού αερίου

Το φυσικό αέριο είναι ένα αέριο μείγμα κορεσμένων υδρογονανθράκων με μικρό αριθμό ατόμων άνθρακα. Κύρια συστατικά του φυσικού αερίου είναι το μεθάνιο, υπάρχουν όμως και αρκετές ποσότητες αιθάνιου, προπανίου και βουτανίου, καθώς και διοξείδιο του άνθρακα, άζωτο, υδρογόνο, ήλιο και υδρόθειο.



Εικόνα 2-2. Χημική σύσταση φυσικού. Αερίου. (Φυσικό αέριο, 2018)

Το φυσικό αέριο είναι ελαφρύ, άχρωμο, άορατο, άοσμο και μη τοξικό. Η χαρακτηριστική του οσμή δίνεται μόνο τεχνητά ώστε να γίνεται αντιληπτό σε τυχόν διαρροές. Ανήκει στη δεύτερη οικογένεια των αέριων καυσίμων. Είναι ελαφρύτερο από τον αέρα, πράγμα που σημαίνει ότι σε περίπτωση διαφυγής, φτάνει σε μεγάλο ύψος, αραιώνεται και καθίσταται μη επικίνδυνο. Κάθε υπόγεια πηγή φυσικού αερίου διαφέρει από κάποια άλλη ως προς τη σύσταση του αερίου με κάποια άλλη, αφού η σύνθεση του εξαρτάται από την προέλευση και το είδος της οργανικής ύλης από την οποία σχηματίστηκε.

Έχει πολύ καλές αντικρουστικές ιδιότητες, κατά συνέπεια είναι αρκετά κατάλληλο για κινητήρες υψηλής σχέσης συμπίεσης, η αυτανάφλεξη του όμως είναι πρακτικά αδύνατη. Για αυτό τον λόγο χρησιμοποιείται σε κινητήρες diesel ή μόνο του, οπότε ο κινητήρας εξοπλίζεται και με σύστημα έναυσης με σπινθηριστή σε κάθε κύλινδρο, είτε σε συνδυασμό με λίγη ποσότητα πετρελαίου diesel, που αυταναφλέγεται πρώτο στο κύλινδρο.

Εκτός απ' αυτό το Φυσικό Αέριο διαθέτει κι άλλες φυσικές ιδιότητες:

Χαμηλή σχετική πυκνότητα: 0,55

Σχετική μοριακή μάζα: 16,04 g/mol

Σημείο τήξης:  $-182,6^{\circ}\text{C}$

Ειδικό βάρος: 0,59

Σημείο βρασμού:  $-161,4^{\circ}\text{C}$

Κρίσιμη πίεση: 45,8 atm

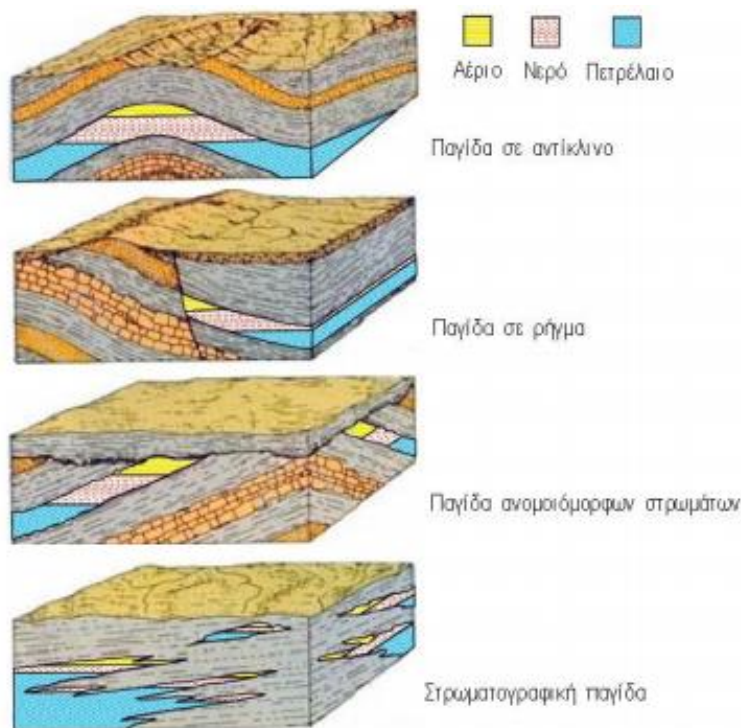
Κρίσιμη θερμοκρασία:  $-82,25^{\circ}\text{C}$

Ως κρίσιμη θερμοκρασία ορίζεται η θερμοκρασία εκείνη, πάνω από την οποία ένα αέριο δεν μπορεί να υγροποιηθεί ακόμα και αν εφαρμοστεί σ' αυτό υψηλή πίεση.

Κάθε υπόγεια πηγή φυσικού αερίου διαφέρει από κάποια άλλη ως προς τη σύσταση του αερίου με κάποια άλλη, αφού η σύνθεση του εξαρτάται από την προέλευση και το είδος της οργανικής ύλης από την οποία σχηματίστηκε.

### 2.3. Σχηματισμός Φυσικού Αερίου

Ο σχηματισμός του φυσικού αερίου είναι ίδιος με αυτόν του πετρελαίου με τον πρώτο να αρχίζει να δημιουργείται πριν από εκατομμύρια χρόνια. Το μεθάνιο σχηματίζεται κατά τη βακτηριακή αποσύνθεση της οργανικής ύλης, όπως συμβαίνει στους σύγχρονους χώρους υγειονομικής ταφής των απορριμμάτων. Η βασικότερη διεργασία σχηματισμού του είναι ο διαχωρισμός του από το πετρέλαιο. Καθώς το πετρέλαιο θερμάνθηκε σε υψηλές θερμοκρασίες μέσα στο φλοιό της γης, μερικά από τα μακρομόρια του διασπάστηκαν, δημιουργώντας μεθάνιο και άλλους ελαφρούς υδρογονάνθρακες (θερμογενές μεθάνιο). Αρκετά χιλιόμετρα μέσα στο υπέδαφος επικρατούν συνθήκες υψηλής πίεσης και θερμοκρασίας ιδανικές για τον σχηματισμό του φυσικού αερίου από τη θερμική αποικοδόμηση της πρωταρχικής οργανικής ύλης μεγάλου μοριακού βάρους η οποία δημιουργείται από οργανικά ιζήματα (χερσαία ή θαλάσσια). Από το μεθάνιο που παράγεται δημιουργούνται κοιτάσματα, στα οποία τις περισσότερες φορές παγιδεύεται και πετρέλαιο, παγιδευμένα σε γεωλογικούς σχηματισμούς που είναι αδιαπέραστοι. Το μεθάνιο που παράγεται παγιδεύεται δημιουργώντας κοιτάσματα σε αδιαπέραστους γεωλογικούς σχηματισμούς, στη βάση των οποίων συνήθως παγιδεύεται και πετρέλαιο. Όσο πιο βαθιά βρισκόταν το πετρέλαιο, τόσο πιο μεγάλος ήταν ο ρυθμός διάσπασης άρα και παραγωγής μεθανίου λόγω των υψηλότερων θερμοκρασιών. Δηλαδή, σε αρκετά μεγάλα βάθη όλοι οι υδρογονάνθρακες έχουν διασπαστεί σε αέρια και εκεί βρίσκεται κυρίως μόνο φυσικό αέριο. Με αυτόν τον τρόπο τα έχουν σχηματιστεί μεγαλύτερα και πιο εμπορεύσιμα κοιτάσματα φυσικού αερίου.



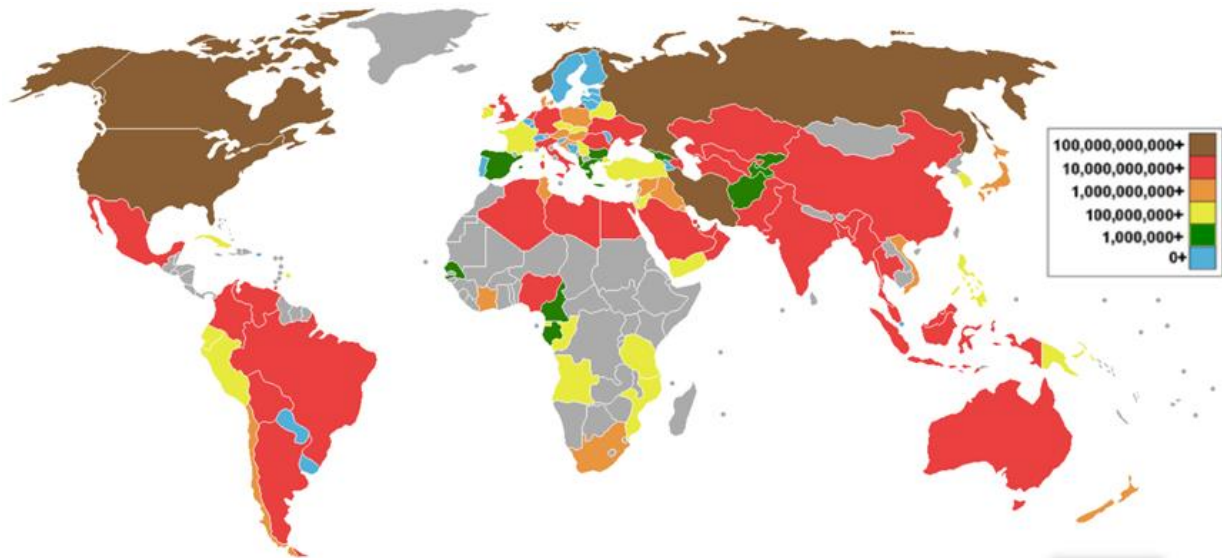
Εικόνα 2-3. Γεωλογικοί σχηματισμοί όπου βρίσκεται πετρέλαιο μαζί με φυσικό αέριο και νερό.  
(ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ & ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΩΝ ΔΙΑΘΕΣΙΜΩΝ, n.d.)

Κατά τη διάρκεια του σχηματισμού των γαιανθράκων, η αυξανόμενη συμπύκνωση δακτυλίων ατόμων άνθρακα σε μεγαλύτερα συστήματα δακτυλίων μπορεί να συνοδευτεί με την απόσπαση μεμονωμένων ατόμων άνθρακα με τη μορφή του μεθανίου. Υπάρχει αυξανόμενο ενδιαφέρον για το εγκλωβισμένο μεθάνιο σε κοιτάσματα άνθρακα ως μια νέα πηγή μεθανίου. Το φυσικό αυτό αέριο ονομάζεται μεθάνιο από κλίνες άνθρακα (coalbed methane). Είναι αντιληπτό ότι τέτοια κοιτάσματα δεν πρέπει να χαραμίζονται αλλά να εκμεταλλεύονται λόγω της λειτουργίας τους ως εναλλακτική πηγή μεθανίου. Ακόμη, με αυτόν τον τρόπο μειώνεται ο κίνδυνος ανάφλεξης κάποιας ποσότητας μεθανίου που μπορεί να βρίσκεται στις υπόγειες στοές.

Στη συνέχεια θα ασχοληθούμε με κάποιους ορισμούς που αφορούν το φυσικό αέριο. Αρχικά, ως συνδεδεμένο φυσικό αέριο (associated gas) εννοούμε τη συνύπαρξη του φυσικού αερίου μαζί με το πετρέλαιο τα οποία βρίσκονται μέσα στο φλοιό της γης, ενώ ως μη συνδεδεμένο αέριο (non-associated gas) είναι αυτό που έχει την δυνατότητα να απομακρυνθεί από το πετρέλαιο και να παγιδευτεί μόνο του κάτω από ένα αδιαπέραστο πέτρωμα σε ένα άλλο ανεξάρτητο θύλακα. Ο ορισμός διαλυμένο φυσικό αέριο (dissolved gas) αναφέρεται στην ικανότητα του φυσικού αερίου να διαλύεται μέσα στο πετρέλαιο σε πολύ υψηλές πιέσεις. Συμπεραίνουμε λοιπόν, ότι το συγκεκριμένο αέριο μπορεί να απελευθερωθεί τη στιγμή που το πετρέλαιο έρχεται στην επιφάνεια. Επίσης όταν μιλάμε για φυσικό αέριο από θύλακα αερίου (gas cap gas), πρόκειται για ένα θύλακα φυσικού αερίου, που βρίσκεται πάνω από έναν ταμιευτήρα πετρελαίου ως μια γιγαντιαία φουσαλίδα.

## 2.4. Εξαγωγή και μεταφορά

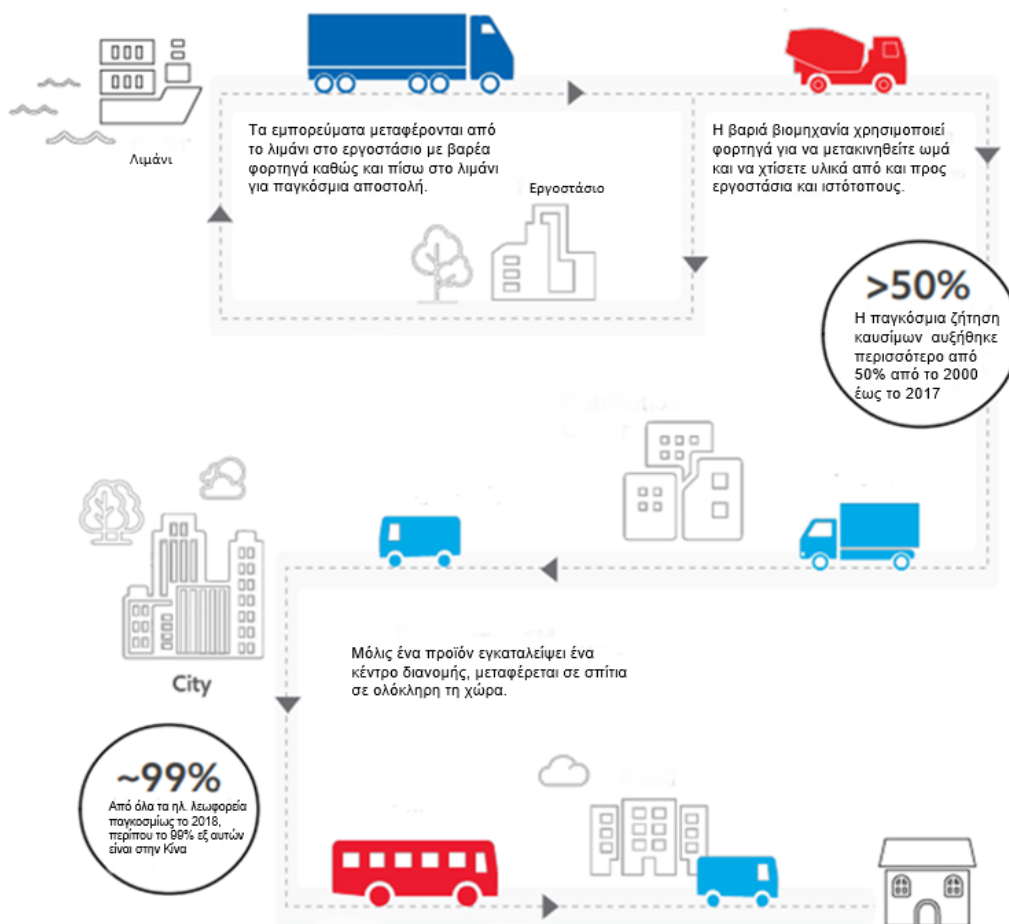
Για την χημική βιομηχανία ως πρώτη ύλη χρησιμοποιείται το φυσικό αέριο που εξορύσσεται από υπόγειες κοιλότητες όπου μέσα επικρατεί αρκετά υψηλή πίεση. Ο τρόπος σχηματισμού του φυσικού αερίου στις κοιλότητες είναι περίπου ίδιος με αυτόν του πετρελαίου. Στην έξοδο της γεώτρησης, παρατηρούνται παραλλαγές του φυσικού αερίου που αφορούν τα συστατικά και την συγκέντρωσή τους. Σημαντικό ρόλο σε αυτό παίζουν τα μοναδικά χαρακτηριστικά του κάθε ταμιευτήρα. Μεταφέρεται προς τις περιοχές όπου πρόκειται να χρησιμοποιηθεί όπως είναι, χωρίς να χρειαστεί κάποια παραπάνω επεξεργασία.



Εικόνα 2-4. Χώρες με παραγωγή Φυσικού Αερίου. (Φυσικό Αέριο)

Οι χώρες με τη μεγαλύτερη παραγωγή φυσικού αερίου (με καφέ χρώμα οι χώρες με τη μεγαλύτερη παραγωγή, ακολουθούν αυτές που σημειώνονται με κόκκινο χρώμα)

Τα κοιτάσματα φυσικού αερίου λαμβάνουν χώρα κυρίως μακριά από τα βασικά κέντρα καταναλώσεως επομένως χρειάζεται να μεταφερθούν. Ωστόσο, οι βιομηχανίες όπου γίνεται η χημική επεξεργασία είναι συνήθως εγκατεστημένες στην περιοχή που παράγεται. Η μεταφορά του φυσικού αερίου εξαρτάται από την κατάστασή του, πράγμα που σημαίνει ότι όταν βρίσκεται σε αέρια κατάσταση μεταφέρεται μέσω αγωγών με υψηλή πίεση, ενώ σε υγρή κατάσταση μεταφέρεται μέσω πλοίων.



Εικόνα 2-5. Μεταφορά υγρού φυσικού αερίου. (Outlook for energy: A perspective to 2014, 2019)

Για την εύκολη μεταφορά του φυσικού αερίου σε μεγάλες αποστάσεις (χιλιάδων χιλιομέτρων) γίνεται η χρήση μεγάλων αγωγών με υψηλή πίεση. Για παράδειγμα, τέτοιοι αγωγοί είναι οι αγωγοί της Βόρειας Αμερικής, που εκτείνονται από το Τέξας και τη Λουιζιάνα μέχρι τη βορειοανατολική ακτή και από την Αλμπέρτα ως τον Ατλαντικό, όπως και αγωγοί που εκτείνονται από τη Σιβηρία μέχρι την Κεντρική και Δυτική Ευρώπη. Καθώς γινόντουσαν έρευνες για εύρεση πετρελαίου, τελικά αποκαλύφθηκε η ύπαρξη κοιτασμάτων φυσικού αερίου στις περιοχές της Αφρικής, Μέσης Ανατολής, Αλάσκας, Αυστραλίας και αλλού. Η μεταφορά από τέτοιες παραθαλάσσιες περιοχές γίνεται με πλοία. Το αέριο υγροποιείται σε πολλή μικρή θερμοκρασία περίπου στους  $-160^{\circ}\text{C}$  και μεταφέρεται, όπως το πετρέλαιο, με δεξαμενόπλοια ειδικά κατασκευασμένα για αυτόν τον σκοπό (Υγραεριοφόρα πλοία - LNG Carrier). Γενικότερα, η υγροποίηση φυσικού αερίου και η θαλάσσια μεταφορά του είναι πιο φθηνή διαδικασία από τη μεταφορά φυσικού αερίου σε υπεράκτιους αγωγούς για αποστάσεις άνω των 700 μιλίων ή για χερσαίους αγωγούς στην ξηρά για αποστάσεις μεγαλύτερες από 2.200 μίλια. Ένα κυβικό μέτρο υγρού φυσικού αερίου αντιστοιχεί σε  $600 \text{ m}^3$  αερίου σε ατμοσφαιρική πίεση. Η Ελλάδα προμηθεύεται φυσικό αέριο από την Ρωσία και την Αλγερία.

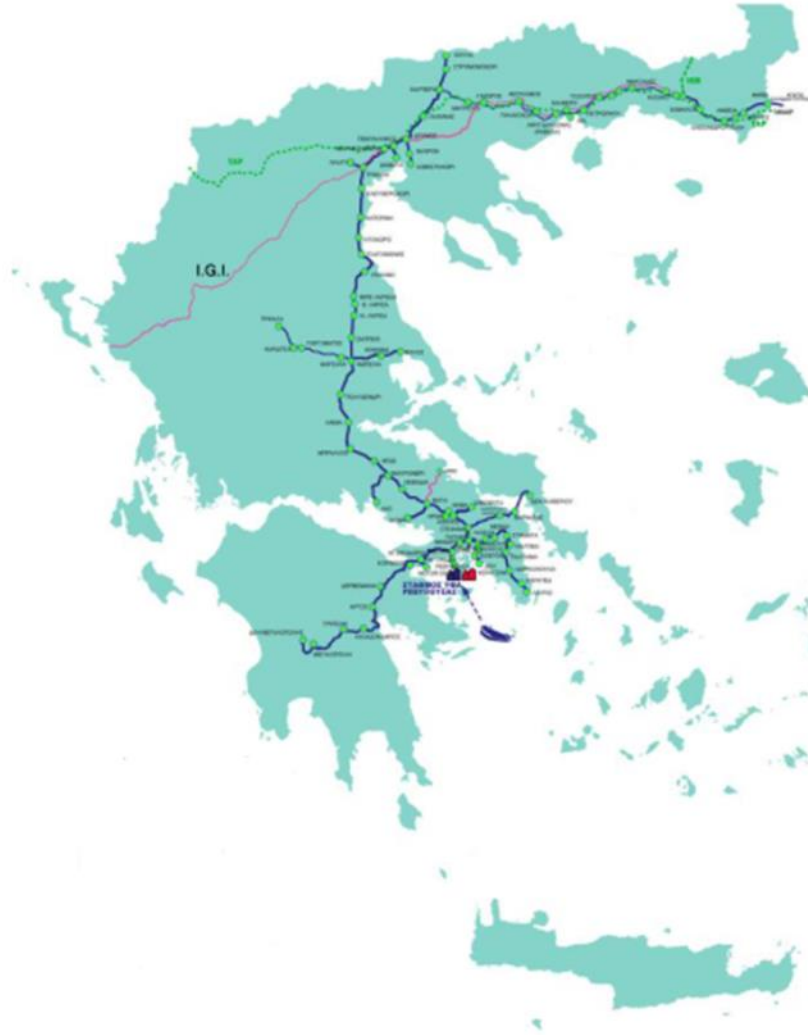


*Εικόνα 2-6. Ο αγωγός TAP, μήκους περίπου 878 χλμ., συνδέεται με τον αγωγό Trans Anatolian Pipeline (TANAP) στους Κήπους στα ελληνοτουρκικά σύνορα. (Πρεμιέρα για τον αγωγό TAP που φέρνει το αζέρικο αέριο στην Ελλάδα, 2021)*

Το Εθνικό Σύστημα Μεταφοράς Φυσικού Αερίου Αποτελείται από:

- Τον κεντρικό αγωγό μεταφοράς αερίου και τους κλάδους αυτού.
- Τους Μετρητικούς Σταθμούς Συνόρων Σιδηροκάστρου Σερρών και Κήπων Έβρου.
- Το Σταθμό Συμπίεσης στη Νέα Μεσήμβρια Θεσσαλονίκης.
- Τους Μετρητικούς και Ρυθμιστικούς σταθμούς φυσικού αερίου.
- Τα Κέντρα Ελέγχου και Κατανομής Φορτίου.
- Τα Κέντρα Λειτουργίας και Συντήρησης του Μετρητικού Σταθμού Συνόρων Σιδηροκάστρου, Ανατολικής Ελλάδος, Βορείου Ελλάδος, Κεντρικής Ελλάδος και Νοτίου Ελλάδος.
- Το σύστημα Τηλελέγχου και Τηλεπικοινωνιών.





Εικόνα 2-7. Εθνικό Σύστημα Αγωγών Φυσικού Αερίου. (Το Εθνικό Σύστημα Φυσικού Αερίου και ο ρόλος του ΔΕΣΦΑ ως Διαχειριστή, 2018)

## 2.5. Περιφέρεια Δυτικής Μακεδονίας

Έγινε έγκριση για να χρηματοδοτηθεί η κατασκευή του δικτύου μεταφοράς και διανομής φυσικού αερίου για Καστοριά, Μανιάκους, Άργος Ορεστικό και Γρεβενά, με συνολικό προϋπολογισμού 22,8 εκ. ευρώ από το Επιχειρησιακό Πρόγραμμα Περιφέρειας Δυτικής Μακεδονίας του ΕΣΠΑ 2014-2020.

Το έργο σχετίζεται με την κατασκευή νέου δικτύου διανομής φυσικού αερίου στην Περιφέρεια Δυτικής Μακεδονίας και ειδικότερα στις Περιφερειακές Ενότητες Καστοριάς και Γρεβενών, ώστε να ικανοποιηθούν ανάγκες που αφορούν την θέρμανση και τον ηλεκτρισμό στα δημόσια κτήρια (Νοσοκομεία και Μονάδες Υγείας, σχολεία και λοιπές εγκαταστάσεις), στα εμπορικά, στους βιομηχανικούς καταναλωτές, καθώς και στους οικιακούς καταναλωτές, σε Καστοριά, Μανιάκους, Άργος Ορεστικό και Γρεβενά, με στόχο να ανεξαρτητοποιηθεί η Περιφέρεια από το πετρέλαιο, με

τη διείσδυση του φυσικού αερίου μέσω της αξιοποίησης της διέλευσης του Διαδριατικού Αγωγού Φυσικού Αερίου (TAP) από τη Δυτική Μακεδονία.

Κατά την εκτέλεση του έργου εκτιμάται η κατασκευή δικτύου μήκους περίπου 153 χιλιομέτρων και 4 σταθμών Μέτρησης και Ρύθμισης πίεσης, η απαίτηση προμήθειας των αναπόσπαστων υλικών, καθώς και αρχαιολογική επίβλεψη σε σημεία και περιοχές που θα υποδείξουν οι κατά τόπους Εφορείες Αρχαιοτήτων.

Η τροφοδότηση των δικτύων διανομής θα πραγματοποιηθεί από τον αγωγό TAP μέσω εξόδου που θα κατασκευαστεί στην Πορεία και έπειτα θα κατασκευαστεί το δίκτυο Μέσης Πίεσης που θα τροφοδοτήσει τις πόλεις της Καστοριάς, των Μανιάκων και του Άργους Ορεστικού.



*Εικόνα 2-8. Τοποθέτηση αγωγών φυσικού αερίου στη Δυτική Μακεδονία. (Νέους αγωγούς αερίου για τη Δυτική Μακεδονία και την Πάτρα μελετάει ο ΔΕΣΦΑ – Ετοιμάζει το νέο 10ετές αναπτυξιακό πρόγραμμα έργων, 2020)*

## 2.6. Καύση φυσικού αερίου

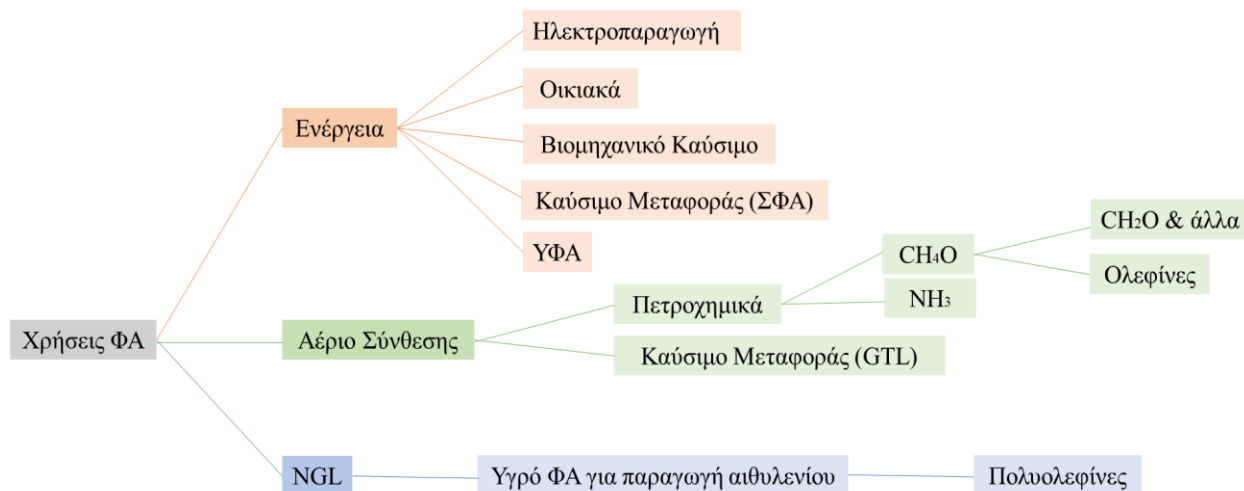
Η καύση του φυσικού αερίου, σε αντίθεση με άλλων καυσίμων (π.χ. γαιάνθρακας, πετρέλαιο), έχει λιγότερο επιβλαβείς συνέπειες για το περιβάλλον. Παράγει, δηλαδή, μικρότερες ποσότητες CO<sub>2</sub> για κάθε μονάδα παραγόμενης ενέργειας. Από όλες τις πλευρές το φυσικό αέριο είναι ένα άριστο καύσιμο. Έχει την πιο υψηλή θερμογόνο δύναμη από όλα τα ορυκτά καύσιμα. Δεν είναι δύσκολο να ελέγξουμε την παραγόμενη ενέργεια από την καύση, επειδή οι καυστήρες φυσικού αερίου είναι εφικτό να ξεκινάνε και να σταματάνε άμεσα. Το φυσικό αέριο είναι απολύτως καθαρό, δεν παράγει τέφρα (εκπομπές σωματιδίων) και δεν απαιτεί αποθηκευτικούς χώρους. Δεν χρειάζεται περαιτέρω διεργασίες για τις λήψεις καυσίμου εφόσον υπάρχει έτοιμο για χρήση καύσιμο αμέσως μόλις ανοιχτεί μια βάνα. Η καύση του φυσικού αερίου σαφώς εξαρτάται από τη

δυνατότητα των ελευθέρων ριζών όπως είναι η μεθυλική ρίζα CH, που σχηματίστηκαν εξαιτίας της αρκετά υψηλής θερμοκρασίας και της προσβολής από τα ενεργά συστατικά, να συμμετέχουν σε διάφορες αλυσιδωτές αντιδράσεις. Αρχικά, το CH<sub>4</sub> αντιδρά με τον άνθρακα για το σχηματισμό φορμαλδεΐδης (HCHO). Η φορμαλδεΐδη αντιδρά προς μια φορμολική ρίζα (HCO), η οποία δίνει μονοξείδιο του άνθρακα. Μέσω τέτοιων σταδίων καταναλώνονται τα αντιδρώντα συστατικά και δίνουν H<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O και CO.



## 2.7. Αξιοποίηση του Φυσικού Αερίου

Το φυσικό αέριο έχει μια σχετικά απλή και σχεδόν σταθερή χημική σύσταση, υψηλή θερμογόνο δύναμη και χρειάζεται κάποια προετοιμασία πριν από την χρήση του, σε αντίθεση με το πετρέλαιο και τον C. Επειδή είναι αέριο, αναμιγνύεται σχετικά εύκολα με τον αέρα για αποδοτική και πλήρη καύση. Δεν παράγει τέφρα για τον λόγο ότι δεν περιέχει στερεά συστατικά. Γενικότερα, το φυσικό αέριο έχει ποικίλες χρήσεις οι οποίες φαίνονται στο παρακάτω σχεδιάγραμμα.



Εικόνα 2-9. Διάγραμμα με τις χρήσεις του φυσικού αερίου.

Το φυσικό αέριο, εξαιτίας των συγκριτικών πλεονεκτημάτων που παρουσιάζει σε σχέση με τους γαιάνθρακες και το πετρέλαιο, έχει πολλές και με σημασία εφαρμογές. Οι βασικοί τομείς που χρησιμοποιείται το φυσικό αέριο είναι:

### 1) Ηλεκτροπαραγωγή

Στον τομέα της ηλεκτροπαραγωγής, συγκεκριμένα από τα μέσα της δεκαετίας του '90 και μετά, το φυσικό αέριο διατηρεί σημαντικό μερίδιο σε σχέση με τις υπόλοιπες εναλλακτικές επιλογές. Για την ακρίβεια, το μερίδιο των καυσίμων στην συνολική ηλεκτροπαραγωγή της Ευρώπης για το 2010 ήταν: άνθρακας 24,7%, πετρέλαιο 2,6%, φυσικό αέριο 23,6%, πυρηνικά καύσιμα 27,4%, ανανεώσιμες πηγές 20,9%, άλλα καύσιμα 0,7%. Το φυσικό αέριο είναι το καταλληλότερο καύσιμο

για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Τα βασικότερα πλεονεκτήματα του (πολλά από τα οποία ισχύουν και για τις χρήσεις του και σε άλλους τομείς) είναι κυρίως η συνεχής ροή του καυσίμου, οι ελάχιστες εκπομπές ρύπων (σε σχέση με άλλα καύσιμα, δεν εκπέμπονται καθόλου σωματιδιακοί ρύποι), η αυξημένη ενεργειακή απόδοση της μονάδας, ευχέρεια στον χειρισμό και στον έλεγχο, η αποκέντρωση της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στη χώρα και η διασπορά στις πρωτογενείς πηγές της χώρας (ή διασπορά της ενεργειακής εξάρτησης). Ωστόσο, υπάρχει ένα μειονέκτημα όσον αφορά την χρήση του φυσικού αερίου στην ηλεκτροπαραγωγή το οποίο είναι ότι το κόστος παραγωγής της είναι υψηλότερο από το αντίστοιχο κόστος χρησιμοποιώντας γαιάνθρακα. Ακόμα, αναφορικά με το διοξείδιο του άνθρακα από την καύση του φυσικού αερίου παράγονται 30% λιγότερες εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα σε σχέση με την καύση του πετρελαίου.

## 2) Συμπαγωγή ηλεκτρισμού και θερμότητας

Με το φυσικό αέριο παρέχεται η ευχέρεια συμπαγωγής ηλεκτρισμού και θερμότητας (ΣΗΘ), στις περιπτώσεις που απαιτούνται παράλληλα σημαντικές ποσότητες θερμικού φορτίου και ηλεκτρισμού. Ήδη, σε διεθνή κλίμακα, λειτουργεί μεγάλος αριθμός μονάδων ΣΗΘ. Πλεονεκτήματα των συστημάτων ΣΗΘ:

- Ελάχιστες εκπομπές ρύπων στο περιβάλλον
- Εξοικονόμηση καυσίμου
- Ενεργειακή αυτονομία
- Μεγάλος βαθμός απόδοσης

Τα ΣΗΘ διακρίνονται σε:

- Συστήματα με κυψέλες καυσίμου
- Συστήματα με μηχανές εσωτερικής καύσης
- Συστήματα με αεροστρόβιλο
- Συστήματα με αμοστρόβιλο

## 3) Βιομηχανικός τομέας

Μεγάλη σημασία για έναν ορυκτό πόρο, όπως το φυσικό αέριο, είναι η δυνατότητα σύνθεσης οργανικών ενώσεων. Στον βιομηχανικό τομέα χρησιμοποιείται το φυσικό αέριο τόσο για θερμικές χρήσεις, όσο και για την παραγωγή διάφορων προϊόντων όπως για παράδειγμα είναι το ακετυλένιο, το χλωρομεθάνιο, ο διθειάνθρακας και κυρίως, το αέριο σύνθεσης ( $\text{CO} + \text{H}_2$ ). Η μεγαλύτερη εφαρμογή του φυσικού αερίου στη χημική βιομηχανία είναι σαφώς η παραγωγή αερίου σύνθεσης. Κύρια χαρακτηριστικά του φυσικού αερίου σε αυτόν τον τομέα:

- Εύκολο στον χειρισμό και στον έλεγχο
- Συνεχόμενη παραγωγή καυσίμου

- Απομάκρυνση θερμικών χρήσεων
- Ελάχιστες εκπομπές ρύπων στο περιβάλλον
- Αυξημένη ενεργειακή απόδοση και οικονομία
- Ενίσχυση ποιότητας των προϊόντων
- Μικρό κόστος στην λειτουργία, διαχείριση και συντήρηση

#### 4) Εμπορικός τομέας

Η χρήση του φυσικού αερίου (για θέρμανση, ζεστό νερό, κτλ.) στον εμπορικό τομέα περιλαμβάνει όλες τις κατηγορίες καταναλωτών ενέργειας, όπως είναι τα καταστήματα, σχολεία, νοσοκομεία, αθλητικά και εμπορικά κέντρα, θερμοκήπια, μεταφορές κ.ά. Στα θερμοκήπια ένα ακόμα πλεονέκτημα της χρήσης του φυσικού αερίου είναι πως απελευθερώνεται στην ατμόσφαιρα CO<sub>2</sub> από τα καυσαέρια το οποίο και χρησιμοποιείται. Τα λεωφορεία που κινούνται μέσα στην πόλη, χρησιμοποιώντας φυσικό αέριο εκπέμπουν προφανώς λιγότερους ρύπους σε σχέση με τα βενζινοκίνητα ή τα ντιζελοκίνητα αυτοκίνητα. Κύρια χαρακτηριστικά του φυσικού αερίου σε αυτόν τον τομέα:

- Μεγαλώνει την διάρκεια ζωής του εξοπλισμού
- Δεν χρειάζεται μεγάλη ασχολία με τις παραγγελίες – παραλαβές καυσίμων
- Δεν απαιτείται μεγάλη συντήρηση συσκευών
- Οικονομική λύση

#### 5) Οικιακός τομέας

Σπουδαία θέση στις χρήσεις του φυσικού αερίου κατέχει παγκοσμίως ο οικιακός τομέας με θέρμανση χώρων, παραγωγή ζεστού νερού, μαγείρεμα και ψύξη. Η χρήση του για θέρμανση σε αυτόν τον τομέα και ως καύσιμο στη βιομηχανία απελευθερώνει στην ατμόσφαιρα περίπου 25-30% λιγότερο CO<sub>2</sub> από το πετρέλαιο, και 40-50% λιγότερο από το λιγνίτη. Κύρια χαρακτηριστικά του φυσικού αερίου σε αυτόν τον τομέα:

- Ασφαλή χρήση
- Διαρκή και σταθερή παροχή
- Εύκολη εγκατάσταση εξοπλισμού
- Οικονομική επιλογή και υψηλή απόδοση

#### 6) Χρησιμοποιείται για παραγωγή υδρογόνου ( $\text{CO} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO}_2 + \text{H}_2$ )

## 2.8. Πλεονεκτήματα Φυσικού Αερίου

1) *Οικονομία*: Όλα αυτά τα χρόνια συγκρίνοντας το φυσικό αέριο με τις τιμές άλλων μορφών ενέργειας όπως πετρέλαιο, ρεύμα, κλπ. φαίνεται μεγάλη διαφορά στο κόστος. Επίσης, επιτυγχάνεται μεγάλη απόδοση καύσης και μικρό κόστος συντήρησης, χωρίς πρόσθετες δαπάνες για την σταθερή λειτουργία του (δεξαμενές, αντλίες, κλπ.).

2) *Εύκολη διαχείριση*: Απευθείας γνώση της ποσότητας φυσικού αερίου που έχει καταναλωθεί, μέσω της καταγραφής του μετρητή, και πληρωμή μόνο για αυτή την ποσότητα.

3) *Πρακτικό*: Οι νέου τύπου συσκευές (επίτοιχοι λέβητες) είναι εφικτό να παρέχουν εξειδικευμένες λύσεις εγκατάστασης (όπως περιπτώσεις ανακαινίσεων, αυτονομήσεων, κλπ.), οι οποίες θα ήταν δύσκολο να πετύχουν με τη χρήση άλλων καυσίμων.

4) *Μείωση της εξάρτησης από το πετρέλαιο*: Η χρήση του φυσικού αερίου θα έχει κορυφαίες επιδράσεις στη δομή του ενεργειακού ισοζυγίου της χώρας.

5) *Εύχρηστο*: Γρήγορα διαθέσιμο σε όλους τους χώρους χρήσης, σταθερή και μόνιμη παροχή, χωρίς την ανάγκη παραγγελίας και δεξαμενής αποθήκευσης. Εύκολη εγκατάσταση εξοπλισμού με καθαριότητα και οικονομία χώρων.

6) *Τόνωση της απασχόλησης*: Η αναζήτηση της χρήσης του φυσικού αερίου στον οικιακό, εμπορικό αλλά και βιομηχανικό τομέα συμμετέχει ικανοποιητικά στην αντιμετώπιση της ανεργίας με τη δημιουργία νέων θέσεων και ειδικοτήτων στην αγορά εργασίας.

7) *Οικολογικό*: Η καύση του δημιουργεί λιγότερη ρύπανση σε σχέση με τα υπόλοιπα συμβατικά καύσιμα, συνεισφέρει ελάχιστα στο φαινόμενο του θερμοκηπίου, αφού παράγει μικρότερες ποσότητες CO<sub>2</sub> σε σχέση με το πετρέλαιο, και δεν προξενεί όξινη βροχή, καθώς δεν περιέχει καθόλου θείο. Συμβάλλει λοιπόν, στην προστασία του περιβάλλοντος, για την οποία έχουμε δεσμευτεί και διεθνώς ως χώρα. Έτσι, επιτυγχάνεται η χρήση ενός καθαρού καυσίμου, χωρίς θορύβους, οσμές, και σαφώς ρύπους.

8) *Προστασία του περιβάλλοντος*: Το φυσικό αέριο είναι η «καθαρότερη πηγή» πρωτογενούς ενέργειας, μετά τις ανανεώσιμες μορφές. Όπως έχει αναφερθεί πολλές φορές, η ποσότητα των εκπεμπόμενων ρύπων είναι προφανώς μικρότερη σε σχέση με τα συμβατικά καύσιμα. Ένα παράδειγμα είναι η χρήση του στο ιστορικό κέντρο της Αθήνας που είναι υποχρεωτική για επαγγελματίες και επιχειρήσεις αφού παρέχει οικονομική, καλής ποιότητας ζέστη, χωρίς να προκαλεί αιθαλομίχλη ή ατμοσφαιρική ρύπανση.

9) *Μεγαλύτερη διάρκεια ζωής*: Δεν υπάρχει παραγωγή τέφρας κατά την καύση του και με κατανάλωση καυσίμου και συνεπώς μειώνει την ατμοσφαιρική ρύπανση. Επιπλέον, με τη σωστή λειτουργία και συχνή συντήρηση επιτυγχάνεται μεγαλύτερη διάρκεια ζωής των συσκευών χρήσης.

10) *Ασφάλεια*: Οι Ευρωπαϊκές προδιαγραφές του Τεχνικού Κανονισμού Εσωτερικών Εγκαταστάσεων που εφαρμόζεται, εγγυώνται τα υψηλότερα επίπεδα ασφαλείας. Η χρήση του στα οχήματα συνεισφέρει στη μείωση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης, ενώ παράλληλα εξασφαλίζει

οικονομικά κέρδη στους οδηγούς. Δεν είναι τοξικό, δεν περιέχει CO, και με την καύση του δεν παράγεται CO<sub>2</sub>, το οποίο ευθύνεται για το φαινόμενο της όξινης βροχής.

Υπάρχουν όμως και μερικά μειονεκτήματα τα οποία δεν πρέπει να παραλειφθούν ώστε να υπάρξει μια ολοκληρωμένη εικόνα του φυσικού αερίου. Το φυσικό αέριο είναι μια ουσία πολύ ευέλικτη λόγω του υψηλού ποσοστού CH<sub>4</sub>. Επίσης, οι αγωγοί μεταφοράς του φυσικού αερίου πρέπει να ελέγχονται τακτικά για διαρροές. Αυτό προσθέτει στο κόστος συντήρησης των αγωγών. Επίσης, πρέπει να τονιστεί ότι η εξόρυξη και η μεταφορά πρέπει να πραγματοποιούνται με καλή διαχείριση και σε συνδυασμό με τον έλεγχο του περιβάλλοντος. Τέλος, απαιτούνται πολλές γραφειοκρατικές ενέργειες για την εξαγωγή και την μεταφορά του.

## 2.9. Πλεονεκτήματα Φυσικού Αερίου έναντι των συμβατικών υγρών καυσίμων

Η χημική σύσταση του φυσικού αερίου καθώς και η σύσταση των καυσαερίων του, προτείνουν δυο συνθήκες με μεγάλο ενδιαφέρον από την μεριά της λειτουργίας με υψηλό βαθμό απόδοσης και της εξοικονόμησης ενέργειας κυρίως στις οικιακές εφαρμογές λόγω της απουσίας προσμίξεων επιβαρυντικών για τα μέρη των συσκευών και των εγκαταστάσεων (καυστήρες, θάλαμοι καύσης κλπ.), είναι απολύτως δυνατή να διατηρηθεί σταθερός ο βαθμός απόδοσης για ιδιαίτερα μεγάλες περιόδους. Τα προϊόντα καύσης του φυσικού αερίου αποτελούνται κυρίως από νερό, αναδεικνύεται εύκολα, δυνατή η εκμετάλλευση της λανθάνουσας θερμότητας των καυσαερίων, με αποτέλεσμα την επιπλέον απόκτηση (πάνω από 20%) της ωφέλιμης θερμότητας που λαμβάνεται από δεδομένη ποσότητα καυσίμου - σημαντικό ωφέλημα για τον τελικό καταναλωτή αφού μπορεί να εξυπηρετήσει την εγκατάστασή του με ελάχιστο καύσιμο.

## 2.10. Υφιστάμενη κατάσταση στην Ελλάδα

Το φυσικό αέριο εισάγεται στη Ελλάδα από τη Ρωσία μέσω αγωγών μεταφοράς με σημείο έναρξης τα Ελληνοβουλγαρικά σύνορα και σε ποσότητα 2,4 δις. m<sup>3</sup> ετησίως μέχρι το 2016 και από την Αλγερία, σε υγροποιημένη μορφή (LNG), με συγκεκριμένο δεξαμενόπλοιο στις εγκαταστάσεις αποθήκευσης της Ρεβυθούσας. Η πιο μικρή ετήσια ποσότητα είναι 0,68 δις m<sup>3</sup>, με δυνατότητα να αυξηθεί στο μέλλον. Το υγροποιημένο φυσικό αέριο ή το LPG (Liquified Petroleum Gas) είναι ένα μίγμα υδρογονανθράκων που μπορεί να υγροποιηθεί υπό πίεση σε θερμοκρασία περιβάλλοντος. Το μίγμα αποτελείται ιδίως από προπάνιο σε ποσοστό 70-90% και από βουτάνιο σε ποσοστό 10-30%.

Ειδικό χαρακτηριστικό του υγροποιημένου φυσικού αερίου είναι ότι στην περίπτωση διαφυγής διαρρέεται στο πάτωμα σαν υγρό διότι η πυκνότητά του είναι μεγαλύτερη από αυτή του αέρα. Για αυτόν τον λόγο έχει μεγάλη επικινδυνότητα και παρουσιάζονται πληθώρα ειδικών κανόνων ασφαλείας. Η αποθήκευση του υγροποιημένου φυσικού αερίου μπορεί να γίνει είτε σε φιάλες είτε σε ειδικές, σταθερά στηριγμένες στο έδαφος, δεξαμενές όπως προαναφέρθηκε σε παραπάνω υποενότητα. Εκτός από την απ' ευθείας χρήση του στην κατανάλωση, μπορεί να βοηθήσει και στην αντιμετώπιση του προβλήματος των αιχμών του φυσικού αερίου με την πρόσμιξη του σε

αυτό. Το σύστημα του φυσικού αερίου έχει ως σκοπό την ασφαλή τροφοδοσία των μεγάλων καταναλωτικών κέντρων της χώρας και αποτελείται από: Το δίκτυο μεταφοράς του φυσικού αερίου και τον τερματικό σταθμό αποθήκευσης του υγροποιημένου (LNG) αλγερινού φυσικού αερίου στην Ρεβυθούσα. Το υγροποιημένο φυσικό αέριο επαναεριοποιείται και τροφοδοτεί το δίκτυο μεταφοράς, το σύστημα διανομής του φυσικού αερίου στους καταναλωτές.

Από τις τελευταίες ευρωπαϊκές χώρες υπήρξε η Ελλάδα στην ανάπτυξη υποδομής εισαγωγής, μεταφοράς και κατανάλωσης φυσικού αερίου. Η γεωγραφική απομόνωση της χώρας από τις υπόλοιπες χώρες του δυτικού συνασπισμού, αλλά και η έλλειψη ενδιαφέροντος των ελληνικών κυβερνήσεων συνέβαλαν στην καθυστέρηση εισαγωγής του φυσικού αερίου ως βασικής πηγής ενέργειας, τόσο για την παραγωγή ηλεκτρισμού, όσο και για βιομηχανική ή οικιακή χρήση. Κατά την δεκαετία του 1980 η ύφεση στις σχέσεις Δύσης και Ανατολής επέτρεψε την υπογραφή των πρώτων συμβάσεων για την κατασκευή των πρώτων αγωγών φυσικού αερίου μεταξύ της Σοβιετικής Ενώσεως και της Δυτικής Ευρώπης, άρχισαν να διερευνώνται τρόποι και στην Ελλάδα με τους οποίους θα μπορούσε να επιτευχθεί η προμήθεια φυσικού αερίου. Οι επιλεγμένες λύσεις ήταν η κατασκευή χερσαίου αγωγού από τα ελληνοβουλγαρικά σύνορα για τη μεταφορά σοβιετικού φυσικού αερίου, καθώς και η ανάπτυξη ειδικής υποδομής για τη μετατροπή υγροποιημένου φυσικού αερίου. Λόγω του ότι η μετατροπή υγροποιημένου φυσικού αερίου είχε αυξημένο κόστος ήταν αδύνατο να αποτελέσει τον κύριο τρόπο εισαγωγής φυσικού αερίου στην ελληνική αγορά, επισπεύσθηκε η κατασκευή χερσαίου αγωγού φυσικού αερίου, ο οποίος θα συνδέει την Ελλάδα με το υπάρχον δίκτυο διανομής σοβιετικού φυσικού αερίου στην νοτιοανατολική Ευρώπη. Τον Οκτώβριο του 1987, μετά την υπογραφή της πρώτης σχετικής διακρατικής συμφωνίας μεταξύ της Ελλάδας και της Σοβιετικής Ενώσεως και της σύμβασης μεταξύ της Δημόσιας Επιχείρησης Πετρελαίου (ΔΕΠ) και της σοβιετικής Soyuzgazexport για την προμήθεια έως 2,4 δισεκατομμυρίων  $m^3$  φυσικού αερίου ανά χρόνο όπου και ακολούθησε στη συνέχεια η κατασκευή ενός αγωγού φυσικού αερίου από τα ελληνοβουλγαρικά σύνορα, μέχρι την Αθήνα.

Το 2006 πραγματοποιήθηκε η έγκριση για την επέκταση της δυναμικότητας του τερματικού σταθμού Ρεβυθούσας από 0,7 δισεκατομμύρια  $m^3$ , υγροποιημένου φυσικού αερίου ανά έτος σε 5,3 δισεκατομμύρια  $m^3$  υγροποιημένου φυσικού αερίου ανά έτος. Η δυναμικότητα του τερματικού σταθμού υπερέβαινε πλέον τις παραγγελίες υγροποιημένου φυσικού αερίου της ΔΕΠΑ οπότε η εταιρεία ανακοίνωσε την δυνατότητα χρήσεως του σταθμού και από ιδιώτες.

Τον Σεπτέμβριο του 1988 ιδρύθηκε ως θυγατρική της Δημόσιας Επιχείρησης Πετρελαίου (ΔΕΠ) Δημόσια Επιχείρηση Αερίου (ΔΕΠΑ) η οποία ανέλαβε υπό κρατικό έλεγχο ηγετικό ρόλο στην αναδυόμενη αγορά φυσικού αερίου. Οι δραστηριότητές της περιλαμβάνουν την εισαγωγή, διανομή και αποθήκευση φυσικού αερίου. Το 35% των μετοχών της εταιρείας ανήκει στο ελληνικό δημόσιο, ενώ το 65% ανήκει στην υπό κρατικό έλεγχο εταιρεία Ελληνικά Πετρέλαια. Τον Μάρτιο του 2004 η ισπανική εταιρεία Gas Natural (GN) συμφώνησε με την τότε κυβέρνηση για την εξαγορά του ποσοστού του δημοσίου στην μετοχική σύνθεση της ΔΕΠΑ.

Ωστόσο, η νέα κυβέρνηση που προέκυψε μετά τις εκλογές της 7ης Απριλίου 2004 πήρε την απόφαση να μην πραγματοποιήσει την μεταβίβαση. Η ιδιωτικοποίηση της ΔΕΠΑ και η απελευθέρωση της αγοράς φυσικού αερίου παρέμειναν στην επικαιρότητα, καθώς η δεύτερη



αποτελούσε υποχρέωση της Ελλάδος έναντι της Ευρωπαϊκής Κοινότητας σύμφωνα και με την Οδηγία 98/30/ΕΚ. Το 2006 η Ελληνική Βουλή ενέκρινε νομοσχέδιο για την απελευθέρωση της ελληνικής αγοράς ενέργειας, απαραίτητο βήμα για την εγκαθίδρυση καθεστώτος ελεύθερου ανταγωνισμού στην αγορά φυσικού αερίου. Η απελευθέρωση της αγοράς θα γινόταν σταδιακά πρώτα για τους μεγάλους βιομηχανικούς καταναλωτές και τους παραγωγούς ηλεκτρικής ενέργειας και στην συνέχεια για τους μικρούς οικιακούς και άλλους καταναλωτές.

Για την ανάπτυξη του δικτύου διανομής του φυσικού αερίου συστήθηκαν από την ΔΕΠΑ το 1995 τρεις θυγατρικές Εταιρείες Διανομής Φυσικού Αερίου (ΕΔΑ) σε Αθήνα, Θεσσαλονίκη και Θεσσαλία, οι οποίες είχαν την ευθύνη για την κατασκευή του δικτύου διανομής και συνέχισαν στη σύσταση Εταιρειών Παροχής Φυσικού Αερίου (ΕΠΑ) σε συνεργασία με αλλοδαπές εταιρείες του κλάδου με αντικείμενο την εμπορία του φυσικού αερίου σε οικιακούς και βιομηχανικούς χρήστες.

Ακόμα, δημιουργήθηκε ενδιαφέρον για την χερσαία σύνδεση του δικτύου φυσικού αερίου της Ελλάδος και με άλλα κράτη-εξαγωγής. Αυτό θα σήμαινε την μείωση της εξάρτησης από τη Ρωσία ως το μοναδικό αλλά και μεγάλο προμηθευτή της ελληνικής αγοράς και θα επέτρεπε την διαπραγμάτευση καλύτερων και πιο συμφερούσων τιμών αγοράς φυσικού αερίου με περισσότερους του ενός εξαγωγές. Ταυτόχρονα, θα μετέτρεπε την Ελλάδα σε κόμβο μεταφοράς ενέργειας από τον Καύκασο, την Κεντρική Ασία και τη Μέση Ανατολή προς την Ευρώπη και πυλώνα της πολιτικής ενεργειακής ασφαλείας της Ευρωπαϊκής Ενώσεως. Η σύνδεση ωστόσο του δικτύου της Ελλάδας με αυτό του Αζερμπαϊτζάν, του Ιράν, του Τουρκμενιστάν και του Καζακστάν προϋπέθετε την σύνδεση με το δίκτυο της Τουρκίας, κάτι που ήταν αδύνατο εφόσον οι σχέσεις των δύο χωρών δεν ήταν οι καλύτερες. Η διευθέτηση δυσκολιών και εντάσεων μεταξύ των ελληνοτουρκικών σχέσεων από το 1999, για πρώτη φορά έγινε δυνατή η συνεργασία των δύο αυτών κρατών στον τομέα της ενέργειας. Η Ελλάδα θα συμπεριλαμβανόταν για πρώτη φορά στον κατάλογο των χωρών-κόμβων μεταφοράς ενέργειας, αποκτούσε ευκολότερη πρόσβαση στην διεθνή αγορά φυσικού αερίου, καθώς και πάγιο εισόδημα λόγω των τελών διέλευσης του φυσικού αερίου προς τις γειτονικές χώρες.

Επιπλέον, τα δίκτυα φυσικού αερίου του Ιράν και της Τουρκίας ήταν ήδη συνδεδεμένα από το 2001, επομένως τόσο το Ιράν όσο και άλλα κράτη συνδεδεμένα με το δίκτυο φυσικού αερίου της χώρας θα μπορούσαν με τον ίδιο τρόπο να εξαγάγουν φυσικό αέριο προς την ευρωπαϊκή αγορά. Ο συνδυασμός των δύο έργων θα μετέτρεπε την Ελλάδα σε έναν κόμβο που θα μετέφερε φυσικό αέριο από την Κεντρική Ασία, τον Καύκασο και τη Μέση Ανατολή προς την Ευρώπη.

## **2.11. Εξέλιξη ζήτησης φυσικού αερίου**

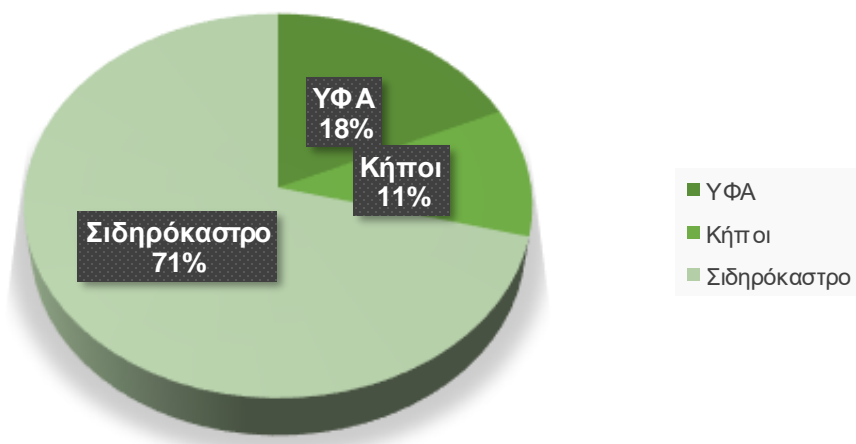
Η σταθερή αύξηση στη ζήτηση φυσικού αερίου κυρίως από το 2010 είναι αποτέλεσμα των χαμηλών εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα από την παραγωγική διαδικασία ενεργειακών τεχνολογιών. Κύριο πεδίο που αφορά την ζήτηση του φυσικού αερίου αναμένεται να είναι η ηλεκτροπαραγωγή. Ωστόσο, οι βασικότεροι παράγοντες που θα καθορίσουν την ζήτηση του είναι η οικονομική ανάπτυξη και οι κυβερνητικές πολιτικές.

Σε σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας η χρήση του φυσικού αερίου μεταξύ 2007-2030 αυξάνεται κατά περίπου 50%. Στον βιομηχανικό, οικιακό και αγροτικό τομέα η τελική κατανάλωση του φυσικού αερίου αυξάνεται κατά 10% μεταξύ 2007-2015 και κατά 34% το 2030.

Το 2011-2014 η κατανάλωση του φυσικού αερίου στην χώρα μας φανέρωσε σημαντική άνοδο, ωστόσο από το 2014 και μετά για λίγα χρόνια φάνηκε να μειώνεται για τον λόγο ότι η οικονομική κρίση της χώρας επηρέασε σημαντικά και τον ενεργειακό τομέα. Όσο πλησιάζουμε στο σήμερα δείχνει να αυξάνεται και πάλι η κατανάλωση του καθώς χρησιμοποιείται για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από τις μονάδες της ΔΕΗ και των ιδιωτών ηλεκτροπαραγωγών.

Τα ποσοστά εισαγωγής φυσικού αερίου τα έτη 2017 και 2018 για σημείο εισόδου Σιδηρόκαστρο, ΥΦΑ (Υγροποιημένο Φυσικό Αέριο) και Κήποι φαίνονται στο παρακάτω διάγραμμα.

### Εισαγωγές Φυσικού Αερίου



Εικόνα 2-10. Εισαγωγές φυσικού αερίου την περίοδο 1/1/2017 - 30/4/2018. (Μελέτη Ανάπτυξης 2019-2028, 2018)

Έγινε προσομοίωση της ΕΧΑΗΕ (Ελληνικής Χονδροεμπορικής Αγοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας) για να εκτιμηθεί η στάθμη κατανάλωσης φυσικού αερίου στο κομμάτι της ηλεκτροπαραγωγής κατά την περίοδο 2019-2028. Οι μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, αφού ενσωματωθούν στο πρόγραμμα ΗΕΠ (Ημερήσιος Ενεργειακός Προγραμματισμός) διανέμονται από το τεχνικό ελάχιστο έως τη διαθέσιμη ισχύ τους. Η προσομοίωση αυτή πραγματοποιήθηκε για τρία σενάρια τα οποία βασίζονται στην εκτίμηση του ετήσιου ρυθμού αύξησης της ζήτησης της ενέργειας. Το 2<sup>ο</sup> σενάριο αναφέρεται και ως βασικό για οικονομικούς σκοπούς.

1<sup>ο</sup> σενάριο → Χαμηλό σενάριο για την κατανάλωση φυσικού αερίου (80\$/βαρέλι για το 2019 και 75\$/βαρέλι για το 2028).

2<sup>ο</sup> σενάριο → Ενδιάμεσο σενάριο για την κατανάλωση φυσικού αερίου (75\$/βαρέλι για το 2019 και 70\$/βαρέλι για το 2028).

3<sup>ο</sup> σενάριο → Υψηλό σενάριο για την κατανάλωση φυσικού αερίου (67,06\$/βαρέλι για το 2019 και 68,79\$/βαρέλι για το 2028).

Παρακάτω φαίνεται ένας πίνακας ο οποίος δείχνει το κόστος δικαιωμάτων εκπομπής διοξειδίου του άνθρακα.

*Πίνακας 2-1. Μέσος όρος ετήσιων προβλέψεων. (Μελέτη Ανάπτυξης 2019-2028, 2018)*

Έτος	CO <sub>2</sub> €/tn	1 <sup>ο</sup> σενάριο \$/bbl	2 <sup>ο</sup> σενάριο \$/bbl	3 <sup>ο</sup> σενάριο \$/bbl
2019	13,98	80	75	67
2020	14,25	79,7	74,7	62,4
2021	14,39	79,14	74,14	59,4
2022	15,60	78,59	73,59	57,67
2023	17,60	78	73,03	56,97
2024	19,59	77,48	72,48	58,26
2025	21,59	76,92	71,92	60,89
2026	23,61	76,37	71,37	63,52
2027	25,65	75,81	70,81	66,16
2028	27,69	75,25	70,25	68,79

## 3. Υδρογόνο

### 3.1. Ιστορική ανασκόπηση

Στην δεκαετία του '70 παρουσιάστηκε από το Institute for Nuclear Energy της Βιέννης ο όρος «οικονομία του υδρογόνου». Αρχικά, αυτή η ιδέα ήταν για την παραγωγή υδρογόνου από αντιδραστήρες υψηλών θερμοκρασιών, το οποίο θα αντικαθιστούσε τα συμβατικά καύσιμα. Την τελευταία δεκαετία αυτή η ιδέα ξανά ήρθε στο φως λόγω μιας προόδου που είχε γίνει στην έρευνα σχετικά με τις κυψέλες καυσίμου αφού παρατηρήθηκε μεγάλη αύξηση στην τιμή του πετρελαίου.

Το 2006 ο πρόεδρος G. Bush έχοντας στο μυαλό του την απεξάρτηση της χώρας του από το πετρέλαιο είχε την πρόθεση να υλοποιήσουν την ιδέα της «οικονομίας του υδρογόνου» λέγοντας ότι: «το υδρογόνο είναι καθαρό, παράγεται εγχώρια και είναι το καύσιμο του μέλλοντος».

### 3.2. Οι ιδιότητες του υδρογόνου

Το υδρογόνο αν και το ελαφρύτερο στοιχείο, αποτελεί σχεδόν το 90% του σύμπαντος ως προς τη μάζα του. Αποτελείται από ένα ηλεκτρόνιο και ένα πρωτόνιο γι' αυτό είναι το απλούστερο στοιχείο στον περιοδικό πίνακα. Επίσης, υπάρχει αφθονία υδρογόνου στους υδρογονάνθρακες οι οποίοι έχουν γενικό μοριακό τύπο  $C_xH_y$ , όμως ως καθαρό στοιχείο βρίσκεται μόνο σε ίχνη στην ατμόσφαιρα, διότι λόγω της ελαφρότητας του όπως προαναφέρθηκε ανεβαίνει ψηλά με μεγάλη ταχύτητα και διαφεύγει από την ατμόσφαιρα προς το διάστημα.

Παράλληλα, το υδρογόνο καίγεται στον αέρα σε συγκεντρώσεις μεταξύ 4 και 75% κατ' όγκο, ενώ το μεθάνιο καίγεται μεταξύ 5,3 και 15% και το προπάνιο μεταξύ 2,1 και 9,5% συγκεντρώσεων κατ' όγκο. Η υψηλότερη θερμοκρασία που καίγεται το υδρογόνο είναι 2318°C όταν καίγεται σε αναλογία 29% στον αέρα, ενώ σε ατμόσφαιρα οξυγόνου η θερμοκρασία φτάνει τους 3000°C. Η ελάχιστη ενέργεια που απαιτείται για την ανάφλεξη είναι 0,02 mJ για το υδρογόνο 2,29 mJ για το μεθάνιο και 0,26 mJ για το προπάνιο σε στοιχειομετρική αναλογία καυσίμου/οξυγόνου. Συγκριτικά οι θερμοκρασίες για την αυθόρμητη καύση του υδρογόνου, του μεθανίου και του προπανίου είναι 585°C, 540°C και 487°C αντίστοιχα.

Το υδρογόνο είναι καύσιμο με μεγάλη θερμαντική αξία (kJ/kg), δηλαδή προσφέρει μεγάλο ποσό θερμότητας κατά την καύση μιας συγκεκριμένης ποσότητας καυσίμου. Το προϊόν της καύσης του είναι μόνο το νερό (ακίνδυνο προς το περιβάλλον) και μπορεί να μεταφέρεται σε μεγάλες αποστάσεις χωρίς να υπάρχουν σημαντικές απώλειες. Επιπρόσθετα, το υδρογόνο είναι το ιδανικό καύσιμο αφού δεν υπάρχει κάποιο περιβαλλοντικό κόστος στην παραγωγή και την χρήση του, όταν χρησιμοποιείται σε συνδυασμό με αιολική ή ηλιακή ενέργεια. Δεν βλάπτει το περιβάλλον αλλά ούτε την ατμόσφαιρα, ενώ τα προϊόντα της καύσης του δεν περιέχουν επικίνδυνα αέρια ή σωματίδια όπως αιθάλη ή διοξείδιο του άνθρακα.

Εκτός από την παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος θα ήταν ιδανικό και χρήσιμο να γίνεται χρήση του υδρογόνου και για την κίνηση των οχημάτων αντί των προϊόντων του πετρελαίου. Το υδρογόνο είναι δευτερογενές καύσιμο διότι δεν υπάρχει ελεύθερο στη φύση παρά μόνο στα

ψηλότερα στρώματα της ατμόσφαιρας, γι' αυτό πρέπει να καταναλωθεί ενέργεια δηλαδή να γίνουν κάποιες φυσικοχημικές διεργασίες για την παραγωγή του. Ένας μεγάλος τομέας στην έρευνα και στην ανάπτυξη για την χρήση του υδρογόνου ως καύσιμο είναι η βελτιστοποίηση των μεθόδων παραγωγής του, ώστε το κόστος του να κατέβει σε ανταγωνιστικά επίπεδα σε σύγκριση με τα άλλα καύσιμα. Παράλληλα, γίνεται έρευνα ανάπτυξης για τους τρόπους αποθήκευσης και μεταφοράς του καθώς και για τις χρήσεις του ώστε να γίνει πιο εύκολο στην χρήση του εφόσον συμφέρει οικονομικά και περιβαλλοντικά.

***Πώς παράγεται το υδρογόνο σήμερα και γιατί αναζητούμε εναλλακτικές τεχνολογίες;***

Λόγω της μεγάλης χρήσης του υδρογόνου, η βιομηχανία προϋποθέτει πολύ μεγάλες ποσότητες  $H_2$  στο ελάχιστο δυνατό κόστος. Το 75% της παγκόσμιας παραγωγής  $H_2$  βασίζεται σε μια τεχνολογία που μετατρέπει το φυσικό αέριο σε  $H_2$  με την χρήση ατμού. Στις ΗΠΑ, αυτή η μέθοδος κοστίζει 2 \$/kg παραγόμενου  $H_2$ . Εντούτοις, αυτή η τεχνολογία έχει μερικά μειονεκτήματα. Για αρχή, απαιτεί μεγάλα ποσά ενέργειας για τη μετατροπή και τον διαχωρισμό του  $H_2$  από τα υπόλοιπα συστατικά που προκύπτουν από την αντίδραση του φυσικού αερίου με ατμό. Έπειτα, καταλήγει σε αυξημένες εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα στην ατμόσφαιρα ενισχύοντας έτσι το φαινόμενο του θερμοκηπίου. Τα μειονεκτήματα που προαναφέρθηκαν είναι γνωστά στη βιομηχανική και επιστημονική κοινότητα. Ωστόσο, η τεχνολογία εξακολουθεί να έχει το χαμηλότερο κόστος και συνεπώς να χρησιμοποιείται παγκοσμίως. Παράλληλα, γίνονται έρευνες για το πώς να ελαχιστοποιηθούν οι εκπομπές ή πώς να δεσμευτούν και να αξιοποιηθούν.

Το υδρογόνο έχει αποκτήσει αρκετά πλεονεκτήματα τα οποία βάζουν σε σκέψη πολλούς επιστήμονες για συχνή και άφθονη χρήση του. Μερικά από αυτά είναι:

- Καύσιμο με το μικρότερο ποσοστό ρύπων.
- Δυνατότητα αποθήκευσης της ενέργειας από τις ανανεώσιμες πηγές.
- Μεγάλη πληρότητα εκμετάλλευσης της θερμογόνου δύναμης με συμπύκνωση του ατμού των καυσαερίων.
- Είναι εφικτή η παραγωγή του στην περιοχή κατανάλωσης.
- Σε περίπτωση διαρροής, το υδρογόνο δεν είναι τοξικό.
- Μεγάλη τιμή πυκνότητας ενέργειας/kg βάρους σε σύγκριση με τους ηλεκτρικούς συσσωρευτές.
- Είναι εύκολη η μεταφορά και η τροφοδοσία του στους κινητήρες διότι μπορεί να διατεθεί σε υγρή αλλά και σε αέρια μορφή.

Ωστόσο, υπάρχουν και μειονεκτήματα τα οποία είναι απαραίτητα να αναφερθούν.

- Δύσκολη διανομή και αποθήκευση του υδρογόνου ως καύσιμο για τους καταναλωτές (λόγω πτητικότητας).
- Στην αέρια μορφή του, καταλαμβάνει περισσότερο χώρο σε σχέση με την υγρή.
- Απαιτείται μεγάλη ενέργεια για την αλλαγή από την μια φάση στην άλλη.

- Λόγω του ότι το  $H_2$  στην υγρή μορφή διατηρείται σε πολύ μικρή θερμοκρασία ( $-250^{\circ}C$ ), απαιτείται η ένωση – προσρόφηση με άλλα υλικά για δημιουργία κραμάτων ή μετάλλων.
- Προϋποθέτει δαπανηρά βήματα για την κατασκευή συστήματος μεταφοράς υδρογόνου.

### 3.3. Μέθοδοι παραγωγής υδρογόνου

Το υδρογόνο δεν βρίσκεται ελεύθερο στη φύση, βρίσκεται δεσμευμένο σε οργανικές ενώσεις καθώς και στο νερό, για αυτό χρειάζεται να παραχθεί από τις ενώσεις του, με μεθόδους που απαιτούν ενέργεια. Από την διάσπαση αυτών των χημικών ενώσεων παράγεται το υδρογόνο το οποίο στην συνέχεια χρησιμοποιείται ως καύσιμο. Στις μέρες μας, σχεδόν όλη η παραγωγή υδρογόνου βασίζεται στις απολιθωμένες πρώτες ύλες.

Πίνακας 3-1. Παγκόσμια παραγωγή υδρογόνου από διάφορες πρώτες ύλες. (Δημήτριος-Παναγιώτης, ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ ΓΙΑ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ)

Πρώτες ύλες	Παραγωγή Υδρογόνου
Φυσικό αέριο	48%
Πετρέλαιο	30%
Άνθρακας	18%
Ηλεκτρόλυση νερού	4%

Υπάρχουν πολυάριθμοι τρόποι για την διάσπαση αυτών των χημικών ενώσεων. Παρακάτω περιγράφονται οι μέθοδοι παραγωγής υδρογόνου οι οποίες χρησιμοποιούνται αυτή την περίοδο ή είναι υπό έρευνα και ανάπτυξη.

Πίνακας 3-2. Μέθοδοι παραγωγής υδρογόνου.

<b>Θερμοχημικές τεχνολογίες</b>	Ατμοαναμόρφωση υδρογονανθράκων
	Αεριοποίηση-Μερική οξείδωση
	Αεριοποίηση και πυρόλυση βιομάζας
	Αυτόθερμη αναμόρφωση
<b>Φωτολυτικές τεχνολογίες</b>	Φωτοβιολογικές μέθοδοι
	Φωτοηλεκτροχημική μέθοδος
<b>Ηλεκτρόλυση νερού</b>	

Στην συγκεκριμένη αναφορά αναλύονται οι θερμοχημικές τεχνολογίες παραγωγής υδρογόνου καθώς χρησιμοποιείται το φυσικό αέριο ως πρώτη ύλη.

### Ατμοαναμόρφωση υδρογονανθράκων (SMR)

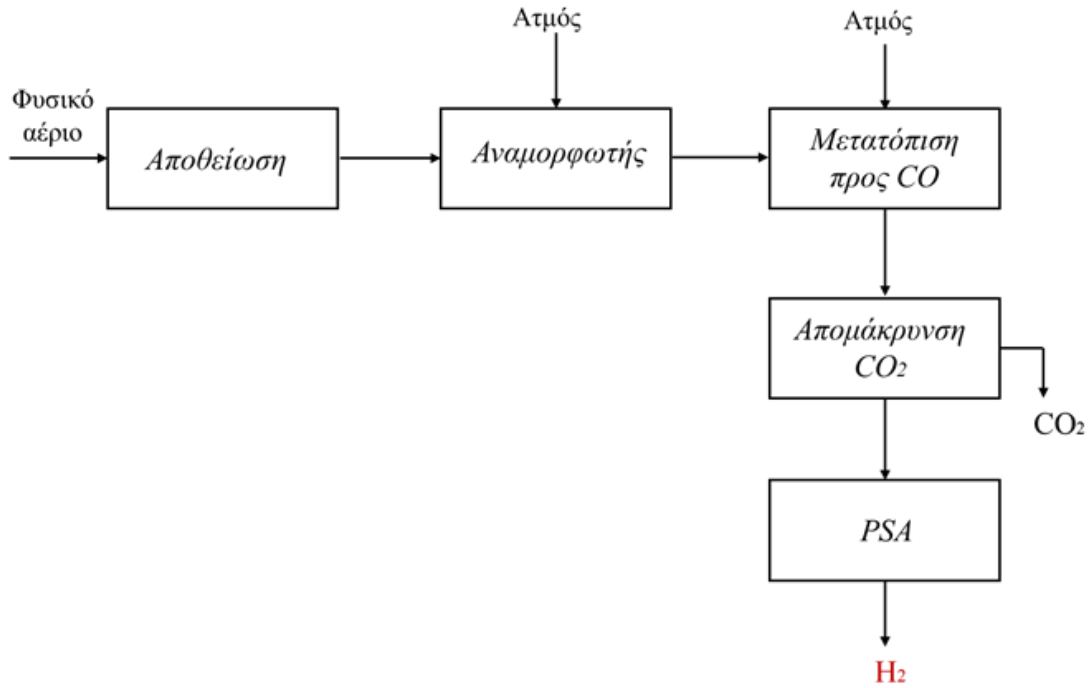
Η μέθοδος για την παραγωγή υδρογόνου η οποία είναι η λιγότερο δαπανηρή και η πιο ευρέως χρησιμοποιούμενη είναι η αναμόρφωση υδρογονανθράκων με ατμό όπου ανήκει στις θερμοχημικές τεχνολογίες όπως φαίνεται στον πίνακα 2-3. Η διαδικασία αυτή (SMR) περιλαμβάνει την ενδόθερμη αναμόρφωση του μεθανίου (CH<sub>4</sub>) με ατμό για την παραγωγή αερίου σύνθεσης.

#### Αρχή λειτουργίας

Οι υδρογονάνθρακες αναμιγνύονται με υπέρθερμο ατμό σε υψηλές θερμοκρασίες περίπου από 700°C έως και 1000°C υπό πίεση περίπου 25 bar και παρουσία καταλύτη συνήθως το Ni (χρησιμοποιούνται συνήθως μέταλλα της ομάδας VIII του περιοδικού πίνακα). Στην συνέχεια, ο άνθρακας οξειδώνεται μέσα στο καύσιμο από το οξυγόνο του ατμού για παραγωγή μονοξειδίου του άνθρακα και υδρογόνου. Έπειτα το μονοξείδιο του άνθρακα κατεργάζεται με υδρατμό σε θερμοκρασίες 400°C - 500°C ώστε να παραχθεί περισσότερο H<sub>2</sub> και CO<sub>2</sub>. Προφανώς, η παραγωγή του CO και CO<sub>2</sub> είναι αναπόφευκτη συνεπώς και οι δύο ενώσεις επηρεάζουν σημαντικά το περιβάλλον και φτάνει περίπου 0,3-0,4 m<sup>3</sup>. Η απόδοση υδρογόνου αυξάνεται περαιτέρω στο τμήμα μετατόπισης αερίου νερού (WGS) περίπου 92%, όπου μέρος του μονοξειδίου του άνθρακα αντιδρά με νερό για την παραγωγή υδρογόνου και διοξειδίου του άνθρακα. Οι αντιδράσεις που πραγματοποιούνται είναι οι παρακάτω:

Σύνθεση παραγωγή αερίου	$\text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O} + \text{θερμότητα} \rightarrow \text{CO} + 3\text{H}_2$	$\Delta H^0_{298} = 206 \text{ kJ/mol}$
Αντίδραση αλλαγής υγρού-αερίου (WGS)	$\text{CO} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO}_2 + \text{H}_2 + \text{θερμότητα}$	$\Delta H^0_{298} = -41,1 \text{ kJ/mol}$
Τελικό αποτέλεσμα	$\text{CH}_4 + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow 4\text{H}_2 + \text{CO}_2$	$\Delta H^0_{298} = 165 \text{ kJ/mol}$

Για την λήψη καθαρού υδρογόνου, τελικά, το αέριο εισέρχεται σε μια στήλη εναλλαγής πίεσης PSA. Παρακάτω φαίνεται ένα συνοπτικό διάγραμμα ροής παραγωγής υδρογόνου με την μέθοδο της ατμοαναμόρφωσης.



Εικόνα 3-1. Διάγραμμα ροής της ατμοαναμόρφωσης υδρογονανθράκων. (Παραγωγή υδρογόνου)

Το 2004 ο Moller και άλλοι πρότειναν ότι είναι εφικτό να επιτευχθεί εξοικονόμηση καυσίμου έως 40% με τη χρήση της διαδικασίας αναμόρφωσης σε συνδυασμό την ηλιακή ενέργεια.

Χρησιμοποιώντας την διεργασία αυτή, οι αποδόσεις μετατροπής ενέργειας κυμαίνονται μεταξύ 65-75% για μικρές αποκεντρωμένες μονάδες, ενώ έως 85% για μεγάλα συστήματα παραγωγής υδρογόνου. Σε περίπτωση όπου ο ατμός επαναχρησιμοποιείται τότε η συνολική απόδοση είναι αρκετά υψηλότερη.

Για μεγάλη κλίμακα SMR το κόστος του H<sub>2</sub> είναι μεταξύ 7-10 €/GJ H<sub>2</sub>, για τιμές του φυσικού αερίου από 4 έως 6 €/GJ. Για μικρή κλίμακα SMR το κόστος του H<sub>2</sub> μπορεί να ξεπεράσει τα 33 €/GJ. Το κόστος για το συμπιεσμένο H<sub>2</sub> σε φιάλες κοστίζει 60-70 €/GJ. Σε αυτήν την περίπτωση, υποθέτοντας πως το φυσικό αέριο έχει κόστος 2,5 €/GJ, η τιμή του H<sub>2</sub> για μεγάλες εγκαταστάσεις είναι περίπου 4 €, ενώ στις μικρές εγκαταστάσεις από 7-8 €/GJ.



Πίνακας 3-3. Οικονομικά και τεχνικά στοιχεία για διαφορετικές τεχνολογίες. (Υπάρχουσες τεχνολογίες και τελικές χρήσεις του καυσίμου του μέλλοντος - H<sub>2</sub>)

	Χαρακτηριστικά	Μονάδα Μέτρησης	Μικρής Κλίμακας SMR	Μεγάλης Κλίμακας SMR	Ηλιακός Αναμορφωτής
<b>Τεχνικά Στοιχεία</b>	Δυναμικότητα Φ.Α.	KW	4500	4275	405000
	Παραγωγή H <sub>2</sub>	Nm <sup>3</sup> /hr	1000	1000	100.000
	Πίεση	Bar	16	16	30
	Απόδοση H <sub>2</sub>	%	67	70	74
	Διάρκεια Ζωής	Year	25	25	25
	Χρόνος Εκμετάλλευσης	Hr/yr	8000	8000	8000
<b>Οικονομικά Στοιχεία</b>	Κόστος Επένδυση	€ <sub>2000</sub> /kW <sub>H2</sub>	690	655	335
	Σταθερό Κόστος	% Invest./yr	5	5	2
	Λειτουργικό Κόστος	€ <sub>2000</sub> /Nm <sup>3</sup>	0,003	0,003	0,003

### Μερική οξείδωση (POX) – Αεριοποίηση

Η μερική οξείδωση – αεριοποίηση είναι η πιο παλιά μέθοδος παραγωγής υδρογόνου. Αυτή η μέθοδος χρησιμοποιείται και σε υλικά όπως είναι η βιομάζα, τα αστικά και γεωργικά απόβλητα. Είναι σχετικά οικονομική σαν μέθοδος όμως είναι λιγότερο αποδοτική και εκπέμπει περισσότερο CO<sub>2</sub> σε σύγκριση με την ατμοαναμόρφωση μεθανίου. Η μέθοδος αυτή αφορά την παραγωγή H<sub>2</sub> μόνο σε μεγάλη κλίμακα.

#### Αρχή λειτουργίας

Η μέθοδος αυτή μπορεί να εκτελεστεί καταλυτικά ή μη καταλυτικά ή ακόμα με τον συνδυασμό και των δύο. Σε αυτή την διεργασία (η οποία μοιάζει με την αναμόρφωση ατμού) τα καύσιμα καίγονται μερικώς σε μια αντίδραση στους 900°C με παρουσία καταλύτη ενώ 1100°C - 1500°C χωρίς καταλύτη, η οποία είναι εξώθερμη. Συνεπώς, δίνει την απαραίτητη θερμότητα ώστε να πραγματοποιηθούν άλλες αντιδράσεις στο σύστημα με σκοπό να παραχθεί H<sub>2</sub> και CO. Εφόσον παράγεται θερμότητα δεν υπάρχει περαιτέρω ανάγκη για να θερμανθεί ο αντιδραστήρας. Η μη καταλυτική διεργασία γίνεται σε θερμοκρασία από 1300°C έως 1500°C και πίεση 30-100 bar.



Η χρήση του οξυγόνου θα πρέπει να παραχθεί ώστε το προϊόν να μην αραιωθεί με το άζωτο του ατμοσφαιρικού αέρα. Χρησιμοποιώντας καθαρό οξυγόνο η μέγιστη θεωρητική συγκέντρωση υδρογόνου είναι περίπου 66,7%, ενώ με την χρήση ατμοσφαιρικού αέρα η συγκέντρωση πέφτει στα 40,9%.

Η μέθοδος αυτή μαζί με απουσία καταλυτών καθιστά την διαδικασία καλύτερη από την ατμοαναμόρφωση διότι η θερμότητα που χρειάζεται η αντίδραση παρέχεται κατευθείαν από την καύση του καυσίμου με ελεγχόμενη παροχή αέρα.

### Αεριοποίηση & πυρόλυση βιομάζας

Η πυρόλυση βιομάζας είναι η τεχνική που στηρίζεται στην θέρμανση αυτής απουσία οξυγόνου και είναι μια αντιστρεπτή χημική μεταβολή. Με λίγα λόγια το  $H_2$  μπορεί να παραχθεί μέσω πυρόλυσης ή αεριοποίησης κάνοντας χρήση τα γεωργικά υπολείμματα και τα απόβλητα ή την βιομάζα. Η αεριοποίηση της βιομάζας είναι μια φθηνή μέθοδος παραγωγής  $H_2$  εφόσον δίνει 12-17%  $H_2$  κατά βάρος.

#### Αρχή λειτουργίας

Αρχικά, η βιομάζα ξηραίνεται και έπειτα μέσω ταχείας έκθεσης σε υψηλή θερμοκρασία μετατρέπεται σε έλαιο. Τα προϊόντα που έχουν υγρή μορφή είναι ένα είδος λαδιού για παράδειγμα όπως το πετρέλαιο, περιέχουν διάφορα συστατικά τα οποία μέσω κατάλληλης επεξεργασίας διαχωρίζονται σε χρήσιμες χημικές ουσίες και καύσιμα όπως το  $H_2$ .

### Αυτόθερμη αναμόρφωση (ATR)

Σε αντίθεση με την διεργασία SMR, η θερμότητα της αντίδρασης εδώ παρέχεται μέσα στο δοχείο αντίδρασης, οπότε δεν χρειάζεται εξωτερικός κλίβανος. Χρησιμοποιώντας αυτή την μέθοδο μπορεί να γίνει μετατροπή μεθανίου 60-65%, με εκλεκτικότητα 80% προς παραγωγή  $H_2$ .

#### Αρχή λειτουργίας

Η αυτόθερμη μετατροπή μεθανίου σε υδρογόνο γίνεται στους 850°C. Στον αναμορφωτή το μεθάνιο οξειδώνεται μερικώς από το  $O_2$  προς διοξείδιο του άνθρακα και νερό, και η θερμότητα που παράγεται οδηγεί σε ενδόθερμη αντίδραση. Σε δεύτερη φάση, οξειδώνεται μερικώς το μεθάνιο όπου μέσω ταυτόχρονων αντιδράσεων παράγεται  $CO_2$  και  $H_2O$ . Απαιτείται μια μονάδα διαχωρισμού αέρα ώστε να χρησιμοποιηθεί καθαρό οξυγόνο διότι πρέπει να αποφευχθεί η μόλυνση του υδρογόνου από το άζωτο. Γίνεται χρήση παρόμοιων καταλυτών όπως για την ατμοαναμόρφωση μεθανίου.

Παρακάτω φαίνεται ένας πίνακας που συγκρίνει τις μεθόδους με βάση τις εκπομπές, το κόστος και την απόδοση. Φαίνεται πως η ατμοαναμόρφωση υδρογονανθράκων είναι η πιο κατάλληλη μέθοδος παραγωγής υδρογόνου, διότι έχει καλή απόδοση, όχι τόσο μεγάλο κόστος και είναι εφικτή η διαχείριση των εκπομπών της, εκτενέστερη περιγραφή θα πραγματοποιηθεί σε επόμενο κεφάλαιο.

Πίνακας 3-4. Σύγκριση μεθόδων παραγωγής υδρογόνου.

	Ατμοαναμόρφωση υδρογονανθράκων	Μερική Οξείδωση	Αεριοποίηση & πυρόλυση βιομάζας	Αυτόθερμη αναμόρφωση υδρογονανθράκων
Εκπομπές	✓	✓		
Μεγάλο κόστος				✓
Μικρή απόδοση		✓	✓	

### 3.4. Αποθήκευση Υδρογόνου

Ένα σημαντικό εμπόδιο για την χρήση του υδρογόνου είναι η οικονομική αποθήκευση. Ωστόσο, γίνονται συνεχώς βελτιώσεις στις ενεργειακές πυκνότητες στα συστήματα αποθήκευσης με σκοπό η χρήση του υδρογόνου να μπει περισσότερο στην ζωή των ανθρώπων. Το υδρογόνο έχει πολύ χαμηλή τιμή πυκνότητας  $\rho_w = 0,0899 \text{ g/l}$  (14,4 φορές πιο μικρή από τον αέρα) και κατά συνέπεια μεγάλο όγκο. Άρα για να γίνει δυνατή η αποθήκευση του σε συνθήκες θερμοκρασίας και πίεσης περιβάλλοντος, θα πρέπει να μειωθεί ο όγκος του που σημαίνει ότι πρέπει να μειωθεί η θερμοκρασία ή να αυξηθεί η πίεση του ή ακόμα να μειωθεί η άπωση που ασκείται μεταξύ των μορίων του όταν διοχετεύεται σε στερεά υλικά.

Οι μέθοδοι αποθήκευσης του υδρογόνου είναι οι εξής:

- Σε κρυογονικές δεξαμενές σαν υγρό
- Σε φιάλες αερίου με υψηλές συνθήκες πίεσης περίπου 300 bar
- Μέσα στο κρυσταλλικό πλέγμα διαφόρων μετάλλων κολλημένο πάνω σε ενδοπλεγματικές θέσεις
- Προσροφημένο σε στερεά υλικά με μεγάλη ειδική επιφάνεια
- Δεσμευμένο μέσω χημικών δεσμών ιοντικής ή ομοιοπολικής φύσης από διάφορες χημικές ενώσεις

#### *Αποθήκευση του αερίου υδρογόνου*

Η πιο συνηθισμένη διαδικασία για την αποθήκευση του αερίου υδρογόνου είναι οι φιάλες υψηλής πίεσης. Οι φιάλες αερίου κατασκευάζονται από πολλαπλά ομοκυλινδρικά μεταλλικά τοιχώματα λόγω μεγάλων πιέσεων έχοντας μια επιπλέον ενίσχυση στα εξωτερικά τοιχώματα τα οποία είναι κατασκευασμένα από νανοσωλήνες άνθρακα. Αυτή η μέθοδος έχει όμως μερικά μειονεκτήματα τα οποία θα πρέπει κάποιος να λάβει υπόψιν. Εξαιτίας των υψηλών πιέσεων που απαιτούνται για την αποθήκευση του, το κόστος της φιάλης είναι υψηλό λόγω των υλικών που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή τους. Συμπερασματικά, η αποθήκευση του υδρογόνου θα πρέπει να ακολουθείται από πολύ αυστηρούς κανόνες ελέγχου και συντήρησης ώστε να εφαρμόζεται ακίνδυνα και αποτελεσματικά.

#### *Αποθήκευση του υγρού υδρογόνου*

Οι κρυογονικές δεξαμενές είναι αυτές που αποθηκεύουν το υδρογόνο σε υγρή μορφή, ωστόσο χρησιμοποιούνται και για την αποθήκευση και άλλων υγρών. Με την χαμηλή θερμοκρασία που επικρατεί στο εσωτερικό των δεξαμενών μερικά αέρια λόγω χαμηλού σημείου υγροποίησης μπορούν να αφαιρούν θερμότητα από άλλα υλικά με πιο υψηλό σημείο υγροποίησης. Μέσα στην κρυογονική δεξαμενή το υδρογόνο αποκτά μια μεγαλύτερα πυκνότητα από αυτή που έχει στην στερεή φάση δηλαδή  $70,6 \text{ kg/m}^3$ . Με λίγα λόγια για να αποθηκευτεί υγρό υδρογόνο στην δεξαμενή χρειάζεται να καταναλωθεί ένα μεγάλο ποσό ενέργειας λόγω της εξώθερμης φύσης της.

### Τεχνοοικονομική ανάλυση αποθήκευσης υδρογόνου

Η αποθήκευση υδρογόνου με συμπιεσμένο αέρα φαίνεται να είναι η καλύτερη μέθοδος διότι καλύπτει πολλές απαιτήσεις όπως είναι η ασφάλεια, η μεγάλη αντοχή, το μικρό βάρος και το φθινό κόστος.

Παρακάτω παρουσιάζεται ένας τεχνοοικονομικός πίνακας για την αποθήκευση του υδρογόνου. Στο σχετικό κόστος το 1 αντιστοιχεί στην πιο φθηνή λύση (περίπου \$10/kg H<sub>2</sub>) και το 5 στην πιο ακριβή λύση.

Πίνακας 3-5. Οικονομοτεχνική αποτίμηση συστημάτων αποθήκευσης H<sub>2</sub>. (ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ ΓΙΑ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ)

ΜΕΘΟΔΟΣ	ΒΑΡΟΣ % H <sub>2</sub>	ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΟ H <sub>2</sub> ΣΕ g/l	ΕΙΔΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΣΕ kJ/kg	ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΠΥΝΚΟΤΗΤΑ kJ/l	ΣΧΕΤΙΚΟ ΚΟΣΤΟΣ	ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ
<b>Αέριο</b>						
Κύλινδροι από ατσάλι 60kg/50lt/200atm	1,5	18	2,13	1,003	2	Χημικά εργοστάσια, μεταφορές
Δοχεία αλουμινίου 25kg/125l/200atm	2,6	17	3,7	1,739	3	Μεταφορές, φορητές συσκευές
Μικροσφαίρες από γαλι	6	6	8,52	853	5	Επιστημονικό ενδιαφέρον
Ζεολίτες	0,8	6	1,12	814	5	Βιομηχανικές- οικιακές εφαρμογές
<b>Υγρό</b>						
Κρυογονικά 300m <sup>3</sup> , ρυμουκλούμενα	12,5	71	17,76	9,919	1	Καύσιμα πυράνων, διαστημικές κυψέλες
<b>Στερεό</b>						
FeTiH <sub>2</sub>	1,6	96	2,27	13,56	3	Μεταφορές, φορητές συσκευές
LaNi <sub>5</sub> H <sub>6</sub>	1,4	89	1,99	12,74	3	
Mg <sub>2</sub> BiH <sub>4</sub>	3,2	81	4,51	11,47	3	
n- οκτάνιο	15,8	11	47,65	33,52	1	
<b>Συνδυασμός με χημικά</b>						
Μεθανόλη	12,5	150	22,32	17,66	1	Μεταφορές, φορητές συσκευές
Αμμωνία	17,6	136	22,36	17,22	1	Αγροτικά μηχανήματα, φορητές συσκευές

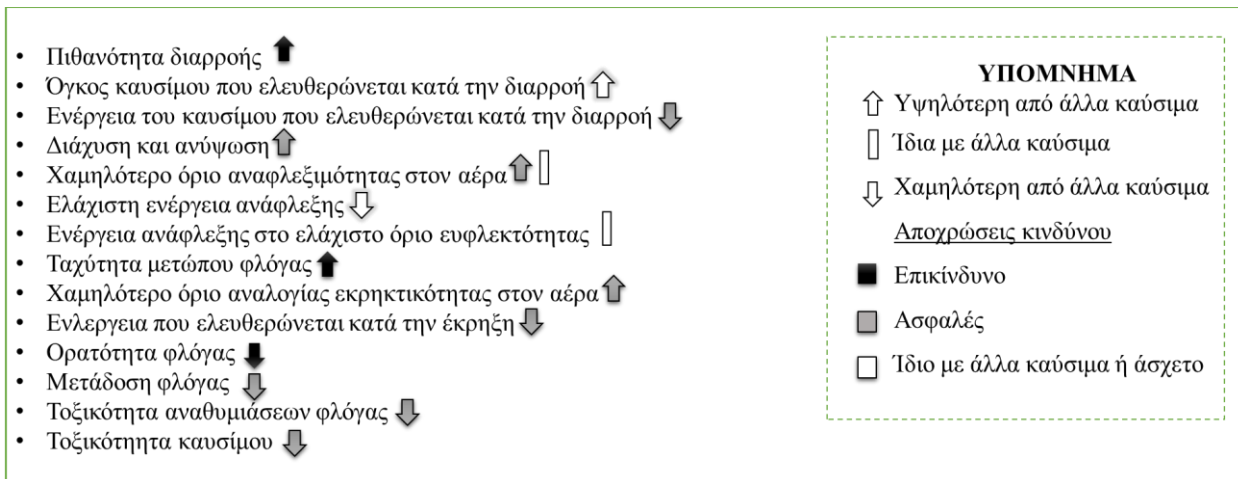
### 3.5. Ασφάλεια & υδρογόνο

Αν δεν ελεγχθούν ή χρησιμοποιούν σωστά όλα τα καύσιμα μπορούν να δημιουργήσουν κινδύνους. Παράγοντες για διάφορα ατυχήματα που έχουν συμβεί ταξινομούνται ως εξής:

- Διάβρωση
- Μεγάλη συμπίεση
- Μηχανικές αστοχίες ή αστοχίες υλικών

- Εύθραυστα δοχεία σε χαμηλές θερμοκρασίες αποθήκευσης
- Έκρηξη από εκτόνωση ατμών υγρών που βράζουν
- Ρήγματα από συγκρούσεις
- Ανθρώπινα σφάλματα

Ο έλεγχος για το πόσο ασφαλές είναι το υδρογόνο ξεκίνησε από το ατύχημα του αεροπλάνου Hindenburg, του διαστημικού λεωφορείου Challenger και την βόμβα υδρογόνου.



Εικόνα 3-2. Διαβάθμιση επικινδυνότητας υδρογόνου. (ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ ΓΙΑ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ)

Σε περίπτωση διαρροών μεγάλης κλίμακας από τα δοχεία αποθήκευσης υψηλής πίεσης, η ταχύτητα διαρροής περιορίζεται από την τιμή της ταχύτητας του ήχου. Η ταχύτητα ήχου του υδρογόνου είναι 1308 m/s ενώ του φυσικού αερίου 449 m/s, οπότε το H<sub>2</sub> διαφεύγει με μεγαλύτερη ταχύτητα δηλαδή διασκορπίζεται πολύ πιο γρήγορα από τα άλλα καύσιμα με αποτέλεσμα να μειωθούν τα επίπεδα κινδύνου.

Περιπτώσεις όπου μπορεί να προκληθεί αστοχία στην δεξαμενή αποθήκευσης κατά την λειτουργία τους ή με πιθανή σύγκρουση του οχήματος αναφέρονται παρακάτω:

- Ρωγμές που μπορεί να προκύψουν από κατασκευαστικό σφάλμα της δεξαμενής ή από λάθος χειρισμό της, ακόμα και από κάποιο χτύπημα με αιχμηρό αντικείμενο.
- Διαρροή – ρωγή στο τοίχωμα της δεξαμενής λόγω κατασκευαστικού λάθους.
- Διαρροή λόγω αστοχίας της ανακουφιστικής βαλβίδας πίεσης ή χημικής διάβρωσης.

Για να μειωθούν και να εξαλειφθούν οι παραπάνω αστοχίες πρέπει να γίνει κατάλληλο σχεδιασμό του συστήματος ώστε να υπάρχει αντοχή στα χτυπήματα, στις δονήσεις και στις πιθανές διαρροές. Ακόμα, θα πρέπει να γίνεται ανίχνευση της διαρροής με ανιχνευτές ή με χημικές ουσίες. Τέλος για την αποφυγή σπινθήρων και ανάφλεξης μπορεί να γίνει αποσύνδεση της μπαταρίας και να υπάρχουν συστήματα εξαερισμού.

Οι κίνδυνοι που προέρχονται από το  $H_2$  χωρίζονται σε φυσιολογικοί και φυσικοί. Οι φυσιολογικοί κίνδυνοι αφορούν τους ανθρώπους που μπορεί να τραυματιστούν από ασφυξία καθώς το  $H_2$  άμα διαρρεύσει στον αέρα κατεβάζει τα επίπεδα του οξυγόνου κάτω από το 19,5% κατ' όγκο. Επίσης, από την θερμική ακτινοβολία (από πυρκαγιά  $H_2$ ) μπορεί να προκληθούν εγκαύματα στους ανθρώπους. Οι φυσικοί κίνδυνοι αφορούν υλικά τα οποία μπορεί να έρθουν σε επαφή με το υδρογόνο με αποτέλεσμα να θραυτούν. Για αυτόν τον λόγο τα δοχεία που αποθηκεύουν το  $H_2$  πρέπει να είναι ανθεκτικά τόσο στο υδρογόνο όσο στην μεγάλη θερμοκρασία και πίεση.

### 3.6. Τεχνολογίες παραγωγής με υδρογόνο

Οι τεχνολογίες υδρογόνου αποτελούν μια από τις πλέον υποσχόμενες μεθόδους παραγωγής ενέργειας παρόλα αυτά σχετίζονται από κάποια απογοήτευση. Ωστόσο, νέα στοιχεία τα οποία έρχονται στην επιφάνεια δείχνουν ότι αυτές οι τεχνολογίες αποτελούν μια ελκυστική επιλογή για την απολιγνητοποίηση των παγκόσμιων συστημάτων ενέργειας, και ότι οι πρόσφατες βελτιώσεις στο κόστος και στις επιδόσεις τις καθιστούν οικονομικά βιώσιμες. Το μέλλον φαίνεται πολλά υποσχόμενο αν αναλογιστεί κανείς ότι το υδρογόνο είναι ήδη καθιερωμένο σε αρκετές θέσεις, όπως περονοφόρα ανυψωτικά οχήματα, ενώ αναμένονται και περαιτέρω εφαρμογές ζωτικής σημασίας. Τα οχήματα υδρογόνου διατίθενται στο εμπόριο σε πολλές χώρες και έχουν πωληθεί 225.000 οικιακά συστήματα θέρμανσης κυψελών καυσίμου.

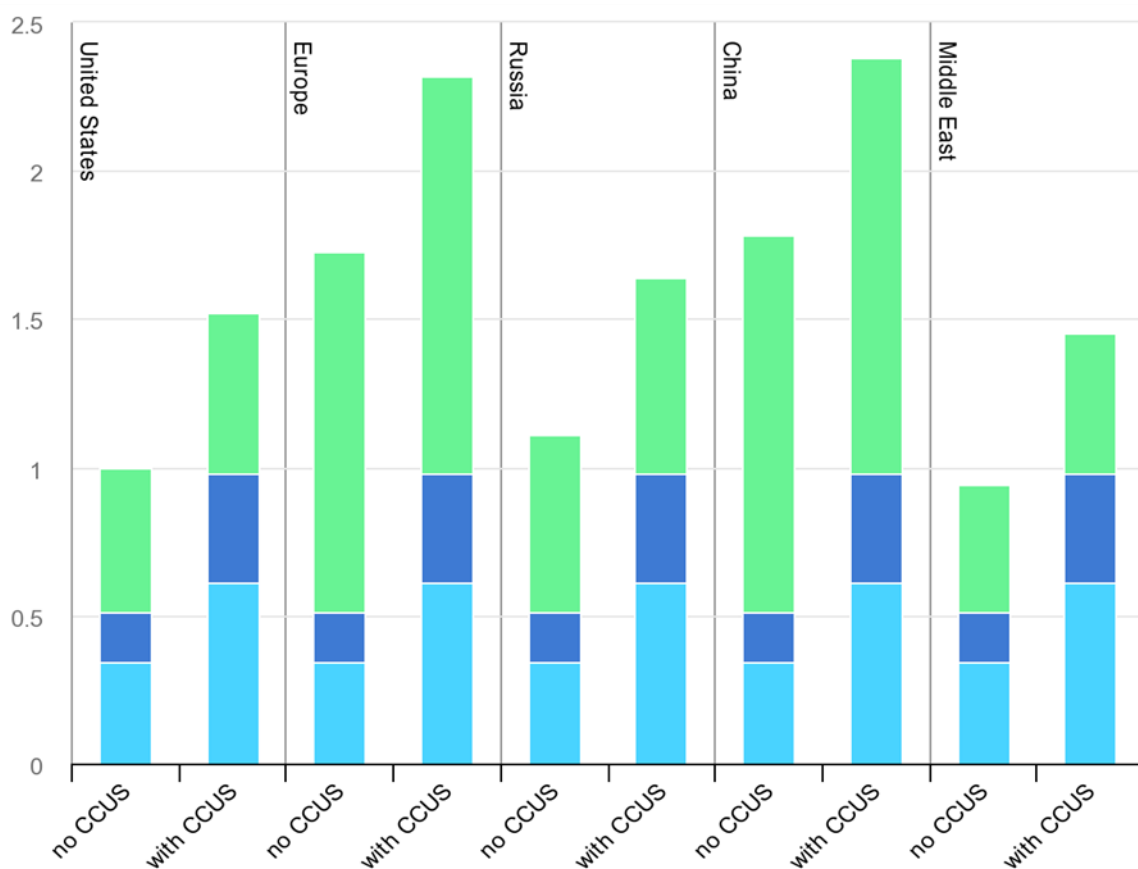
Πριν από τριάντα χρόνια, το υδρογόνο χαρακτηρίστηκε ως «ένα κρίσιμο και απαραίτητο στοιχείο ενός συστήματος άνθρακα, βιώσιμης ενέργειας» για την παροχή ασφαλούς, οικονομικά αποδοτικής και μη ρυπογόνου ενέργειας. Σήμερα, οι μηχανικοί βλέπουν το υδρογόνο ως τη χαμηλότερη επίπτωση και το λιγότερο συγκεκριμένο ζήτημα που αντιμετωπίζει το παγκόσμιο ενεργειακό σύστημα. Το υδρογόνο, ως βιώσιμο εναλλακτικό καύσιμο, συνεχίζει να υπόσχεται πολλά και να προσφέρει πολύτιμα μικρά.

Ωστόσο, το υδρογόνο θα μπορούσε να διαδραματίσει σημαντικό ρόλο στο μέλλον χαμηλών εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα αντισταθμίζοντας την ηλεκτρική ενέργεια ως φορέας ενέργειας μηδενικού άνθρακα που μπορεί εύκολα να αποθηκευτεί και να μεταφερθεί επιτρέποντας ένα πιο ασφαλές ενεργειακό σύστημα με μειωμένη εξάρτηση από ορυκτά καύσιμα με την ευελιξία να λειτουργούν στους τομείς των μεταφορών, θερμότητας, βιομηχανίας και ηλεκτρικής ενέργειας. Τα προηγούμενα αντιπροσωπεύουν τα  $2/3$  των παγκόσμιων εκπομπών  $CO_2$ .

Η κυψέλη καυσίμου έχει τις εξής εφαρμογές: α) Χρήση για συμπαραγωγή ενέργειας (παραγωγή θερμότητας και ενέργειας για ξενοδοχεία, νοσοκομεία σπίτια) β) Αποκεντρωμένη παραγωγή ισχύος (έρευνα και ανάπτυξη στη βιομηχανία) γ) Εφαρμογές μικρής ισχύος: Φώτα απομακρυσμένων περιοχών, ταμπέλες δρόμων, σταθμοί επικοινωνίας και μετεωρολογικοί σταθμοί. δ) Μεταφορές (αυτοκίνητα, υποβρύχια, τραίνα, λεωφορεία κ.ά.) ε) Φορητές συσκευές ισχύος: Φορητά τηλέφωνα, laptop, κάμερες και φορητές συσκευές ήχου.

### 3.7. Οικονομική αξιολόγηση παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με χρήση υδρογόνου από φυσικό αέριο με ταυτόχρονη δέσμευση CO<sub>2</sub>

Στο παρακάτω γράφημα απεικονίζεται το κόστος παραγωγής υδρογόνου με χρήση φυσικού αερίου σε επιλεγμένες περιοχές το έτος 2018. Παρατηρώντας τα χρώματα του διαγράμματος αξίζει να αναφέρουμε πως με γαλάζιο χρώμα είναι οι κεφαλαιουχικές δαπάνες (CAPEX) και με μπλε χρώμα διακρίνουμε τα λειτουργικά έξοδα (OPEX). Τέλος, το πράσινο χρώμα αναφέρεται στο ποσό του φυσικού αερίου. Αναλυτικότερα, οι επιχειρήσεις, όπως είναι γνωστό έχουν ποικίλα έξοδα. Αυτά μπορεί να είναι από το ενοίκιο που πληρώνουν για τα εργοστάσια ή τα γραφεία τους έως το κόστος των πρώτων υλών για τα προϊόντα τους, μέχρι τους μισθούς που πληρώνουν τους εργαζόμενους τους έως το συνολικό κόστος ανάπτυξης της επιχείρησής τους. Για να απλοποιήσουν όλο αυτό το κόστος, οι επιχειρήσεις το οργάνωσαν στις 2 προαναφερθείσες κατηγορίες.



Εικόνα 3-3. Κόστος παραγωγής υδρογόνου με χρήση φυσικού αερίου για διάφορες περιοχές. (Hydrogen production costs using natural gas in selected regions, 2018, 2020)

Οι κεφαλαιουχικές δαπάνες (CAPEX) είναι οι μεγάλες αγορές που πραγματοποιεί μια εταιρεία και έχουν σχεδιαστεί για να χρησιμοποιούνται μακροπρόθεσμα. Τα λειτουργικά έξοδα (OPEX)

είναι τα καθημερινά έξοδα που πραγματοποιεί μια εταιρεία για να διατηρήσει τις επιχειρήσεις της σε λειτουργία.

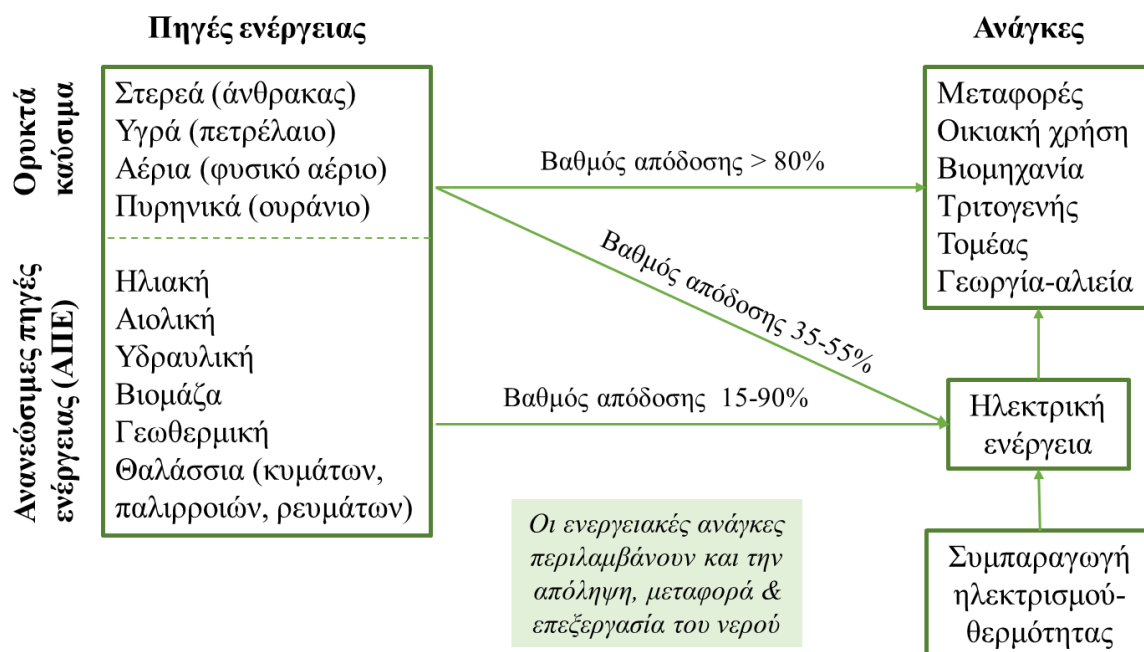
Σε κάθε μία από τις 5 περιοχές του διαγράμματος αναφέρεται το ποσό που χρειάστηκε για να γίνει η παραγωγή του υδρογόνου από το φυσικό αέριο, με ταυτόχρονη δέσμευση και αξιοποίηση του άνθρακα ή μη (CCUS). Είναι φανερό πως όταν ο άνθρακας δεσμεύεται και αποθηκεύεται οι κεφαλαιουχικές δαπάνες αλλά και τα λειτουργικά κόστη είναι αυξημένα σε σχέση με την μη επεξεργασία του άνθρακα καθώς οι απαραίτητες τεχνολογίες για την απομάκρυνση του CO<sub>2</sub> από τα καυσαέρια και την ατμόσφαιρα είναι δαπανηρές. Χαρακτηριστικά για την Ευρώπη η διαφορά στο κόστος κεφαλαίου είναι στα 0,27\$/kgH και λειτουργικά κόστη 0,2\$/kgH περισσότερα όταν γίνεται με ταυτόχρονη δέσμευση του άνθρακα. Επιπροσθέτως και το φυσικό αέριο είναι αυξημένο κατά 0,12\$/kgH. Εκτός από την αντιμετώπιση των τεχνικών πτυχών της CCUS, είναι επίσης ζωτικής σημασίας να αντιμετωπιστεί το κοινωνικό και οικονομικό κόστος της κλιματικής αλλαγής. Για αυτό έχουν δημιουργηθεί πολλές μέθοδοι δέσμευσης του άνθρακα χωρίς βέβαια να έχει λυθεί το μεγάλο πρόβλημα του κόστους.



## 4. Υφιστάμενη κατάσταση στον τομέα της ηλεκτρικής ενέργειας

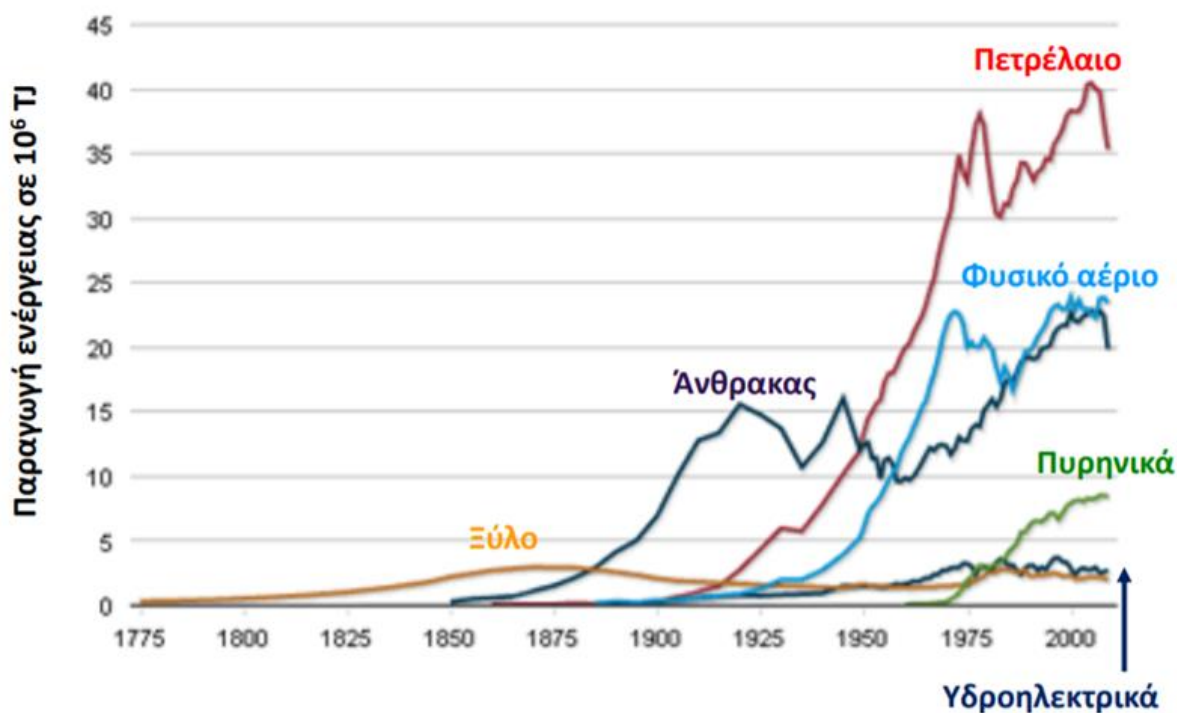
Η ενέργεια (Joule ή kWh) είναι η ικανότητα ενός σώματος ή συστήματος να παράγει έργο. Το μέγεθος αυτό συνδέεται με κάθε μεταβολή στον φυσικό κόσμο. Ο Αριστοτέλης ήταν αυτός που ανέφερε πρώτη φορά την λέξη ενέργεια με την έννοια της «δραστηριότητας που απαιτείται για να γίνει πράξη η δυνατότητα (δύναμις)».

Γενικότερα, η καθημερινή ενέργεια μεταβολισμού που χρειάζεται ένας μέσος άνθρωπος είναι περίπου 6-7,5 MJ (1.400-1.800 kcal). Η χημική ενέργεια που παίρνει από τις τροφές μετατρέπεται σε κινητική (κίνηση σώματος), δυναμική (σύσπαση μυών), θερμική (διατήρηση θερμοκρασίας) και ηλεκτρική (επικοινωνία εγκεφάλου με μέρη σώματος).



Εικόνα 4-1. Τυπική διάκριση πηγών ενέργειας και αναγκών. (Ευστρατιάδης, Εισαγωγή στην Ενεργειακή Τεχνολογία, 2018)

Οι πηγές ενέργειας προέρχονται από τα ορυκτά καύσιμα τα οποία είναι το πετρέλαιο, το φυσικό αέριο που προέρχονται από τα λείψανα της αρχαίας χλωρίδας και πανίδας, ο άνθρακας και οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ΑΠΕ) όπου είναι η ηλιακή, αιολική, υδραυλική κ.α. Η βασική διαφορά ανάμεσα στα ορυκτά καύσιμα και στις ΑΠΕ είναι ότι ο ρυθμός κατανάλωσης των ορυκτών καυσίμων είναι πολλαπλάσιος από το ρυθμό δημιουργίας τους, αυτό σημαίνει ότι στο μέλλον πρόκειται να εξαλειφθούν σε αντίθεση με τις ΑΠΕ οι οποίες πάντα θα ξανά δημιουργούνται. Τα ορυκτά καύσιμα είναι αρκετά εύχρηστα για την ανθρώπινη κοινωνία καθώς ο βαθμός απόδοσης μπορεί να φτάσει στο 80% για να καλύψει ανάγκες στην βιομηχανία, την μεταφορά και την οικιακή χρήση. Αναφορικά με το κομμάτι του βαθμού απόδοσης για την ηλεκτρική ενέργεια έρχονται σε σύγκριση τα ορυκτά καύσιμα και οι ΑΠΕ και φαίνεται πως οι ΑΠΕ μπορούν να αποδώσουν μέχρι και έως 90%.



Εικόνα 4-2. Χρονική εξέλιξη χρήσης πηγών ενέργειας. (Ευστρατιάδης, Εισαγωγή στην Ενεργειακή Τεχνολογία)

Κυρίως ο άνθρακας, το πετρέλαιο και το φυσικό αέριο παίζουν τον θεμελιώδη ρόλο στον τομέα παραγωγής ενέργειας.

Η ενέργεια μπορεί να έχει πολλές μορφές οι οποίες είναι όλες σπουδαίος παράγοντας στην ανθρώπινη ζωή. Για αυτόν τον λόγο η παραγωγή και ο εύλογος καταμερισμός ενέργειας είναι από τις βασικότερες δυσκολίες που πρέπει να έρθει αντιμέτωπη κάθε χώρα αναφορικά με την οικονομική της ανάπτυξη και τη βελτίωση της ποιότητας ζωής των κατοίκων της, με συνέπεια η ενεργειακή πολιτική (δηλαδή η εξασφάλιση, η εξοικονόμηση και η διάθεση της ενέργειας), να αποτελεί το πρώτο βασικό μέλημα των κυβερνήσεων. Την τελευταία εικοσαετία πρωταρχικό ρόλο παίζει η εφεύρεση τεχνικών βελτιώσεων που αφορά την εξοικονόμηση ενέργειας και την παραγωγή της με όσο το δυνατόν λιγότερο περιβαλλοντικό κόστος.

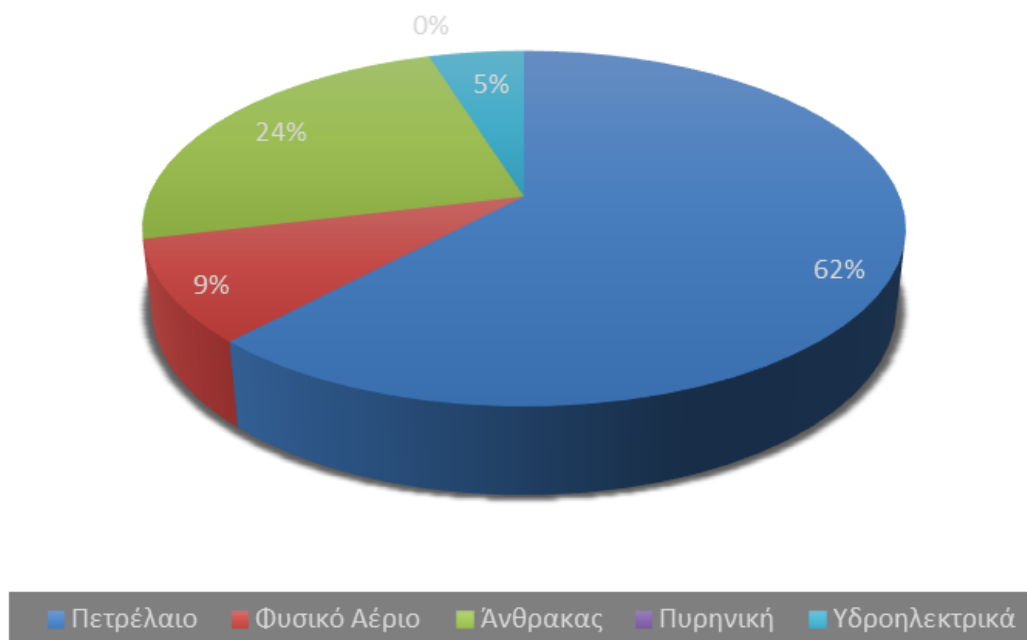
Η ηλεκτρική ενέργεια, απαρτίζει το στήριγμα της σημερινής διαβίωσης. Σ' αυτήν την ενέργεια βασίζονται η βιομηχανία, η επιστημονική έρευνα, οι τηλεπικοινωνίες, ο τομέας των υπηρεσιών, η θέρμανση και ο κλιματισμός. Προφανώς, η ηλεκτρική ενέργεια δεν ανήκει στον πρωτογενή τομέα, διότι δεν βρίσκεται ελεύθερα στη φύση, αλλά χρειάζεται να την παράγουμε και το κυριότερο της μειονέκτημα είναι ότι δεν μπορεί να μείνει αποθηκευμένη αλλά χρειάζεται να καταναλωθεί άμεσα, δηλαδή τη στιγμή που παράγεται. Η τιμή και το κόστος της είναι μεγέθη που εξαρτώνται από μερικούς παράγοντες, όπως είναι ο τρόπος παραγωγής και μεταφοράς.



*Εικόνα 4-3. Εργοστάσιο παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στην Ελλάδα. (Αργυρόπουλος Φώτης, 2015)*

Η ηλεκτρική ενέργεια έχει κάποια βασικά πλεονεκτήματα τα οποία είναι η ευκολία μεταφοράς της από τις πηγές στην κατανάλωση και η ευκολία μετατροπής της σε άλλες μορφές ενέργειας όπως η θερμότητα, η ακτινοβολία, η μηχανική και χημική ενέργεια. Το σημαντικό μειονέκτημα είναι η ανικανότητα αποθήκευσής της, παρά μόνο σε πολύ μικρή κλίμακα όπως για παράδειγμα φόρτιση μπαταριών, το οποίο επιβάλλει συγχρονισμό της παραγόμενης ενέργειας με την αντίστοιχη καταναλισκόμενη.

Το πετρέλαιο είναι το πιο διαδεδομένο καύσιμο για την ενεργειακή παραγωγή στην Ελλάδα το οποίο χρησιμοποιείται πολλά χρόνια και έχει αυξήσει την οικονομία της χώρας μας. Ακολουθεί ο άνθρακας και έπειτα το φυσικό αέριο το οποίο σιγά σιγά το ποσοστό χρήσης του αρχίζει να αυξάνεται και στο τέλος της σειράς έρχονται τα υδροηλεκτρικά.



Εικόνα 4-4. Ενεργειακή παραγωγή και ζήτηση ανά τομέα στην Ελλάδα. (Ευστρατιάδης, Εισαγωγή στην Ενεργειακή Τεχνολογία)

#### 4.1. Παραγωγή και βασικές αρχές μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας στην Ελλάδα

Από την ηλεκτρογεννήτρια παράγεται ρεύμα με τάση 66 kV. Στις μεγάλες αποστάσεις μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας υπάρχουν κάποιες απώλειες οι οποίες πρέπει να μειωθούν. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω μετασχηματιστών όπου η τάση αυξάνεται σε 150 kV (υψηλή) και 400 kV (υπέρψηλη). Η ηλεκτρική ενέργεια μεταφέρεται από το δίκτυο μεταφοράς προς τους υποσταθμούς. Στους υποσταθμούς μεταφοράς, η τιμή της τάσης υποβιβάζεται στην απαιτούμενη τάση του δικτύου διανομής, όπου περιλαμβάνει:

- το δίκτυο διανομής μέσης τάσης 20 kV που μεταφέρει την ηλεκτρική ενέργεια από τους υποσταθμούς μεταφοράς στους υποσταθμούς διανομής και
- το δίκτυο διανομής χαμηλής τάσης (220/380 V) που μεταφέρει την ηλεκτρική ενέργεια από τους υποσταθμούς διανομής στους καταναλωτές.

Οι πηγές που στηρίζεται η ενεργειακή κατανάλωση στην Ελλάδα είναι κυρίως το πετρέλαιο και ο λιγνίτης, όμως έχει γίνει μια προσπάθεια και για την χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Ύψιστης σημασίας έχει η παραγωγή και η μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας καθώς αυτή την μορφή έχει το μεγαλύτερο ποσό της δαπανώμενης ενέργειας.

Καθώς βελτιώνεται το βιοτικό επίπεδο στην Ελλάδα, η κατανάλωση την ηλεκτρικής ενέργειας αυξάνεται σημαντικά αυτά τα χρόνια διότι η σημερινή εποχή απαιτεί περισσότερες ενεργοβόρες ηλεκτρικές συσκευές όπως φούρνοι, κλιματιστικά, ηλεκτρικές κουζίνες. Ωστόσο, η χώρας μας δεν

αφήνει αναξιόπιστη την ηλιακή ενέργεια για την θέρμανση του νερού χωρίς όμως να εκμεταλλεύεται στο έπακρο την ηλιακή και αιολική ενέργεια ακόμη. Η Ελλάδα κάνει σημαντική χρήση στον λιγνίτη ο οποίος υπάρχει σε μεγάλη ποσότητα και συμβάλει σίγουρα στην ενεργειακή ανάπτυξη της χώρας. Η σημερινή κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας εκτιμάται περίπου 5500 kWh/άτομο/έτος και εκλύονται σχεδόν 0.875 kg CO<sub>2</sub>/παραγόμενη kWh.

Στην Ελλάδα η παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας συνήθως προέρχεται από θερμοηλεκτρικούς σταθμούς. Συγκεκριμένα, σχεδόν το μισό της συνολικής ηλεκτρικής ενέργειας παράγεται στην Περιφέρεια Δυτικής Μακεδονίας διότι υπάρχουν πλούσια κοιτάσματα λιγνίτη στην περιοχή τα οποία χρησιμοποιούνται ως πρώτη ύλη για τους σταθμούς. Ωστόσο, η τοποθεσία των θερμοηλεκτρικών σταθμών δημιουργεί προβλήματα στην μεταφορά καθώς παρατηρούνται αυξημένες απώλειες ηλεκτρικής ενέργειας. Στον παρακάτω πίνακα φαίνεται η τυπική σύσταση και η θερμογόνος δύναμη για διάφορα συστατικά καυσίμων ώστε να παρατηρηθούν κάποιες διαφορές ανάμεσα σε αυτά τα συστατικά που χρησιμοποιούνται για την ηλεκτροπαραγωγή.

Πίνακας 4-1. Τυπική σύσταση και θερμογόνος δύναμη.

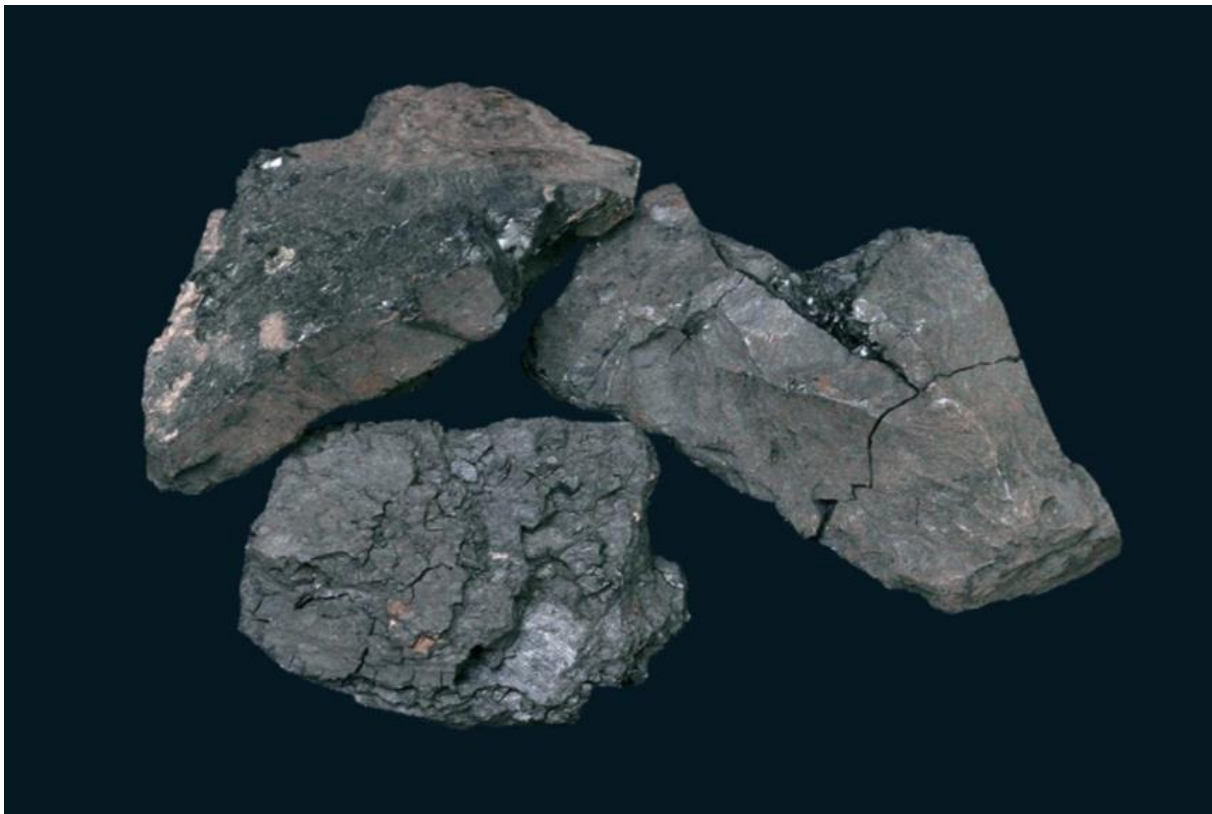
Συστατικά καυσίμων	Ασφαλτούχος άνθρακας	Υποασφαλτούχος άνθρακας	Λιγνίτης	Βενζίνη	Αργό πετρέλαιο	Φυσικό αέριο
Θερμογόνος δύναμη kJ/kg	28400	19400	8500	45200	42500	54400
Σύσταση (%)						
Άνθρακας	67	48	14.5	87	86	74
Υδρογόνο	5	3.3		12.5	9.7	23.9
Θείο	1.5	0.4	0.5	0.3	2.3	0
Αζωτο	1.5	0.7		0.02	1.2	1.7
Οξυγόνο	8.7	11.9			0.8	
Στάχτη	9.8	5.3	5.3		0.1	
Υγρασία	6.7	30.2	62.0		0.3	

Στο βόρειο τμήμα της Ελλάδας, δηλαδή στην Δ. Μακεδονία και Πτολεμαΐδα βρίσκεται ένας μεγάλος συγκεντρωτικός σταθμός παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας σε σχέση με το κύριο κέντρο κατανάλωσης το οποίο βρίσκεται στο Νότο δηλαδή στην Αττική. Ένας κεντρικός κορμός ισχύος 400 kV που αποτελείται από τρεις γραμμές μεταφοράς διπλού κυκλώματος εξυπηρετεί την ανάγκη μεταφοράς μεγάλων ποσοτήτων ισχύος κατά τον άξονα Βορρά – Νότου.

Γενικότερα, η ενεργειακή κατάσταση της χώρας μπορεί να χαρακτηριστεί πολύ εξαρτημένη, σπάταλη και ρυπογόνος εφόσον υπάρχει μεγάλο ποσοστό εισαγόμενων καυσίμων και έχει χαμηλό δείκτη ενεργειακής απόδοσης αλλά και υψηλές εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα. Σαν συμπέρασμα προκύπτει ότι στην Ελλάδα υπάρχει μια λάθος χρήση της ηλεκτρικής ενέργειας λόγω της έλλειψης γνώσης πάνω στην ενέργεια και στο κόστος παραγωγής της.

## 4.2. Ο λιγνίτης στην Ελλάδα

Ο λιγνίτης ή αλλιώς γαιάνθρακας, είναι πέτρωμα που αποτελείται κυρίως από άνθρακα αλλά περιέχει και άζωτο, νερό, υδρογόνο και οξυγόνο. Δεν μπορεί να μεταφερθεί πολύ εύκολα εξαιτίας της υψηλής περιεκτικότητας σε υγρασία και της χαμηλής περιεκτικότητας σε ενέργεια. Αρκετοί επιστήμονες υποστηρίζουν πως ο λιγνίτης δεν πρέπει να εξορύσσεται διότι η καύση του προκαλεί μεγάλη ατμοσφαιρική ρύπανση στον πλανήτη μας. Συγκεκριμένα, στην Ελλάδα υπάρχουν κάποιες περιοχές με σημαντική ποσότητα λιγνίτη όπως είναι η Δυτική Μακεδονία, η Δράμα, η Μεγαλόπολη και η Ελασσόνα.



*Εικόνα 4-5. Λιγνίτης. (Συνδυασμός μεταλλευτικών επιχειρήσεων)*

Το φυσικό αέριο συνεισφέρει το 28,3% της εγχώριας παραγωγής ενέργειας ενώ ο λιγνίτης το 53,15%. Στην Ελλάδα δεν είναι τόσο καλή η ποιότητα του λιγνίτη. Στην Μεγαλόπολη και την Δράμα η θερμογόνο δύναμη είναι περίπου μόνο 975-1380 kcal/kg ενώ στην Πτολεμαΐδα είναι 1261-1615 kcal/kg. Τέλος, στην Φλώρινα και την Ελασσόνα τα πράγματα είναι λίγο καλύτερα διότι εκεί η θερμογόνο δύναμη είναι περίπου 1927-2257 kcal/kg. Ένα βασικό πλεονέκτημα που έχει ο λιγνίτης στην Ελλάδα σε σχέση με άλλες χώρες είναι η χαμηλή περιεκτικότητα σε θείο.

Σαφώς η ΔΕΗ έχει το δικαίωμα να εκμεταλλευτεί τον λιγνίτη που βρίσκεται στο υπέδαφος σε ποσοστό 60%. Ο λιγνίτης συνεχίζει να είναι ένα σημαντικό καύσιμο εφόσον έχει ελεγχόμενο κόστος εξόρυξης, προσφέρει πολλές θέσεις εργασίες στην περιφέρεια αλλά και περιορίζει την εισαγωγή ενεργειακών καυσίμων. Τα αποθέματα λιγνίτη στην χώρα μας επαρκούν για περισσότερο από 45 χρόνια σύμφωνα με τον προγραμματιζόμενο ρυθμό κατανάλωσης. Τα

τελευταία χρόνια η ΔΕΗ επικεντρώνεται στο γεγονός ότι ο λιγνίτης είναι ένα ρυπογόνο καύσιμο στην περιοχή της Δυτικής Μακεδονίας και πρέπει να βρεθεί άμεσα μια λύση.

Τα λιγνιτικά κοιτάσματα στους νομούς Φλώρινας και Κοζάνης είναι:

- Το Κύριο Πεδίο (ορυχεία Ανατολικής Επέκτασης Κομάνου και Μαυτοπηγής)
- Το Πεδίο Καρδιάς (ορυχεία Νοτιοδυτικού Πεδίου – Υψηλάντη και Οικισμού Κομάνου)
- Το Νότιο Πεδίο (ορυχείο Νότιου Πεδίου)
- Το Πεδίο Αμυνταίου
- Το ορυχείο Κλειδιού

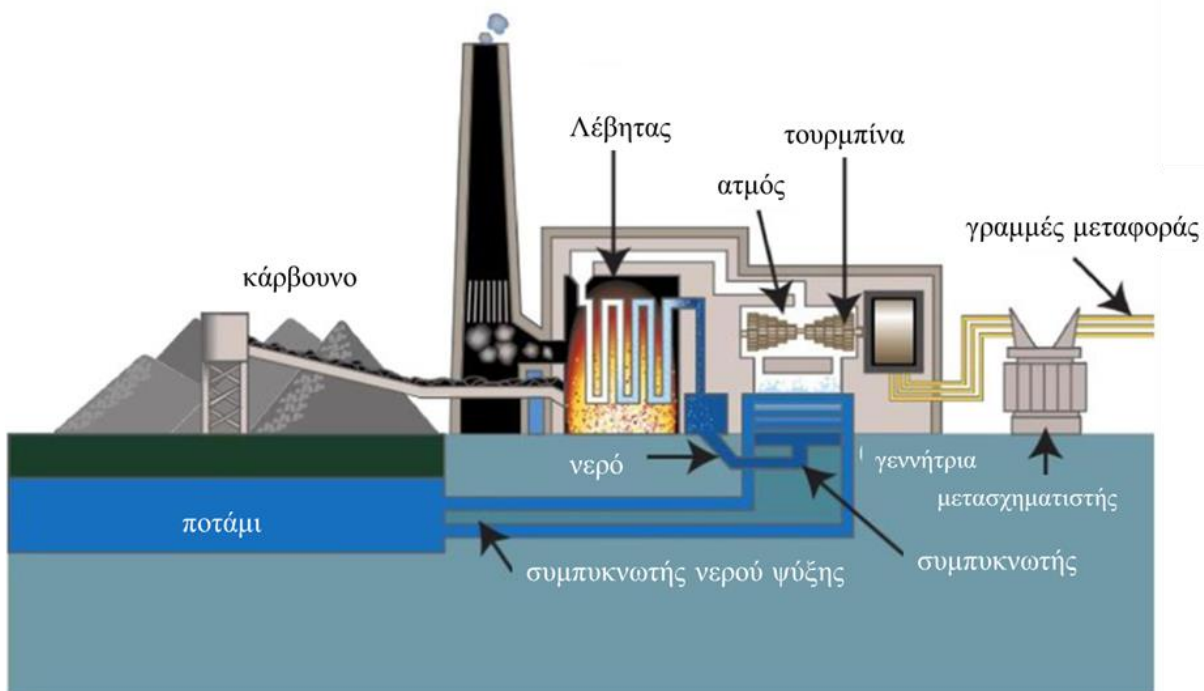
Πανεπιστήμιο Δυτικής Μακεδονίας-Τμήμα Χημικών Μηχανικών

Πίνακας 4-2. Συγκεντρωτικός πίνακας προβλεπόμενης κατανάλωσης λιγνίτη ανά ΑΗΣ για την περίοδο 2010-2050. (Νικόλαος)

ΕΤΟΣ	ΑΗΣ ΠΤΟΛΕΜΑΪΔΑ	ΑΗΣ ΚΑΡΔΙΑΣ	ΑΗΣ ΑΓΙΟΥ ΔΗΜΗΤΡΙΟΥ	ΠΤΟΛΕΜΑΪΔΑ V	ΣΥΝΟΛΟ
2010	7.7	13.6	20.4		41.7
2011	6.7	15.2	19.2		41.1
2012	5.4	13.4	19.8		38.6
2013	4.3	12.8	18.1		35.2
2014	4.6	11.7	19.4		35.7
2015	3.0	12.7	18.1		33.8
2016	3.0	14.0	19.0		36.0
2017		14.0	19.0	6.9	39.9
2018		14.0	19.0	6.9	39.9
2019		14.0	19.0	6.9	39.9
2020		14.0	19.0	6.9	39.9
<b>2021</b>		14.0	19.0	6.7	<b>39.9</b>
2022		14.0	19.0	6.7	39.7
2023		10.7	19.0	6.7	36.4
2024		7.1	19.0	6.7	32.8
2025		3.6	19.0	6.7	29.3
2026			19.0	6.7	25.7
2027			19.0	6.3	25.3
2028			19.0	6.3	25.3
2029			19.0	6.3	25.3
2030			19.0	6.3	25.3
2031			14.7	6.3	21.0
2032			11.0	6.3	17.3
2033			7.3	6.3	13.6
2034			3.7	6.3	10.0
2035			3.7	6.3	10.0
2036			3.7	6.3	10.0
2037			3.7	6.1	9.8
2038			3.7	6.1	9.8
2039			3.7	6.1	9.8
2040			3.7	6.1	9.8
2041			3.7	6.1	9.8
2042			3.7	6.1	9.8
2043			2.1	6.1	8.2
2044				6.1	6.1
2045				6.1	6.1
2046				6.1	6.1
2047				6.1	6.1
2048				6.1	6.1
2049				6.1	6.1
2050				5.2	5.2
<b>ΣΥΝΟΛΟ</b>	<b>34.7</b>	<b>198.8</b>	<b>468.4</b>	<b>215.3</b>	<b>917.2</b>



Για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας πραγματοποιείται η καύση του λιγνίτη στον λέβητα της μονάδας όπου δημιουργείται υπέρθερμος. Ο υπέρθερμος ατμός εκτονώνεται στο στρόβιλο μεγάλης πίεσης και έπειτα μεταφέρεται εκ νέου στο λέβητα ώστε να αναθερμανθεί και να εκτονωθεί στο στρόβιλο μέσης και χαμηλής πίεσης. Στην συνέχεια, με την βοήθεια ψυκτικού νερού ο ατμός συμπυκνώνεται και με την βοήθεια εναλλακτών θερμότητας προθερμαίνεται από τους 35°C στους 250°C και οδηγείται πάλι πίσω στον λέβητα με πίεση 180 bar ώστε έτσι να ολοκληρωθεί ένας θερμικός κύκλος. Η έξοδος της γεννήτριας συνδέεται στον υποσταθμό του εργοστασίου με τις άλλες μονάδες και με το δίκτυο. Η γεννήτρια ανυψώνεται στην τάση που απαιτείται για την μεταφορά ηλεκτρικής ισχύος με τον μετασχηματιστή.



Εικόνα 4-6. Διάγραμμα ηλεκτροπαραγωγής από λιγνίτη. (Τεχνολογίες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας)

### 4.3. Απολιγνιτοποίηση

Πρόκειται για συνεχόμενη μείωση και τελικά παύση της χρήσης του λιγνίτη για την παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας. Ο στόχος της απολιγνιτοποίησης είναι να δώσει ποιότητα στην υγεία των ανθρώπων και στο περιβάλλον διότι με την χρήση του λιγνίτη εκλύονται κάρβουνο σε μορφή σκόνης που προκαλεί αναπνευστικά προβλήματα στους ανθρώπους και τα ζώα καθώς και διοξείδιο του άνθρακα στην ατμόσφαιρα. Ο λιγνίτης το 1990 με 2017 ήταν υπεύθυνος για το 34% των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου για αυτόν τον λόγο η καύση του δεν συμφέρει. Επίσης, η οικονομική απόδοση του λιγνίτη μειώνεται συνεχώς. Αυτό συμβαίνει επειδή ξεπερνιέται το όριο εκπομπής ρύπων με αποτέλεσμα να επιβαρύνεται το κόστος παραγωγής της ηλεκτρικής ενέργειας. Συγκεκριμένα τους πρώτους τρεις μήνες του 2021 η ΔΕΗ ανακοίνωσε ότι η μέση τιμή για τα δικαιώματα διαμορφώθηκε στα 31,7 ευρώ/τόνο CO<sub>2</sub>. Για όλους αυτούς τους λόγους λοιπόν, τα

τελευταία χρόνια γίνεται η προσπάθεια να σταματήσει η χρήση του λιγνίτη για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και την θέση του να την πάρει το φυσικό αέριο το οποίο έρευνες δείχνουν ότι συμφέρει οικονομικά και περιβαλλοντικά, εφόσον η χώρα μας δεσμεύτηκε να κλείσει όλες τις μονάδες που χρησιμοποιούν λιγνίτη έως το 2023. Υπάρχουν παράγοντες που ασκούν επιρροή στην ανταγωνιστικότητα των λιγνιτικών μονάδων ηλεκτροπαραγωγής οι οποίοι αναφέρονται παρακάτω.

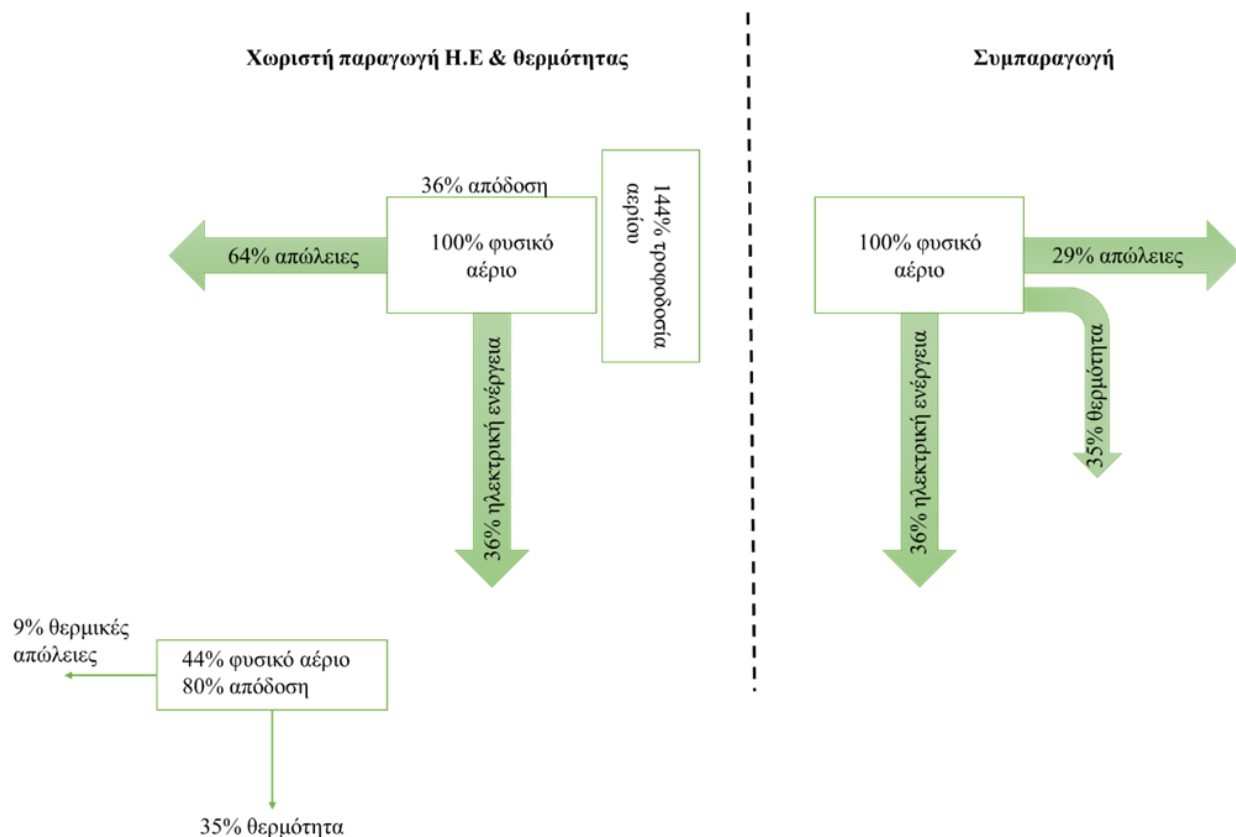
- Οι τιμές δικαιωμάτων CO<sub>2</sub> προσδιορίζουν το κόστος των εκπομπών τους. Συγκεκριμένα, όσο ψηλότερες είναι οι τιμές εκπομπής διοξειδίου του άνθρακα τόσο πιο πολύ θα επηρεαστεί αρνητικά η ανταγωνιστικότητα των λιγνιτικών μονάδων.
- Με τις δαπάνες αγοράς του λιγνίτη προσδιορίζεται το μεταβλητό κόστος των λιγνιτικών μονάδων ηλεκτροπαραγωγής.
- Η ικανότητα κάλυψης του συνολικού κόστους παραγωγής των λιγνιτικών μονάδων από την χονδρεμπορική αγορά επηρεάζει την ανταγωνιστικότητα τους.
- Οι χαμηλές τιμές φ.α περιορίζουν είτε τις ώρες λειτουργίας των μονάδων λιγνίτη, είτε τη δυνατότητα κάλυψης του σταθερού τους κόστους.

Στην περιοχή της Κοζάνης σχεδόν όλες οι λιγνιτικές μονάδες παραγωγής ηλεκτρισμού αποσύρονται. Έτσι, με την απολιγνιτοποίηση το ετήσιο ΑΕΠ της πόλης μειώνεται κατά 680.000.000 ευρώ σε σχέση με το 2019 επομένως η τοπική οικονομία περιορίζεται κατά 25%. Όταν ολοκληρωθεί η παύση των λιγνιτικών μονάδων στην Κοζάνη, η απασχόληση ελαχιστοποιείται σχεδόν κατά 7.500 θέσεις εργασίας πράγμα που πλήττει αρκετά την οικονομία της περιοχής.

#### **4.4. Μέθοδοι παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με την χρήση συμβατικών ορυκτών καυσίμων.**

Οι συμβατικές μέθοδοι χρησιμοποιούν την καύση του καυσίμου για να θερμανθεί το νερό και να παραχθεί ατμός και ηλεκτρική ενέργεια με την βοήθεια της χρήσης γεννητριών. Οι εξελιγμένες μέθοδοι περιλαμβάνουν την συμπαραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και θερμότητας, τον κύκλο παραγωγής από αεριοστρόβιλους και ατμοστρόβιλους αλλά και τον συνδυασμό των παραπάνω δύο με στόχο να αυξηθεί η ενεργειακή απόδοση και να μειωθούν οι αέριοι ρύποι. Μια αρκετά σημαντική διαφορά ανάμεσα σε μια μονάδα συμπαραγωγής και σε μια συμβατική είναι ότι στην πρώτη μονάδα το κόστος είναι μεν μεγαλύτερο όμως έχει περισσότερα περιβαλλοντικά πλεονεκτήματα αυτή η διεργασία.

Στην παρακάτω εικόνα παρατηρείται ότι με την συμπαραγωγή η ολική απόδοση είναι αρκετά μεγαλύτερη από την απλή παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Για παράδειγμα η ολική απόδοση διεργασιών στην περίπτωση της χωριστής παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και θερμότητας υπολογίζεται ως εξής:  $(36 + 35) \cdot 100/144 = 49.3\%$ . Ενώ η ολική απόδοση διεργασίας για την συμπαραγωγή υπολογίζεται:  $(36 + 35)\% = 71\%$ .

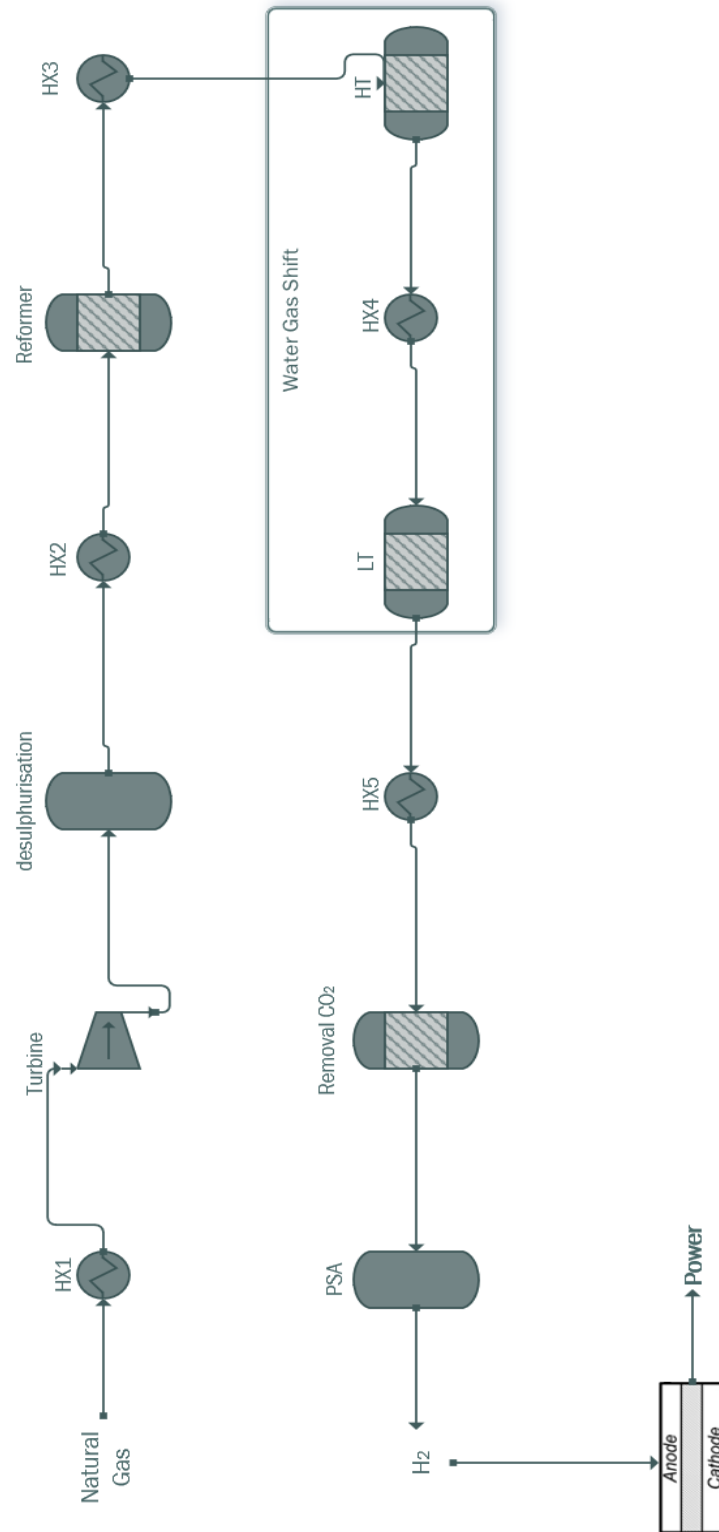


Εικόνα 4-7. Διαφορά συμπαγωγής με χωριστή παραγωγή Η.Ε & θερμότητας. (Παραγωγή ενέργειας από συμβατικά ορυκτά καύσιμα και εναλλακτικές πηγές ενέργειας)

#### 4.5. Φυσικό αέριο και ηλεκτρική ενέργεια

Κάθε χρόνο εξελίσσεται ο ενεργειακός μετασχηματισμός της Ελλάδας με βάση τις ανάγκες της κοινωνίας και της οικονομίας. Προφανώς η βασική κολώνα αυτού του ενεργειακού μετασχηματισμού είναι η ΔΕΗ, η οποία χρειάζεται να εκσυγχρονίσει τις υπηρεσίες της διότι «σβήνει» σιγά σιγά ο λιγνίτης (11% από την συνολική παραγόμενη ενέργεια) και στην θέση του έρχεται πρώτα το φυσικό αέριο και έπειτα οι Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας. Το φυσικό αέριο το οποίο αποτελείται κυρίως από μεθάνιο θα αρχίσει να παίρνει την θέση του λιγνίτη καθώς μια μέθοδος για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας είναι με την χρήση του υδρογόνου προερχόμενο από το μεθάνιο του φ.α. Με αυτόν τον τρόπο η ατμοσφαιρική ρύπανση θα μειωθεί σε μεγάλο βαθμό. Σε παρακάτω κεφάλαιο αναλύεται λεπτομερώς πως μπορεί να παραχθεί η ηλεκτρική ενέργεια με την χρήση του  $H_2$ .

## 5. Μονάδα Παραγωγής Ηλεκτρικής Ενέργειας



Η παραπάνω διαδικασία είναι μια τυπική μονάδα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας η οποία έχει ως πρώτη ύλη το φυσικό αέριο. Από το φυσικό αέριο γίνεται η παραγωγή του υδρογόνου το οποίο στην συνέχεια θα εισέλθει στην κυψέλη καυσίμου σαν καύσιμο έτσι ώστε να παραχθεί ηλεκτρική ενέργεια. Η δέσμευση του άνθρακα αναλύεται στο κεφάλαιο 6, με την πιο ευρέως χρησιμοποιούμενη να είναι η μονάδα CSS. Στις παρακάτω υποενότητες περιγράφονται αναλυτικά οι διεργασίες που πραγματοποιούνται σε αυτό το σύστημα. Αρχικά, γίνεται η παραδοχή για την επιλογή ενός συγκεκριμένου τύπου κυψέλης καυσίμου ώστε να γίνει μια πιο ρεαλιστική προσέγγιση.

Ο τύπος αυτός είναι η κυψέλη καυσίμου SOFC η οποία παράγει ηλεκτρική ενέργεια με ηλεκτροχημικά μέσα και όχι με καύση. Τα SOFC λειτουργούν στα 10,1 bar και στους 950 °C. Τα SOFC είναι κατασκευασμένα έτσι ώστε το καύσιμο που παρέχεται στην άνοδο να μπορεί να διατηρείται ξεχωριστό από την πηγή οξυγόνου στην κάθοδο και μόνο τα ιόντα οξυγόνου να μεταφέρονται από την κάθοδο στην πλευρά της ανόδου. Αυτό εμποδίζει την ανάμειξη των καυσαερίων ανόδου και καθόδου, και ως αποτέλεσμα, ο αέρας μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως πηγή οξυγόνου χωρίς να αραιωθεί η εξάτμιση καυσίμου με άζωτο. Επιπλέον, η ίδια η κυψέλη καυσίμου είναι πιο αποδοτική από την καύση, καθώς δεν υπόκειται στους θερμοδυναμικούς περιορισμούς μιας θερμικής μηχανής.

Για την καλύτερη κατανόηση της παραπάνω διεργασίας δίνεται ένα παράδειγμα, έστω ότι εισέρχεται φυσικό αέριο σε 30 bar και 38°C, που περιέχει 93,9 mol% CH<sub>4</sub>, 3,2% αιθάνιο, 0,7% προπάνιο, 0,4% n-βουτάνιο, 1% CO<sub>2</sub> και το υπόλοιπο N<sub>2</sub>. Πρόκειται για την ίδια σύνθεση αερίου και συνθήκες εισόδου που χρησιμοποιούνται στη μονάδα συνδυασμένου κύκλου φυσικού αερίου (NGCC) με δέσμευση CO<sub>2</sub> που παρουσιάζεται στην «Βασική γραμμή κόστους και απόδοσης για εγκαταστάσεις ορυκτής ενέργειας» της NETL. Τόμος 1: Τελική έκθεση ασφαλτικού άνθρακα και φυσικού αερίου σε ηλεκτρική ενέργεια.

Για κάθε αντιδραστήρα θεωρούμε πτώση πίεσης 0,7 bar. Το πλούσιο σε H<sub>2</sub> καύσιμο τροφοδοτείται στην άνοδο SOFC, ενώ μια πηγή οξυγόνου παρέχεται στην κάθοδο (συνήθως αέρας). Τα μόρια οξυγόνου συναντούν ελεύθερα ηλεκτρόνια, παράγοντας ιόντα (O<sup>2-</sup>). Τα ιόντα διέρχονται μέσω του στερεού ηλεκτρολύτη και εισέρχονται στην άνοδο, αντιδρώντας με το καύσιμο και απελευθερώνοντας ηλεκτρόνια. Τα ηλεκτρόνια ταξιδεύουν μέσω του κυκλώματος, παράγοντας ισχύ και επιστρέφουν στην κάθοδο. Θεωρείται ότι είναι δυνατή η κατανάλωση έως και 92% του H<sub>2</sub> στις κυψέλες καυσίμου.

Επιπλέον, αυτή η διαδικασία παράγει νερό, παρά καταναλώνει. Επειδή όλες οι απαιτήσεις ατμού παρέχονται από την ανάκτηση νερού που παράγεται στις κυψέλες καυσίμου, δεν χρειάζεται να προστεθεί γλυκό νερό στη διαδικασία. Το νερό που παράγεται στη διαδικασία παραγωγής ενέργειας μπορεί να ανακυκλωθεί για το σκοπό αυτό, μειώνοντας την κατανάλωση νερού που αντλείται από το περιβάλλον.

Η ποσότητα μετατροπής μεθανίου στον αναμορφωτή ατμού έχει σημαντική επίδραση στην αποδοτικότητα του εργοστασίου στο σύνολό του. Η ανεπαρκής μετατροπή θα έχει ως αποτέλεσμα τόσο μειωμένη ποσότητα παραγωγής υδρογόνου όσο και υψηλότερο κίνδυνο εναπόθεσης άνθρακα, οδηγώντας σε χαμηλότερη παραγωγή ενέργειας SOFC και χαμηλότερες αποδόσεις. Η

μετατροπή μπορεί να βελτιωθεί μειώνοντας την πίεση αναμόρφωσης και/ή αυξάνοντας την αναλογία ατμού:μεθανίου.

Ωστόσο, οι περισσότεροι χρησιμοποιούν είτε αεριοστρόβιλο (GT), SOFC, είτε συνδυασμό και των δύο. Σε γενικές γραμμές, ο συνδυασμός ενός GT με ένα SOFC είναι μια πιο θερμοδυναμικά αποδοτική στρατηγική κύκλου κορυφής από ένα GT μόνο και, με τη σειρά του, ένα μόνο σύστημα SOFC είναι το πιο αποδοτικό. Επομένως, αυτές οι διαδικασίες δεν είναι πρακτικές για μακροπρόθεσμη βιομηχανική εφαρμογή. Το κόστος των SOFC είναι αβέβαιο κυμαίνεται από 500 \$/kW έως 1000 \$/kW. Αυτές οι τιμές περιλαμβάνουν τον εξοπλισμό, τα υλικά, την εγκατάσταση, την καλωδίωση και το εργατικό δυναμικό.

## 5.1. Αποθείωση

Γνωρίζουμε πως το φυσικό αέριο που προέρχεται από πετρελαιοπηγές περιέχει ενώσεις θείου σε έναν ορισμένο βαθμό και αναφέρεται με τον όρο “APG” (Associated petroleum gas). Το αέριο αυτό μπορεί να υφίσταται είτε ξεχωριστά από το πετρέλαιο, κατά τη διάρκεια του σχηματισμού (ελεύθερο αέριο), είτε μπορεί να διαλυθεί μέσα στο αργό πετρέλαιο. Ανεξάρτητα από την πηγή φυσικού αερίου, από τη στιγμή που διαχωρίζεται από το αργό πετρέλαιο, συνήθως συνυπάρχει σε ενώσεις μαζί με άλλους υδρογονάνθρακες όπως είναι το αιθάνιο, το προπάνιο, το βουτάνιο και το πεντάνιο. Ακόμη, το ακατέργαστο φυσικό αέριο που ανακτάται κατά τη διαδικασία παραγωγής πετρελαίου περιέχει ατμό, υδρόθειο ( $H_2S$ ) και διοξείδιο του άνθρακα ( $CO_2$ ), άζωτο ( $N_2$ ) και άλλες ενώσεις. Απόρροια αυτού είναι η δύσκολη μεταφορά του αερίου, που περιέχει τέτοιου είδους προσμίξεις, αλλά και η δυσκολία χρήσης του χωρίς να υπάρξει επεξεργασία. Ένας εξίσου σημαντικός λόγος όπου κρίνεται απαραίτητη η χρήση αποθειωτή είναι στην ύπαρξη του θείου το οποίο έχει την ικανότητα να απενεργοποιεί τους καταλύτες που χρησιμοποιούνται στους αναμορφωτές, τους αντιδραστήρες μετατόπισης και τις κυψέλες καυσίμου. Ειδικά για τις κυψέλες καυσίμου που χρησιμοποιούν ορυκτά καύσιμα είναι αναγκαία και απαραίτητη η αποθείωση.

Οι πετρελαιοπαραγωγοί δεν θεωρούσαν αυτό το αέριο αναγκαίο παρά μόνο περιττό και απλά το έκαιγαν. Πλέον, λόγω των περιβαλλοντικών συνθηκών αλλά και της οικολογικής συνείδησης το αέριο αυτό δεν καίγεται και γίνεται η εκμετάλλευση του ενεργειακά με διάφορους τρόπους:

- Προετοιμασία του αερίου ως καύσιμο σε διάφορες μορφές (αποξηραμένο αέριο αγωγού, υγροποιημένο φυσικό αέριο και εξαγωγή μέσω αγωγού).
- Επανέγχυση αερίου για μεταγενέστερη ανάκτηση.
- Παραγωγή ηλεκτρισμού για μεταφορά ή για τις επιτόπιες ανάγκες των μονάδων.
- Επεξεργασίες όπως η συμπίεση ή η υγροποίηση φυσικού αερίου και εξαγωγή μέσω δεξαμενών.
- Μετατροπή σε πρώτη ύλη για την πετροχημική βιομηχανία.
- Μετατροπή αερίου-σε-υγρά και αερίου-σε-στερεά.
- Μετατροπή σε άλλες μορφές ενέργειας για χρήσεις όπως η τηλεθέρμανση.

Ο όρος ποσοστό αποθείωσης είναι ο λόγος της ποσότητας του θείου που διαχωρίζεται στην πηγή καύσης σε μία δεδομένη περίοδο προς την ποσότητα του θείου που περιέχεται στο καύσιμο που εισάγεται στις εγκαταστάσεις της πηγής καύσης και χρησιμοποιείται κατά την ίδια περίοδο. Παρακάτω αναφέρουμε τεχνικές αποθείωσης, από την υγρή απόξεση μέχρι την υδροαποθείωση, και σε συνθήκες επεξεργασίας που κυμαίνονται από τις ατμοσφαιρικές μέχρι  $1200^{\circ}C$  και 50 bar.

Ο τύπος του καυσίμου αλλά και οι ανοχές σε θείο είναι αυτά που πρέπει να γνωρίζουμε για να δούμε ποια διαδικασία αποθείωσης είναι η πλέον κατάλληλη. Τα επιφανειακά προσροφητικά παρουσιάζουν μεγαλύτερο ενδιαφέρον για τα συστήματα κυψελών καυσίμου, καθώς μοιάζουν με μία απλή μέθοδο η οποία είναι ικανή να μειώσει την περιεκτικότητα σε θείο. Ένα μειονέκτημα του επιφανειακού προσροφητικού είναι η ανάγκη που προκύπτει είτε για αντικατάσταση είτε για

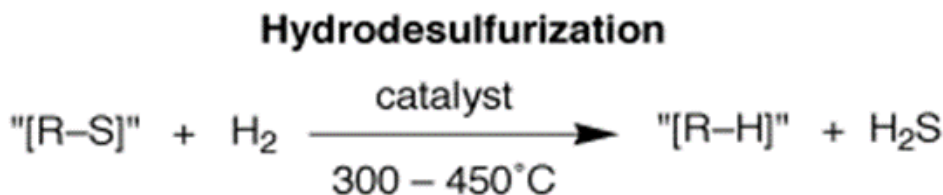
αναγέννηση. Το θειούχο υδρογόνο μπορεί να απομακρυνθεί από ένα ρεύμα αερίου σε θερμοκρασίες που κυμαίνονται από 300°C - 550°C.

Δεν υπάρχει αμφιβολία πως υπάρχουν διάφοροι τρόποι διαχείρισης των εκπομπών του διοξειδίου του θείου. Αρχικά το περιεχόμενο θείο στο καύσιμο ή στο μέταλλευμα θα ήταν εφικτό να αφαιρεθεί πριν από τη χρήση, κάτι τέτοιο όμως, πρακτικά, δεν θα σύμφερε οικονομικά παρά μόνο εάν το ποσοστό αφαίρεσης του θείου ήταν πολύ μικρό. Έπειτα, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένα διαφορετικό καύσιμο ή μέταλλευμα που η περιεκτικότητα σε θείο να μην είναι τόσο υψηλή, ή ακόμη να γίνει βελτίωση της αποτελεσματικότητας της βιομηχανικής διαδικασίας, έτσι ώστε να μικρύνει η απαίτηση σε ποσότητα του καυσίμου. Ακόμη μπορεί να αφαιρείται καθ' όλη τη διάρκεια της χρήσης όμως στις περισσότερες εφαρμογές προτιμάται η αφαίρεση του διοξειδίου του θείου πριν αυτό απελευθερωθεί στην ατμόσφαιρα. Πολλές διαφορετικές τεχνολογίες έχουν αναπτυχθεί γι' αυτό το σκοπό.

### Αποθείωση και Υδροαποθείωση

Αποθείωση είναι η πρώτη επεξεργασία την οποία υφίσταται το πετρέλαιο στα διυλιστήρια και έχει σκοπό να απομακρύνει τις θειούχες προσμείξεις, οι οποίες κατά την καύση τους παράγουν ρύπους όπως είναι τα οξείδια του θείου (SO<sub>x</sub>).

Οι μεγαλύτερες πετρελαιοπαραγωγές χώρες του κόσμου, όπως η Σαουδική Αραβία, η Ρωσία και η ΗΠΑ θεσπίζουν ολόένα και αυστηρότερα όρια όσον αφορά την περιεκτικότητα της βενζίνης σε θείο. Επειδή λοιπόν οι καταλυτικές διεργασίες που εφαρμόζονται μέχρι στιγμής, όπως οι απλές αντιδράσεις πυρόλυσης, αλκυλίωσης, ισομερισμού και αποθείωσης δεν έχουν επιφέρει τις επιθυμητές αλλαγές στον τύπο των καταλυτών που χρησιμοποιούνται, τα διυλιστήρια πετρελαίου υιοθέτησαν μια νέα διεργασία που ονομάζεται υδροαποθείωση (Hydrodesulfurization-HDS). Η υδροαποθείωση είναι μια πιο πολύπλοκη μέθοδος για την αφαίρεση θείου από θειούχα καύσιμα, που αποσκοπεί στη μείωση των εκπομπών διοξειδίου του θείου τα οποία συμβάλλουν στην πρόκληση περιβαλλοντικών προβλημάτων. Τα θειούχα κλάσματα αναμειγνύονται με υδρογόνο και έναν καταλύτη κοβαλτίου-μολυβδαινίου, παράγοντας υδρόθειο. Ωστόσο, ο εφοδιασμός της παραπάνω διεργασίας με υδρογόνο στοιχίζει ακριβά, και καθώς τα πετρέλαια γίνονται όλο και πιο όξινα, απαιτούνται υψηλότερες πιέσεις και σταθερότεροι καταλύτες για τη διάσπαση των δεσμών του θείου.



Εικόνα 5-1. Υδροαποθείωση. (Hydrodesulfurization and Hydrodenitrogenation)

### Διεργασία αποθείωσης FGD

Η μέθοδος FGD (Flue Gas Desulfurization) είναι πολύ σημαντική και εφαρμόζεται σε πολλές περιπτώσεις όπως είναι για παράδειγμα οι σταθμοί παραγωγής ενέργειας με σκοπό την μείωση

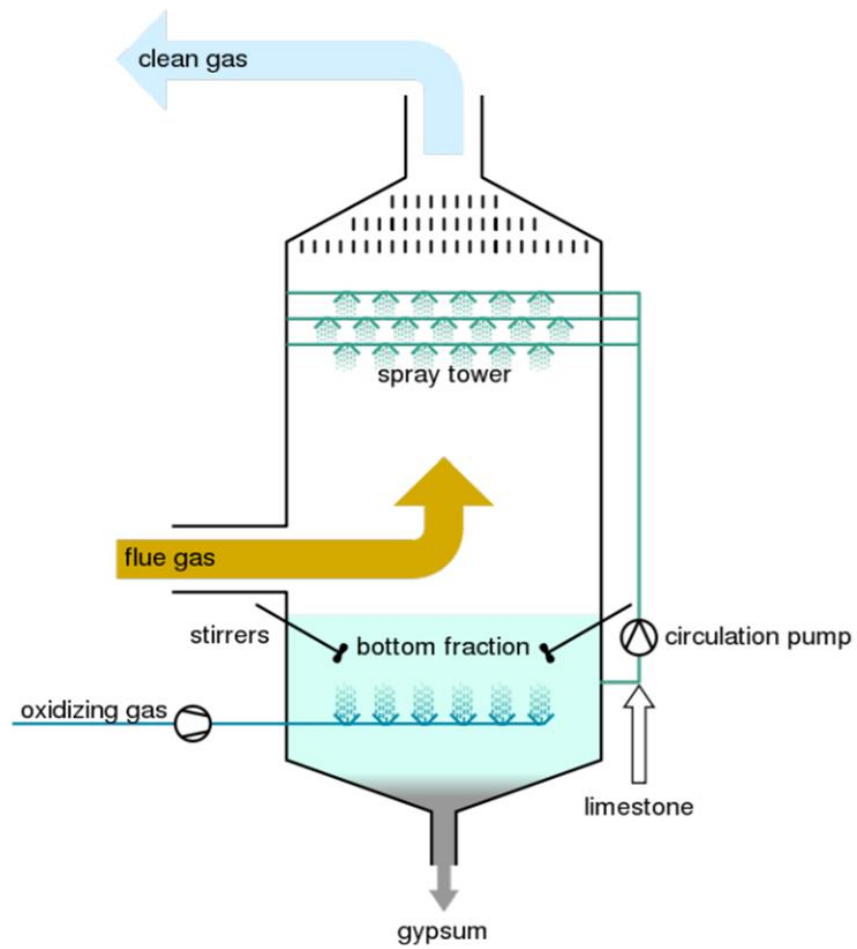


εκπομπών σε θείο ώστε να βελτιωθεί σημαντικά η ποιότητα της ατμόσφαιρας και κατά συνέπεια της ανθρώπινης υγείας. Ο στόχος είναι να γίνεται αφαίρεση του διοξειδίου του θείου από τα καυσαέρια πριν απελευθερωθούν πρώτα στην ατμόσφαιρα. Αυτό μπορεί να συμβεί όταν πραγματοποιείται η αντίδραση με κατάλληλη αλκαλική ουσία όπως είναι ο ασβεστόλιθος, ή ο άσβεστος, ή το ανθρακικό νάτριο ακόμα και η αμμωνία. Συγκεκριμένα, καθώς αντιδρούν τα αλκάλια με το διοξείδιο του άνθρακα παράγονται θειικά άλατα, όμως σε μερικές διεργασίες μετατρέπονται και σε θειικό νάτριο  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ . Οι διεργασίες FGD είναι:

- Οξείδωση και κρυστάλλωση:  $\text{CaCO}_3 + \frac{1}{2} \text{O}_2 \rightarrow \text{CaSO}_4 + 2 \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CaSO}_4 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$
- Εξουδετέρωση:  $\text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{SO}_3 \rightarrow \text{CaSO}_3 + \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$   
 $\text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{SO}_4 \rightarrow \text{CaSO}_4 + \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$
- Απορρόφηση:  $\text{SO}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_2\text{SO}_3$   
 $\text{SO}_3 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_2\text{SO}_4$
- Υγρές διεργασίες
- Ξηρές ή ημικατεργασμένες διεργασίες

Στην υγρή μέθοδο, το καυσαέριο και το αλκάλιο αλληλεπιδρούν σε έναν πύργο ψεκασμού και αφού το διοξείδιο του θείου διαλύεται στο νερό δημιουργείται έτσι ένα διάλυμα οξέος που τελικά εξουδετερώνεται από το αλκαλικό διάλυμα.

Στην ξηρή μέθοδο, με έγχυση του αλκαλίου στο αέριο ρεύμα ή με διέλευση του καυσαερίου μέσω μιας κλίνης αλκαλίων έρχεται σε επαφή το καυσαέριο με το αλκαλικό προσροφητικό μέσο ( $\text{NaHCO}_3$ ). Και στις δύο περιπτώσεις το  $\text{SO}_2$  αντιδρά κατευθείαν με το στερεό με αποτέλεσμα να σχηματιστεί θειώδες και θειικό άλας.



Εικόνα 5-2. Σχηματική απεικόνιση του απορροφητή μίας FGD. (Αποθείωση καυσαερίων)

## 5.2. Αναμορφωτής

Οι αναμορφωτές είναι απαραίτητοι σε μία διάταξη παραγωγής υδρογόνου αφού προς το παρόν δεν υπάρχει οργανωμένη υποδομή για την παράδοση του, αλλά κυρίως δεν υπάρχουν αποτελεσματικοί και ασφαλείς τρόποι για την αποθήκευση ώστε να διατεθεί για άμεση χρήση. Η αναμόρφωση ατμού μεθανίου (SMR) έχει υψηλή απόδοση υδρογόνου σε ποσοστό περίπου 74% και εκτιμάται ότι παράγει υδρογόνο με κόστος σχεδόν 1,8 \$/kg. Η αναμόρφωση ατμού CH<sub>4</sub> είναι η πιο κοινή και οικονομικά αποδοτική μέθοδος για την παραγωγή υδρογόνου και συμβάλλει περίπου στο 50% της παγκόσμιας παραγωγής υδρογόνου όπως προαναφέρθηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο. Βιομηχανικά, για να ληφθεί ένα εξαιρετικά καθαρό ρεύμα υδρογόνου, είναι απαραίτητα διάφορα βήματα, όπως η μείωση της περιεκτικότητας σε μονοξείδιο του άνθρακα στο ρεύμα αναμόρφωσης από αντιδραστήρες μετατόπισης αερίου νερού, μια στήλη προσρόφησης ταλάντευσης πίεσης (PSA), και περαιτέρω συσκευές διαχωρισμού/καθαρισμού υδρογόνου.

Ενώσεις και υλικά τα οποία περιέχουν H<sub>2</sub> όπως για παράδειγμα η μεθανόλη, το φυσικό αέριο αλλά και παράγωγα του πετρελαίου μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως καύσιμο σε μια κυψέλη καυσίμου που βασίζεται κυρίως στο υδρογόνο.

Όπως αναφέραμε η διαδικασία της αναμόρφωσης (reforming) είναι θεμελιώδης για ένα τέτοιο σύστημα καθώς το υδρογόνο που παράγεται από τα παραπάνω υλικά μπορεί να έχει πολλαπλές εφαρμογές, όπως είναι για παράδειγμα η κίνηση ενός οχήματος χωρίς να απαιτείται αποθήκευση του υδρογόνου πρώτα.

Σε αυτό το σημείο αξίζει να αναφέρουμε πως υπάρχουν 3 διαφορετικές κλίμακες, μικρή, μεσαία, μεγάλη κατά τις οποίες μπορεί να γίνει η αναμόρφωση και θα αναφέρουμε ένα παράδειγμα για την κάθε μία από αυτές. Η παραγωγή του H<sub>2</sub> σε υγρή μορφή αφότου το καύσιμο έχει δεχτεί επεξεργασία σε μεγάλα εργοστάσια παραγωγής, είναι ένα παράδειγμα της μικρής κλίμακας, ενώ στην μεσαία κλίμακα θεωρούνται οι ήδη υπάρχοντες σταθμοί ανεφοδιασμού. Καταλήγοντας, υπάρχει και η δυνατότητα της τοπικής αναμόρφωσης ώστε να τροφοδοτηθεί άμεσα μια κυψέλη καυσίμου, όπως για παράδειγμα σε ένα όχημα το οποίο τροφοδοτείται αρχικά με συμβατική βενζίνη και στη συνέχεια την μετατρέπει σε υδρογόνο προς χρήση στην κυψελίδα καυσίμου.

Στην συγκεκριμένη εργασία για την παραγωγή του υδρογόνου ως τελικό προϊόν χρησιμοποιούμε αναμόρφωση ατμού μεθανίου (SMR), μια διαδικασία κατά την οποία το μεθάνιο από φυσικό αέριο θερμαίνεται, με ατμό και καταλύτη, για την παραγωγή συνθετικού καυσίμου. Η αντίδραση αναμόρφωσης με ατμό πραγματοποιείται σε δύο αντιδραστήρες, στον πρωτεύοντα αναμορφωτή και στον δευτερεύοντα αναμορφωτή. Η βασική αντίδραση που γίνεται στον αναμορφωτή με ατμό είναι:

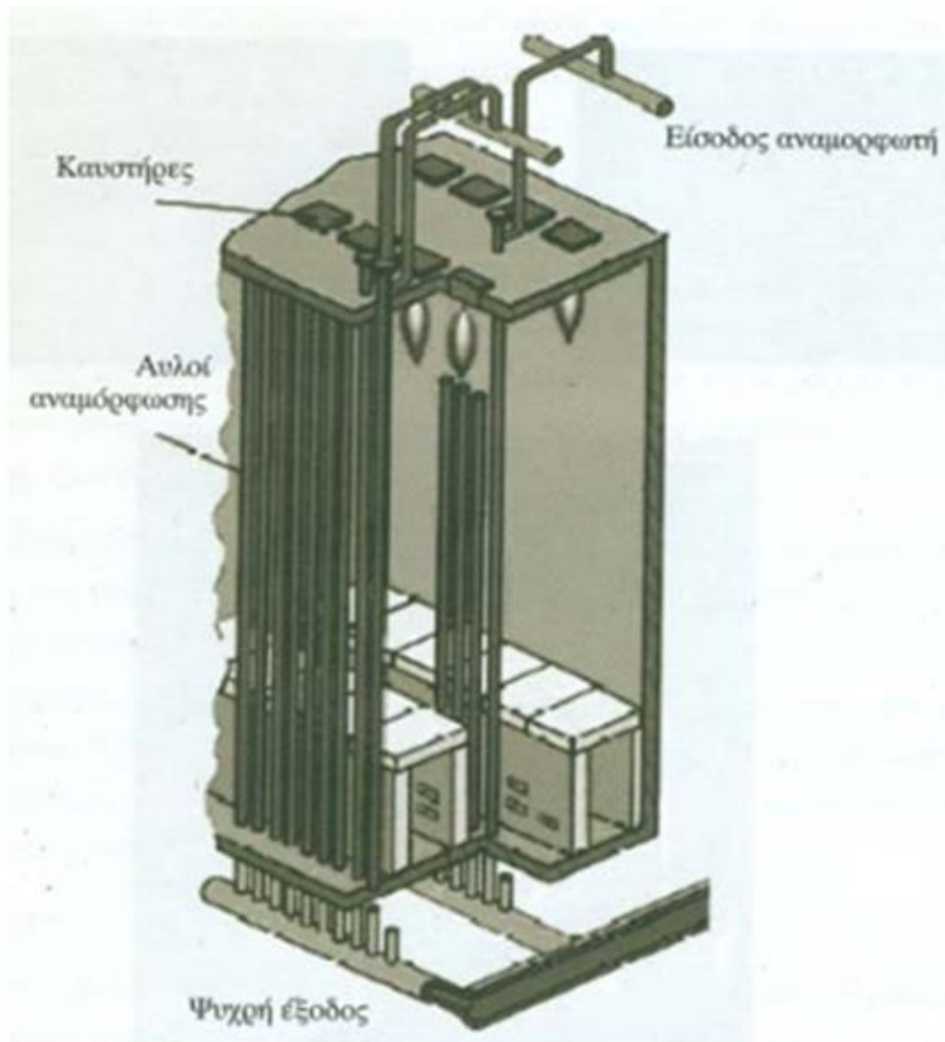


Το αέριο σύνθεσης που παράγεται στους αναμορφωτές περνάει από τους αναμορφωτές του CO, από στήλες απομάκρυνσης του CO<sub>2</sub>, παραγωγούς μεθανίου και τον κρυογενικό καθαριστή πριν μπει στον αντιδραστήρα παραγωγής υδρογόνου. Ο επιπρόσθετος κρυογενικός καθαριστής μπορεί να αυξήσει την καθαρότητα του αερίου σύνθεσης και μετά να μειώσει το φορτίο στην κατεργασία του αερίου που απομακρύνεται.

Ο πρωτεύων αναμορφωτής μπορεί να μετατρέψει το μεγαλύτερο μέρος της τροφοδοσίας, δηλαδή το μεθάνιο σε μίγμα CO-H<sub>2</sub> πάνω από την καταλυτική κλίνη. Μια τυπική συγκέντρωση μεθανίου (σε ξηρή βάση) στο αέριο που εξέρχεται από τον πρωτεύοντα αναμορφωτή για ένα συμβατικό εργοστάσιο που βασίζεται κατά 65% σε τροφοδοσία μεθανίου είναι περίπου 14%/mol. Ο πρωτεύων αναμορφωτής κατά βάση λειτουργεί στους 750-850°C και 30,62-34 atm. Αν και η αντίδραση αναμόρφωσης με ατμό μπορεί να αυξήσει τον όγκο του αερίου οι καθιερωμένοι σχεδιασμοί διαλέγουν υψηλή πίεση για τον αναμορφωτή με ατμό. Αυτό συμβαίνει διότι προκύπτουν τα παρακάτω 4 πλεονεκτήματα:

- Μειωμένο έργο συμπίεσης του ρεύματος εξόδου,
- Μεγαλύτερη ανάκτηση θερμότητας από την συμπύκνωση του ρεύματος,
- Πιο συνεπτυγμένος σχεδιασμός εξοπλισμού και
- Το διαθέσιμο υψηλής πίεσης φυσικό αέριο.

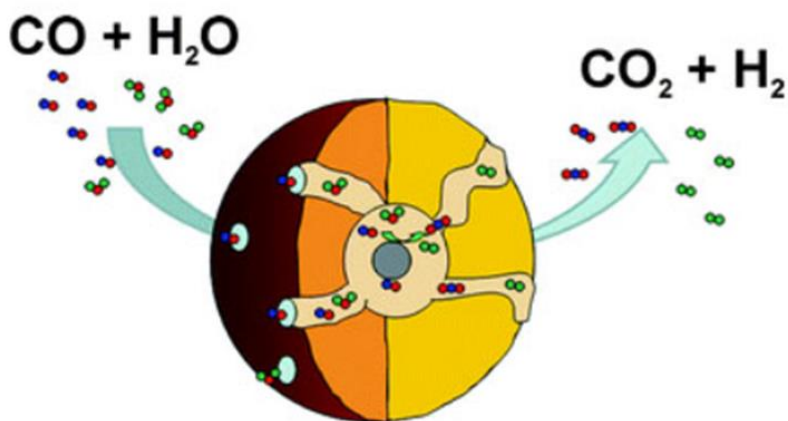
Η αναμόρφωση με ατμό είναι μια ενδόθερμη αντίδραση που απαιτεί εξωτερική θερμότητα από ένα καύσιμο. Ως καύσιμο στο λέβητα του αναμορφωτή με ατμό θα μπορούσε να είναι η τροφοδοσία, το αέριο σύνθεσης ή το αέριο που απομακρύνεται. Ο λέβητας λειτουργεί στους 732-926°C. Το υψηλής θερμοκρασίας καυσαέριο από τον λέβητα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή ατμού. Ο δευτερεύων αναμορφωτής μπορεί να αυξήσει παραπάνω τον ρυθμό μετατροπής της τροφοδοσίας. Τυπικά η συγκέντρωση του μεθανίου μπορεί να μειωθεί στο 0,5% ή χαμηλότερα (σε ξηρή βάση) στον δευτερεύοντα αναμορφωτή, πράγμα που σημαίνει ότι η εισαγωγή του μεθανίου θα είναι μικρότερη, όμως η ροή εισαγωγής του ατμού θα είναι ίδια και άρα ο δευτερεύων αναμορφωτής θα χρειάζεται μεγαλύτερη θερμοκρασία λειτουργίας για να φτάσει τις κρίσιμες απαιτήσεις ισορροπίας του.



Εικόνα 5-3. Σχηματική αναπαράσταση βιομηχανικού αντιδραστήρα αναμόρφωσης για την παραγωγή υδρογόνου. (ΜΑΡΤΑΒΑΛΤΖΗ, 2010)

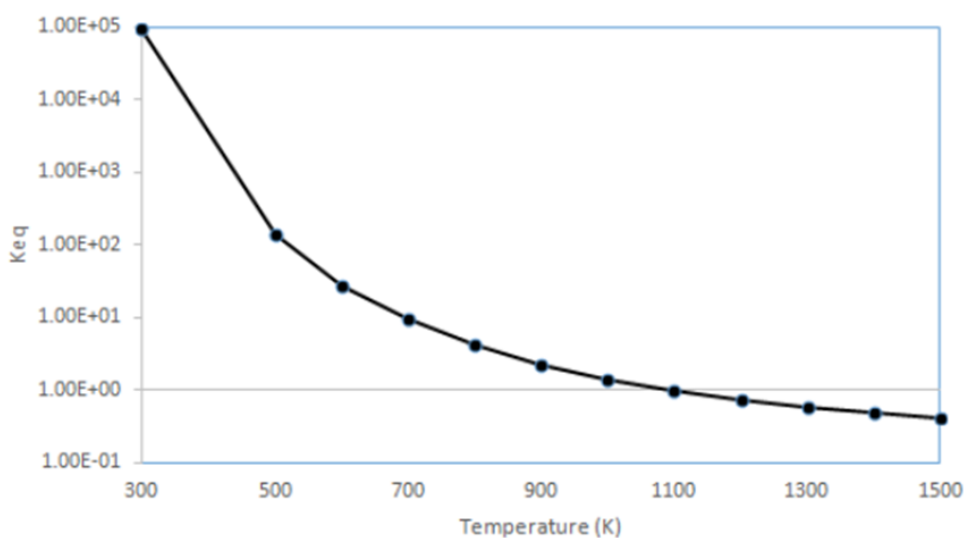
### 5.3. Αντίδραση μετατόπισης νερού/αερίου -Water Gas Shift

Οι αντιδραστήρες WGS είναι συνεχείς αντιδραστήρες σταθερής κλίνης με εμβολική ροή. Οι αντιδράσεις που πραγματοποιούνται εκεί είναι κυρίως εξώθερμες. Σε διαδικασίες σύνθεσης αερίου όπου μεγιστοποιείται η παραγωγή υδρογόνου, συνήθως χρησιμοποιείται η χρήση αντιδραστήρα μετατόπισης αερίου νερού. Αυτοί οι αντιδραστήρες μετατοπίζουν ένα μέρος της περιεκτικότητας από CO του αερίου σύνθεσης, σε CO<sub>2</sub> και επιπλέον H<sub>2</sub> μέσω της αντίδρασης μετατόπισης αερίου νερού που δίνεται παρακάτω.

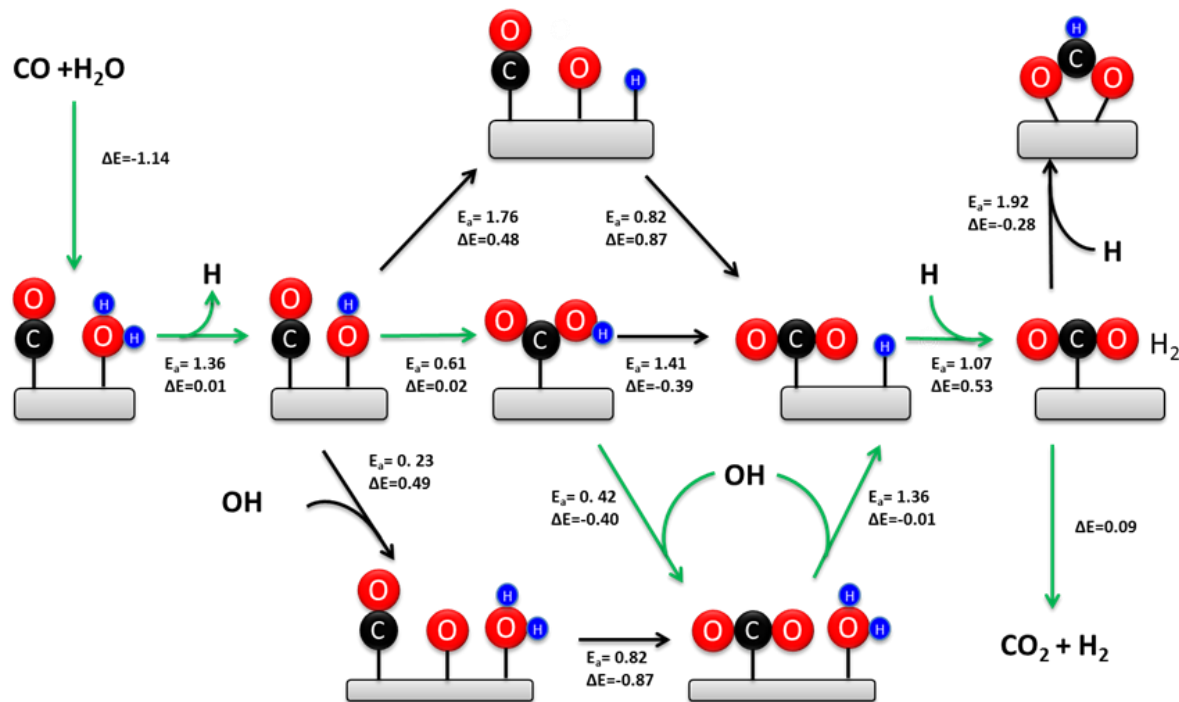


Εικόνα 5-4. Σχηματική αναπαράσταση παραγωγής CO<sub>2</sub> και H<sub>2</sub>. (Water Gas Shift)

Η αντίδραση αυτή εξαρτάται σημαντικά από την θερμοκρασία, δηλαδή σε χαμηλές θερμοκρασίες παράγεται μεγάλες ποσότητες υδρογόνου, ενώ αυξάνεται και η σταθερά της ισορροπίας.

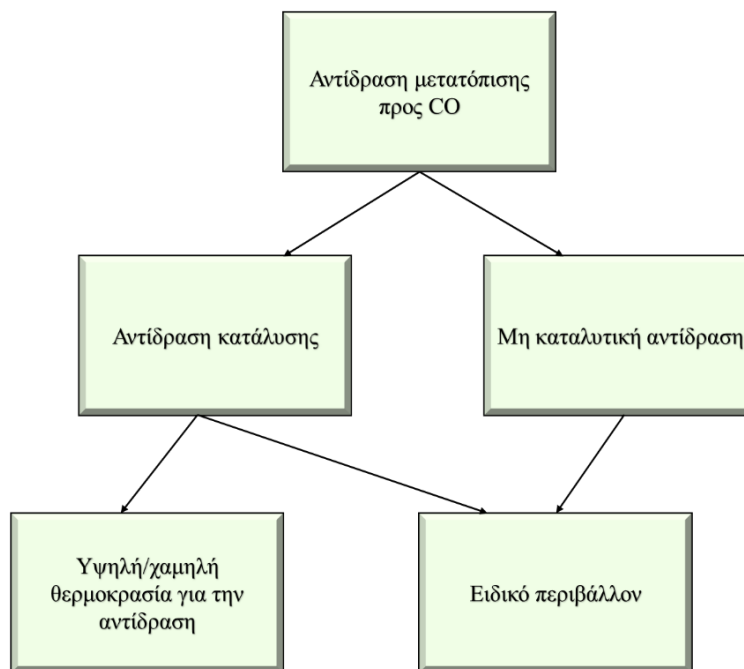


Εικόνα 5-5. Γραφική παράσταση θερμοκρασίας και σταθερά ισορροπίας. (Wei-Hsin Chen C.-Y. C.)



Εικόνα 5-6. Προτεινόμενοι συσχετιστικοί και οξειδοαναγωγικοί μηχανισμοί της αντίδρασης μετατόπισης αερίου νερού. (Water-gas shift reaction)

Για την επεξεργασία της μετατροπής των  $\text{CO}$  και  $\text{H}_2\text{O}$  σε  $\text{CO}_2$  και  $\text{H}_2$ , αντίστοιχα, ανάλογα με το αν χρησιμοποιούνται καταλύτες, η WGSR μπορούν να ταξινομηθούν σε καταλυτική WGSR και μη-καταλυτικά WGSR, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



Εικόνα 5-7. Ταξινόμηση της αντίδρασης μετατόπισης αερίου νερού. (Wei-Hsin Chen C.-Y. C., 2020)

Στην πράξη, οι καταλύτες είναι απαραίτητοι στο WGSR για εμπορικές εφαρμογές στη βιομηχανία σήμερα. Αυτό συνεπάγεται, με τη σειρά του, ότι η χημική κινητική είναι ένα σημαντικό ζήτημα όταν πρόκειται για το WGSR. Κατά συνέπεια, στην παρακάτω συζήτηση, θα απεικονιστεί η θερμοδυναμική και η κινητική του WGSR.

### Αναμόρφωση του CO

Η αναμόρφωση του CO (ή αντίδραση αναμόρφωσης αερίου με νερό) είναι μια ευρέως χρησιμοποιούμενη τεχνολογία για την απομάκρυνση του CO από το αέριο σύνθεσης που παράγεται από τον αναμορφωτή με ατμό ή από την μερική οξείδωση. Η αντίδραση αναμόρφωσης του CO φαίνεται στην εξίσωση:



Είναι μια εξώθερμη αντίδραση που ευνοείται από χαμηλή θερμοκρασία και είναι ανεξάρτητη της πίεσης από την καθαρή πλευρά της ισορροπίας. Παρ'όλα αυτά εφαρμόζεται συχνά υψηλή πίεση περίπου 400-500 psig, ώστε να μην απαιτείται υψηλή θερμοκρασία και κατανάλωση ατμού. Εννοιολογικά, όταν CO και H<sub>2</sub>O συνυπάρχουν σε ένα σύστημα, το WGSR πρέπει να ενεργοποιηθεί. Ωστόσο, στην πράξη, η αντίδραση δεν θα προχωρήσει εάν η θερμοκρασία της αντίδρασης είναι χαμηλή λόγω του ενεργειακού φραγμού της αντίδρασης. Κατά συνέπεια, απαιτούνται καταλύτες για να μειώσουν την ενέργεια ενεργοποίησης και να ξεπεράσουν το ενεργειακό φράγμα του WGSR. Τυπικά η αντίδραση αναμόρφωσης του CO συμβαίνει σε δύο στάδια τον μετατροπέα υψηλής θερμοκρασίας (HTS) και τον μετατροπέα χαμηλής θερμοκρασίας (LTS). Ο πρώτος αντιδραστήρας είναι εξοπλισμένος με καταλύτη σιδήρου-χρωμίου. Το αέριο σύνθεσης συχνά μπαίνει στον αντιδραστήρα HTS στους 320-350°C και εξέρχεται με μια αύξηση. Ο αντιδραστήρας LTS περιέχει καταλύτη χαλκού-ψευδαργύρου-αλουμίνης και λειτουργεί στους 200-250°C. Ο αναμορφωτής υψηλής θερμοκρασίας στοχεύει σε μεγάλη μετατροπή του CO και τυπικά θα μειώσει την συγκέντρωση του CO στο αέριο σύνθεσης περίπου από 2-4% κ.ο. ενώ ο αναμορφωτής χαμηλής θερμοκρασίας μπορεί να κατεργαστεί ίχνη CO και να μειώσει την συγκέντρωση περίπου στο 0,1-0,3% κ.ο.. Η μετάβαση από τον αντιδραστήρα HTS στον LTS απαιτεί ψύξη του συστήματος. Αφενός, ο νόμος Arrhenius αποκαλύπτει ότι η αύξηση της θερμοκρασίας αντίδρασης μπορεί να διευκολύνει τον ρυθμό αντίδρασης. Από την άλλη πλευρά, σύμφωνα με τη θερμοδυναμική ή την αρχή του Le Chatelier, μια χαμηλότερη θερμοκρασία αντίδρασης είναι ευνοϊκή για ανώτερη μετατροπή CO ή απόδοση υδρογόνου ως συνέπεια της σχετικής εξώθερμικής αντίδρασης. Γενικά, το HTSR διέπεται από χημική κινητική, ενώ το LTSR κυριαρχείται από θερμοδυναμική ισορροπία. Για το λόγο αυτό, για να αυξηθεί η μετατροπή του CO, η παραγωγή υδρογόνου και ο εμπλουτισμός του CO<sub>2</sub> στους επιρροές, το WGSR εκτελείται συχνά σε δύο στάδια. Με λίγα λόγια, στο πρώτο στάδιο, το HTSR ενεργοποιείται σε υψηλότερες θερμοκρασίες για να επιταχύνει τη χημική αντίδραση και τη μετατροπή CO σε σύντομο χρονικό διάστημα. Στη συνέχεια, στο δεύτερο στάδιο, το LTSR ενεργοποιείται σε χαμηλότερες θερμοκρασίες για περαιτέρω ώθηση της προς τα εμπρός αντίδρασης του WGSR για εμπλουτισμό CO<sub>2</sub> και H<sub>2</sub> στα λύματα.

### Καταλύτης μετατόπισης υψηλής θερμοκρασίας

Παλαιότερες μελέτες έχουν δείξει ότι οι καταλύτες μετατόπισης υψηλής θερμοκρασίας περιλαμβάνουν καταλύτες με βάση Fe-Cr και Ni. Λόγω των περιορισμών των



εμπορευματοποιημένων καταλυτών μετατόπισης υψηλής θερμοκρασίας, έχουν αναπτυχθεί ορισμένες βελτιώσεις, όπως η αντικατάσταση μέρους των μετάλλων με κάποιο τροποποιητή ή το ντόπινγκ ορισμένων αλκαλίων.

Αν και οι καταλύτες με βάση το Fe-Cr χρησιμοποιούνται ευρέως για το HTSR, η ανησυχία για τη ρύπανση χρωμίου στο περιβάλλον έχει εμποδίσει την ανάπτυξή του. Άλλα εναλλακτικά μέταλλα εφαρμόζονται έτσι στο HTSR. Το Cerium (Ce) και το Cobalt (Co) έχουν βρεθεί ότι είναι μια καλή επιλογή για HTSC χωρίς Cr. Ο λόγος Fe/Ce/Co 10:1:1,5 επαληθεύτηκε πειραματικά ως η καλύτερη αναλογία ανάμειξης, αποδίδοντας τον υψηλότερο ρυθμό αντίδρασης (62,6  $\mu\text{mol/g/s}$ ) σε σύγκριση με τις άλλες αναλογίες ανάμειξης (από 30,7 έως 52,2  $\mu\text{mol/g/s}$ ). Οι πιθανοί λόγοι περιλαμβάνουν τη μεγαλύτερη επιφάνεια, τη διαταραχή του πλέγματος και την αναγωγικότητα αυτής της αναλογίας, τα οποία επωφελήθηκαν όλα όσα θεωρούνται το στάδιο καθορισμού της ταχύτητας του WGSR: η διάσταση του νερού στον καταλύτη.

Ένα άλλο πρόβλημα για τους εμπορικούς καταλύτες Fe-Cr είναι η μέγιστη θερμοκρασία λειτουργίας του γύρω στους 470°C, η οποία περιορίζει τις εφαρμογές τους σε ορισμένα περιβάλλοντα υψηλής θερμοκρασίας (π.χ. συστήματα αεριοποίησης άνθρακα). Διερεύνησαν τον καταλύτη La-Ce-FeO<sub>3</sub> που μοιάζει με περοβσκίτη, ο οποίος έχει τη δυνατότητα να λειτουργήσει σε θερμοκρασίες 550-600°C. Η κινητική μελέτη τους έδειξε ότι η απόδοση του καταλύτη είναι συγκρίσιμη με τους εμπορικούς καταλύτες Fe-Cr που χρησιμοποιήθηκαν σε θερμοκρασίες 300-500°C. Η μεταβολή της θερμοκρασίας απέδωσε μια παρόμοια σειρά αντίδρασης, η οποία υπονοούσε ότι η διαφορά θερμοκρασίας ήταν λιγότερο σημαντική για την κινητική από αυτόν τον καταλύτη. Η συγκέντρωση CO έχει σημαντικό αντίκτυπο στο συνολικό ρυθμό αντίδρασης, ως συνέπεια της υψηλότερης τάξης αντίδρασης, ενώ η επίδραση που προκλήθηκε από το νερό είναι αμελητέα. Η παρουσία του CO<sub>2</sub> θα βγάξει τον ρυθμό αντίδρασης πίσω και η επίδραση του υδρογόνου στη συνολική ταχύτητα αντίδρασης είναι μικρή λόγω της χαμηλής τάξης αντίδρασης.

#### Καταλύτης μετατόπισης χαμηλής θερμοκρασίας

Εκτός από τους εμπορικούς καταλύτες μετατόπισης χαμηλής θερμοκρασίας (LTSC), όπως ο καταλύτης με βάση το Cu-Zn, αρκετοί υποψήφιοι για να είναι LTSC, συμπεριλαμβανομένων των Au και Pt, έχουν ερευνηθεί σε προηγούμενες μελέτες. Οι επιδράσεις της στήριξης, της δομής και του μεγέθους του καταλύτη στην απόδοση των καταλυτών έχουν επίσης μελετηθεί.

Ο επιστήμονας Hossain αξιολόγησε την κινητική αναγωγής των Cu-Fe-Mn, Cu-Fe-Cr και των εμπορικών καταλυτών CuO-ZnO/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> σε έναν αντιδραστήρα σταθερής κλίνης χρησιμοποιώντας προγραμματισμένη μείωση θερμοκρασίας για την εκτέλεσή τους. Η αναγωγιμότητα παρουσίασε μια σημαντική σχέση με τη δραστηριότητα των καταλυτών οξειδίου μετάλλου. Το πρόσθετο Mn ενίσχυσε σημαντικά τα ενεργά είδη Cu. Ο καταλύτης Cu-Fe-Mn εμφάνισε χαμηλότερη φαινομενική ενέργεια ενεργοποίησης σε σύγκριση με τον καταλύτη Cu-Fe-Cr. Εν τω μεταξύ, ο υψηλότερος προ-εκθετικός παράγοντας αποκτήθηκε από τον καταλύτη Cu-Fe-Mn. Ομοίως, ο υψηλότερος ρυθμός μετατροπής CO στον αντιδραστήρα στους 300°C βρέθηκε με την περίπτωση Cu-Fe-Mn (125 mmol/g/hr) ενώ ο καταλύτης Cu-Fe-Cr έδειξε χαμηλότερο ρυθμό αντίδρασης (118 mmol/g/hr).

## 5.4. Στήλη PSA

Η προσρόφηση ταλάντευσης πίεσης (PSA) είναι μια πολύ ευέλικτη τεχνολογία για το διαχωρισμό και τον καθαρισμό του μίγματος αερίου. Μερικές από τις βασικές βιομηχανικές εφαρμογές που περιλαμβάνει είναι

- α) ξήρανση αερίων
- β) ανάκτηση ατμού με διαλύτη
- γ) κλασματοποίηση αέρα
- δ) παραγωγή υδρογόνου από αναμόρφωση ατμού-μεθανίου (SMR)
- ε) διαχωρισμό  $\text{CO}_2$  και  $\text{CH}_4$  από αέριο υγειονομικής ταφής
- στ) διαχωρισμό  $\text{CO} - \text{H}_2$
- ζ) κανονικός διαχωρισμός ισοπαραφινών
- η) αφυδάτωση αλκοόλης.

Πρόσφατη έρευνα έδειξε ότι εκδόθηκαν 600 διπλώματα ευρεσιτεχνίας των ΗΠΑ για την PSA στους τομείς εφαρμογής α, γ και δ, μόνο κατά την περίοδο 1980-2000, ενώ ο αριθμός των δημοσιευμένων εργασιών με το PSA ως λέξη-κλειδί ξεπέρασε τα 800 κατά την περίοδο 1970-2000.

Οι βασικοί λόγοι για μια τέτοια ανάπτυξη αυτής της τεχνολογίας είναι οι εξής:

- Ένας επιπλέον βαθμός θερμοδυναμικής ελευθερίας για την περιγραφή της διαδικασίας προσρόφησης εισάγει τεράστια ευελιξία στο σχεδιασμό διεργασιών PSA σε σύγκριση με άλλα συμβατικά εργαλεία διαχωρισμού όπως η απόσταξη ή η απορρόφηση.
- Διατίθενται πολυάριθμες μικροπορώδεις-μεσοπορώδεις οικογένειες προσροφητικών (νέων ή τροποποιημένων) όπως ενεργοποιημένοι άνθρακες, ζεόλιθοι, αργίλες, πυριτικές πηκτές και πολυμερείς ροφητές που παρουσιάζουν διαφορετικές προσροφητικές ιδιότητες για τον διαχωρισμό των μιγμάτων αερίων (ισορροπίες, κινητικές και θερμότητες).
- Η βέλτιστη συνεργασία μεταξύ ενός υλικού και μιας διαδικασίας στο σχεδιασμό του συστήματος διαχωρισμού PSA επιφέρει καινοτομία.
- Πολλές εναλλακτικές διεργασίες μπορούν να σχεδιαστούν στην στήλη PSA για τους ίδιους στόχους διαχωρισμού.

Η τάση αυτή αναμένεται να συνεχιστεί και στο μέλλον. Νέοι κύκλοι PSA που χρησιμοποιούν παλιά ή νέα προσροφητικά (κατά προτίμηση προσαρμοσμένα το ένα για το άλλο) θα συνεχίσουν να αναπτύσσονται στους υπάρχοντες και νέους τομείς εφαρμογής. Χρειάζονται καλοί συνδυασμοί διεργασιών PSA και προσροφητικών ουσιών για μαζικό διαχωρισμό  $\text{N}_2$  και  $\text{CH}_4$  σε υψηλές πιέσεις, διαχωρισμό αραιού  $\text{O}_2$  από  $\text{Ar}$ , και μαζικό διαχωρισμό από μίγματα προπανίου-προπυλενίου.

Παρά την ανάπτυξη αυτή, στις πρακτικές εφαρμογές αυτής της τεχνολογίας, ο σχεδιασμός και η βελτιστοποίηση ενός συστήματος PSA εξακολουθεί να παραμένει σε μεγάλο βαθμό μια πειραματική προσπάθεια. Ο εκ των προτέρων σχεδιασμός ενός πρακτικού συστήματος PSA που μπορεί να εγγυηθεί τις εμπορικές προδιαγραφές χωρίς τη χρήση υποστηρικτικών δεδομένων από εγκατάσταση γεώτρησης διεργασίας πάγκου ή πιλοτικής κλίμακας ενδέχεται να μην είναι ακόμη εφικτός για τους ακόλουθους δύο λόγους.

Πρώτον, οι περισσότερες από τις πρακτικές διαδικασίες PSA είναι αρκετά περίπλοκες, περιλαμβάνουν μια σειρά διαδοχικών αλλά αλληλοεπιδρώντα ασταθή βήματα κύκλου κατάστασης. Μπορεί να είναι δυνατή η διαμόρφωση ενός αυστηρού μαθηματικού πλαισίου (μοντέλου) για την περιγραφή τέτοιων διαδικασιών, αλλά είναι συνήθως δαπανηρή και χρονοβόρα η επίλυση τέτοιων μοντέλων με την ακρίβεια και την αξιοπιστία που απαιτείται για το βιομηχανικό σχεδιασμό. Απαιτεί επαναλαμβανόμενες αριθμητικές λύσεις ενός συνόλου συνδεδεμένων μη γραμμικών μερικών διαφορικών εξισώσεων στον τομέα του χρόνου και του διαστήματος με διαφορετικές αρχικές και οριακές περιόδους-ίοντα που καθορίζουν τα βήματα της διαδικασίας για κάθε δεδομένο κύκλο μέχρι να επιτευχθεί μια κυκλική λύση σταθερής κατάστασης.

Είναι σημαντικό σε αυτές τις αλληλεπιδράσεις να είναι γνωστές όλες οι συνθήκες θερμοκρασίας, πίεσης και σύνθεσης που επικρατούν σε ένα προσροφητήρα PSA σε όλα τα στάδια της διαδικασίας. Επειδή αυτές οι συνθήκες μπορεί να διαφέρουν σημαντικά σε μια πρακτική διαδικασία PSA, η μέτρηση και η συσχέτιση ενός τόσο τεράστιου όγκου δεδομένων είναι συχνά ανέφικτη. Πρέπει κανείς να προβλέψει αυτές τις αλληλεπιδράσεις από μια ελάχιστη πηγή πειραματικών δεδομένων για το σύστημα ενδιαφέροντος.

Μια κοινή πρακτική είναι η ανάπτυξη ενός απλουστευμένου και ειδικού μοντέλου για τη διαδικασία ενδιαφέροντος PSA και η χρήση απλοϊκών περιγραφών (μοντέλων ή εμπειρικών) του αερίου - στερεών αλληλεπιδράσεων για το σχετικό σύστημα, για την αξιολόγηση και την επίδραση των μεταβλητών σχεδιασμού στην απόδοση της διαδικασίας PSA και τελικά να επιτευχθεί ένας ακατέργαστος βέλτιστος σχεδιασμός.

Το μονοξείδιο του άνθρακα απενεργοποιεί εύκολα τον καταλύτη του ηλεκτροδίου κυψελών καυσίμου. Τα ίχνη μονοξειδίου του άνθρακα μπορούν να προκαλέσουν αρνητικές επιπτώσεις στην τάση των κυψελών και να μειώσουν την ισχύ εξόδου της κυψέλης καυσίμου. Μια πρόσφατη μελέτη δείχνει ότι περίπου 10 ppm CO στο ρεύμα αερίου τροφοδοσίας της κυψέλης μειώνουν την απόδοση της. Ως εκ τούτου, η συγκέντρωση μονοξειδίου του άνθρακα πρέπει να μειωθεί σε ένα πολύ χαμηλό επίπεδο, κατά προτίμηση κάτω από 10 ppm, ώστε τα πλούσια σε υδρογόνο αναμορφωμένα υγρά λύματα να είναι κατάλληλα ως τροφοδοσία για τις κυψέλες καυσίμου.

Η προσρόφηση CO και CO<sub>2</sub> σε μείγματα H<sub>2</sub>/CO/CO<sub>2</sub> επιτεύχθηκε με τη χρήση συστήματος συμπαγούς συμπίεσης ταλάντευσης πίεσης, CPSA για την παραγωγή καθαρού υδρογόνου για χρήση σε κυψέλες καυσίμου. Το σύστημα CPSA σχεδιάστηκε σύμφωνα με τους White και Barkley. Ο σχεδιασμός βασίστηκε: στο μέγεθος προσρόφησης, στην ταχύτητα, στην αναγέννηση και στην επιλογή του προσροφητικού υλικού, οι προδιαγραφές του οποίου παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα.

Ο συμπαγής σχεδιασμός ενσωματώνει τέσσερις κλίνες σε έναν κύλινδρο, ενώ ο συμβατικός σχεδιασμός του PSA διαθέτει ξεχωριστή κλίνη για κάθε προσροφητή (Εικόνα 5-8).

Το CPSA λειτουργεί σε πέντε στάδια:

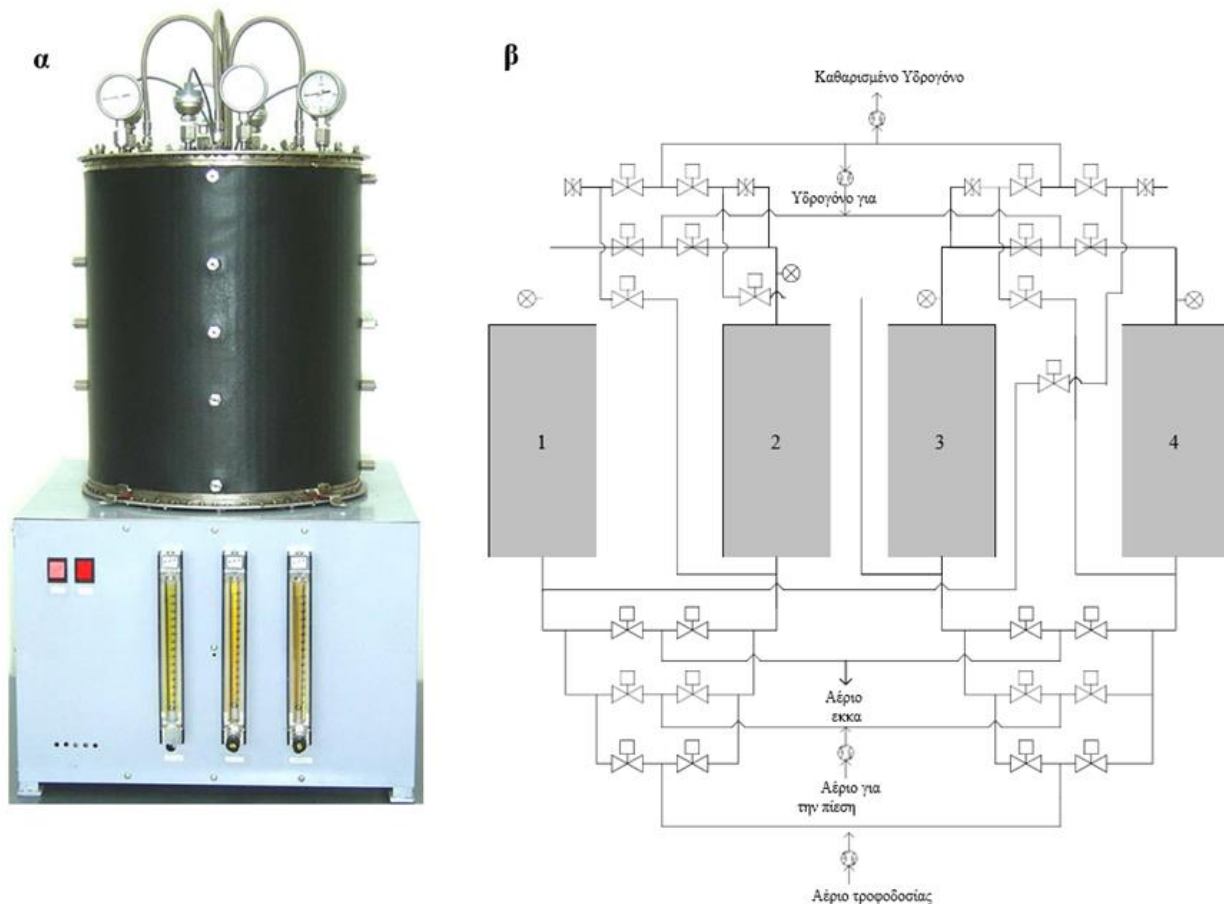
- (1) υπό πίεση
- (2) προσρόφηση I (τροφοδοσία από προηγούμενη κλίνη)
- (3) προσρόφηση II (άμεση τροφοδοσία)
- (4) πτώση (blowdown)
- (5) Εκκαθάριση

Πίνακας 5-1. Προδιαγραφές συστήματος CPSA. (Hydrogen purification using compact pressure swing adsorption system for fuel cell, n.d.)

Είδος	Παράμετρος
Υλικό CPSA	Ανοξειδωτο ατσάλι
Σχήμα CPSA	Κύλινδρος με 4 κλίνες
Συνολικό ύψος κλίνης	30 cm
Συνολική διάμετρος κλίνης προσρόφησης	35 cm
Πίεση προσρόφησης	5 atm
Θερμοκρασία προσρόφησης	302,15 K
Συγκέντρωση CO στην τροφοδοσία	4000 ppm
Συγκέντρωση CO <sub>2</sub> στις ζωοτροφές	5 mol%
Πίεση εκρόφησης	1 atm

Από την άλλη, τα βήματα PSA στην κυκλική διαδικασία εκτελούνται ταυτόχρονα, ενώ κατά διαστήματα εκτελούνται σε εναλλακτικούς προσροφητές σε ένα συμβατικό PSA. Όσον αφορά το βήμα προσρόφησης στο σύστημα CPSA, τροφοδοσία για τη δεύτερη κλίνη αποτελεί το προϊόν της πρώτης. Τα μείγματα υδρογόνου και CO θα εισέλθουν σε δύο κλίνες σε σειρά πριν εξέλθουν από το CPSA. Το CO προσροφάται στην πρώτη και δεύτερη κλίνη ενώ το καθαρό υδρογόνο εξέρχεται από το CPSA ως προϊόν. Οι βαλβίδες και το κυκλικό σύστημα ελέγχου σχεδιάστηκαν για χειροκίνητη και αυτόματη λειτουργία. Όσο η τιμή προσρόφησης του CO είναι μεγαλύτερη σε σύγκριση με το CO<sub>2</sub>, τόσο υψηλότερη θα είναι η επιλεκτικότητα του προσροφητήρα στο CO και αντίστροφα.

Η απόδοση του κύκλου PSA μετράται με όρους τριών κύριων παραμέτρων, δηλαδή της περιεκτικότητας σε ακαθαρσίες του προϊόντος, της ανάκτησης του προϊόντος και της απόδοσης του προϊόντος. Πρέπει να σημειωθεί ότι ο όρος "προϊόν" σε αυτό το έργο αναφέρεται στο καθαρό ρεύμα H<sub>2</sub> που εξέρχεται από την κλίνη καθ' όλη τη διάρκεια του βήματος τροφοδοσίας (βήμα 3). Η ανάκτηση του προϊόντος εκδηλώνεται σε δύο άλλες παραμέτρους: αναλογία εκκαθάρισης/τροφοδοσίας και λόγος απώλειας εξαερισμού/τροφοδοσίας.



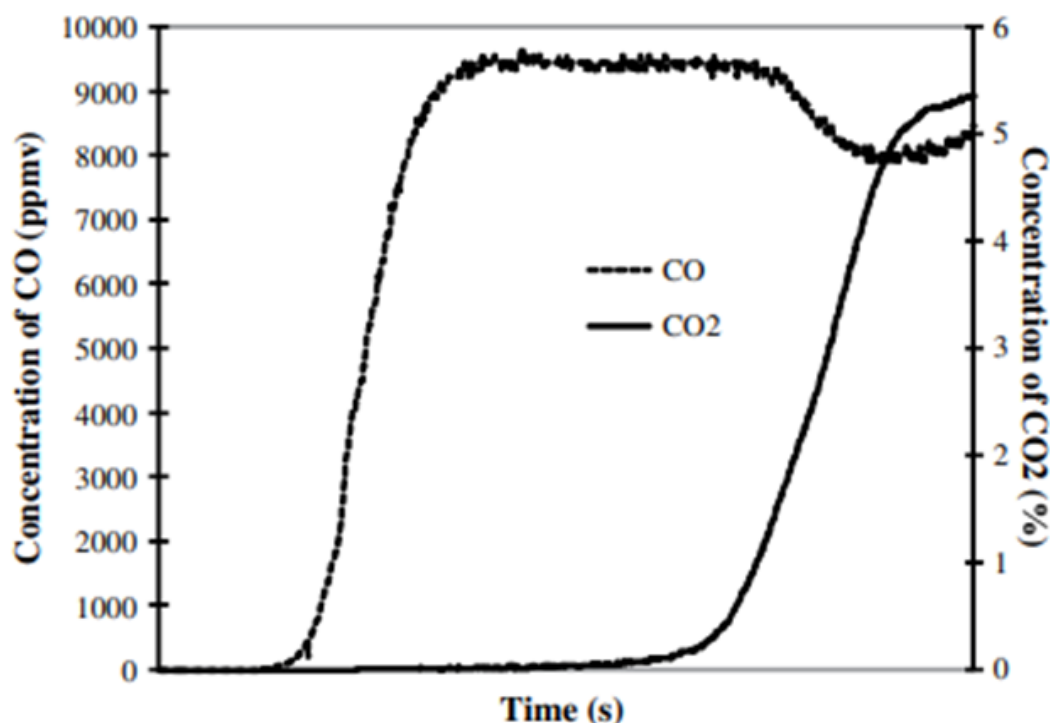
Εικόνα 5-8. (α) Σύστημα CPSA, (β) Σχήμα CPSA. (Hydrogen purification using compact pressure swing adsorption system for fuel cell, n.d.)

### Κύκλος μονής κλίνης.

Η προσρόφηση γίνεται σε μονή κλίνη, καθώς οι άλλες κλίνες αναγεννήθηκαν ή προετοιμάστηκαν για μια άλλη διαδικασία προσρόφησης μετά τον κορεσμό της πρώτης κλίνης. Οι κυκλικές διαδικασίες για κάθε κλίνη ήταν: πίεση, διαδικασία προσρόφησης σε υψηλή πίεση, ανατίναξη και κάθαρση. Το CO ανιχνεύτηκε γρηγορότερα σε σύγκριση με το CO<sub>2</sub> στο προϊόν υδρογόνου, το οποίο παρήχθη από το σύστημα μονής κλίνης. Όπως έχει γίνει γνωστό το CO<sub>2</sub> είναι ευκολότερο να απορροφηθεί από ενεργό άνθρακα σε σύγκριση με το CO. Τελικά, το επίπεδο CO έπεσε και το CO<sub>2</sub> εντοπίστηκε στη ροή του προϊόντος. Η εικόνα 5-9 δείχνει ότι η συγκέντρωση CO στη ροή του προϊόντος ήταν υψηλότερη από ό,τι στο αέριο τροφοδοσίας. Ο ενεργός άνθρακας είχε υψηλή περιεκτικότητα σε CO<sub>2</sub> σε σύγκριση με το CO. Κατά τη διάρκεια της προσρόφησης, το CO που είχε προσροφηθεί στον ενεργό άνθρακα αντικαταστάθηκε από CO<sub>2</sub>.

Υπήρχαν δύο διαδικασίες που θα μπορούσαν να έχουν λάβει χώρα στο προσροφητικό στρώμα κατά την προσρόφηση του CO<sub>2</sub>. Κατά τη διάρκεια αυτών των διαδικασιών το CO<sub>2</sub> προσροφήθηκε ενώ ταυτόχρονα το CO αποξηραίνεται από το προσροφητικό. Η διαδικασία εκρόφησης CO κατά CO<sub>2</sub> υποδεικνύεται από την αύξηση της συγκέντρωσης CO στη ροή αερίου του προϊόντος. Όταν επέλθει κορεσμός στο προσροφητικό, η συγκέντρωση του CO μειώνεται στην αρχική

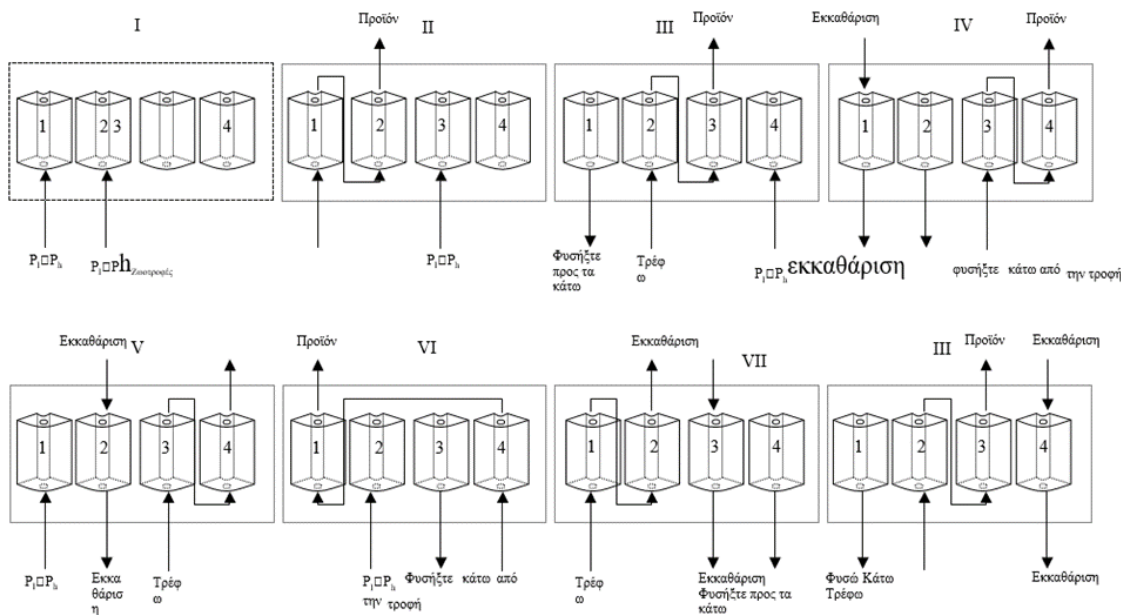
συγκέντρωση, ενώ η συγκέντρωση CO<sub>2</sub> αυξάνεται μέχρι να επιτευχθεί η αρχική συγκέντρωση στο αέριο τροφοδοσίας.



Εικόνα 5-9. Συγκέντρωση CO-CO<sub>2</sub> στη στήλη προσρόφησης. (Hydrogen purification using compact pressure swing adsorption system for fuel cell, n.d.)

### Κύκλος διπλής κλίνης

Η διαδικασία αυτή στο σύστημα CPSA ήταν μια διαδικασία προσρόφησης που χρησιμοποίησε δύο κλίνες σε σειρά. Κάποτε, υπήρχαν δύο στήλες που περνούσαν από προσρόφηση. Οι κυκλικές διεργασίες για κάθε κλίνη παρατίθενται παρακάτω, όπως απεικονίζονται στην παρακάτω εικόνα. Η διαδικασία προσρόφησης διακόπηκε όταν η συγκέντρωση CO στο προϊόν υδρογόνου από το δεύτερο κρεβάτι έφθασε τα 10 ppm και άρχισε ο κύκλος εκρόφησης. Σε αυτή τη δοκιμή προσρόφησης διπλής κλίνης, οι κλίνες που χρησιμοποιήθηκαν ήταν ο αριθμός κλίνης 3 και 4. Το αέριο μπήκε στη κλίνη 3, και στη συνέχεια το προϊόν κατευθύνθηκε στη κλίνη 4 ως αέριο τροφοδοσίας. Το τελικό προϊόν πάρθηκε από την έξοδο της κλίνης 4.



Εικόνα 5-10. Κυκλική διαδικασία CPSA για σύστημα διπλής κλίνης (PI : χαμηλή πίεση, Ph: υψηλή πίεση). (Hydrogen purification using compact pressure swing adsorption system for fuel cell, n.d.)

Ο προσροφητής που χρησιμοποιήθηκε στον καθαρισμό του υδρογόνου επιλέχθηκε με βάση την ικανότητα προσρόφησης και την επιλεκτικότητα για το CO. Ο Πίνακας 5-2 δείχνει τα αποτελέσματα προσρόφησης CO και CO<sub>2</sub> και τη σύγκριση της προσροφητικής εκλεκτικότητας για το CO. Το προσροφητικό θα πρέπει να έχει υψηλή ικανότητα προσρόφησης CO και υψηλή εκλεκτικότητα για CO ή τη μικρότερη εκλεκτικότητα για CO<sub>2</sub>. Όταν η τιμή προσρόφησης του CO είναι μεγαλύτερη σε σύγκριση με το CO<sub>2</sub>, τόσο μεγαλύτερη είναι η επιλεκτικότητα του προσροφητικού στο CO και αντίστροφα.

Πίνακας 5-2. Η ικανότητα του προσροφητικού στη διαδικασία προσρόφησης CO και CO<sub>2</sub>. (Hydrogen purification using compact pressure swing adsorption system for fuel cell, n.d.)

Προσροφητικό	CO προσροφημένο (mmol/g)	CO <sub>2</sub> προσροφημένο (mmol/g)	CO/CO <sub>2</sub> προσροφημένο
AC-S	0,13	0,15	0,87
AC-H15-C	0,05	0,17	0,32
SG-C	0,01	0,03	0,32
AC-BDH	0,13	0,51	0,26
AC-S-C	0,02	0,06	0,23
AC-BDH-C	0,04	0,20	0,20
AC-BDH-I	0,08	0,45	0,18
AC-H11-I	0,07	0,39	0,18
AC-H15-I	0,07	0,49	0,14
SG	0,02	0,16	0,11
AC-H15	0,06	0,62	0,09
AC-H11	0,04	0,45	0,08

## 5.5. Κυψέλες καυσίμου

### Ιστορική αναδρομή



Εικόνα 5-11. Sir William Grove.  
(wikipedia, n.d.)

Το 1839 ο Sir William Grove ανακάλυψε την αρχή λειτουργίας των κυψελών καυσίμου, όπου μελετούσε μια συνδεσμολογία του ισχυρού συσσωρευτή πλατίνας-ψευδαργύρου σε σειρά και παράλληλα. Στο άρθρο του, είχε κάνει μια υποσημείωση όπου τόνιζε την πιθανότητα να παραχθεί ηλεκτρισμός από την αντίδραση του οξυγόνου με το υδρογόνο. Τελικά, το 1842 ο William Grove παρουσίασε αναλυτικά την μέθοδο των κυψελών καυσίμου.

Την ίδια περίοδο, ο Ελβετός Christian F. Shoenbein έκανε την ίδια ανακάλυψη και δημοσίευσε το άρθρο του στο Philosophical Magazine. Ωστόσο οι κυψέλες καυσίμου για ένα χρόνο δεν είχαν πρακτικό κομμάτι αλλά μόνο επιστημονικό ενδιαφέρον.

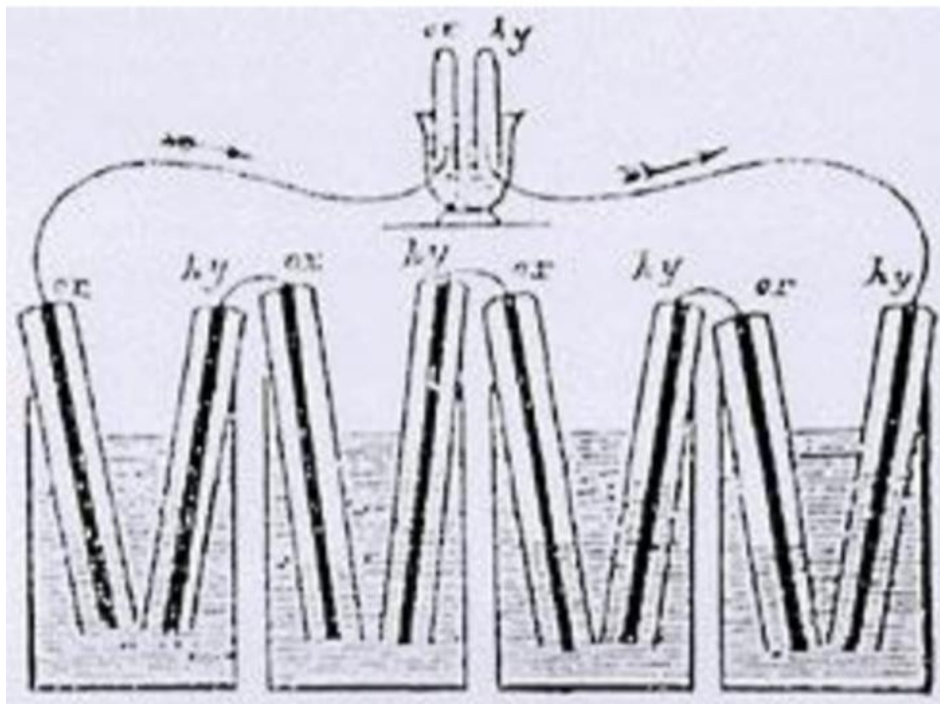
Ο Ostwald το 1894, είχε την ιδέα να συνδυάσει άνθρακα και οξυγόνο. Ωστόσο, αυτή η ιδέα δεν πέτυχε διότι χρειαζόταν για αυτή την λειτουργία υψηλές

θερμοκρασίες (1000°C) με αποτέλεσμα να προκύψουν προβλήματα στην συμπεριφορά των υλικών λόγω μεγάλης θερμοκρασίας.

Από το 1937 έως το 1950 ο Άγγλος Francis T. Bacon έφτιαξε μια κυψέλη καυσίμου με ισχύ 6 kW. Η εταιρία General Motors το 1960 δημιούργησε ένα μικρό, σε μέγεθος, φορτηγό το οποίο λειτουργούσε με κυψέλες καυσίμου, ενώ η εταιρία Perry Technologies το 1989 δημιούργησε ένα υποβρύχιο με κυψέλη καυσίμου PEM. Στην πορεία των χρόνων και συγκεκριμένα το 1993 η εταιρία Ballard Power System παρουσίασε τα πρώτα λεωφορεία που λειτουργούσαν με κυψέλες καυσίμου. Παράλληλα, κατασκευάστηκε και το πρώτο αυτοκίνητο από τις δύο παραπάνω εταιρίες, αφού επέλεξαν να συνεργαστούν.

Παρόλο τον ενθουσιασμό που τους είχε κυριεύσει για την χρήση των κυψελών καυσίμου στην κίνηση, άρχισε σιγά σιγά να εξασθενεί τη δεκαετία του '70 λόγω του αρκετά μεγάλου κόστους με αποτέλεσμα να χρησιμοποιούνται μόνο για διαστημικές εφαρμογές. Μεγαλύτερο ενδιαφέρον έδειξαν οι επιστήμονες στις κυψέλες καυσίμου οι οποίες λειτουργούν με μέση και υψηλή θερμοκρασία.





Εικόνα 5-12. Η πρώτη δομή 4 κυψελών καυσίμου. (ΖΟΥΝΤΟΥΡΙΔΟΥ, ΑΝΑΛΥΣΗ-ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΚΥΨΕΛΩΝ ΚΑΥΣΙΜΟΥ ΚΑΙ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΚΥΨΕΛΗΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ ΜΕΜΒΡΑΝΗΣ ΑΝΤΑΛΛΑΓΗΣ ΠΡΩΤΟΝΙΩΝ (PEMFC) ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ, 2006)

### Γενικά για τις κυψέλες καυσίμου

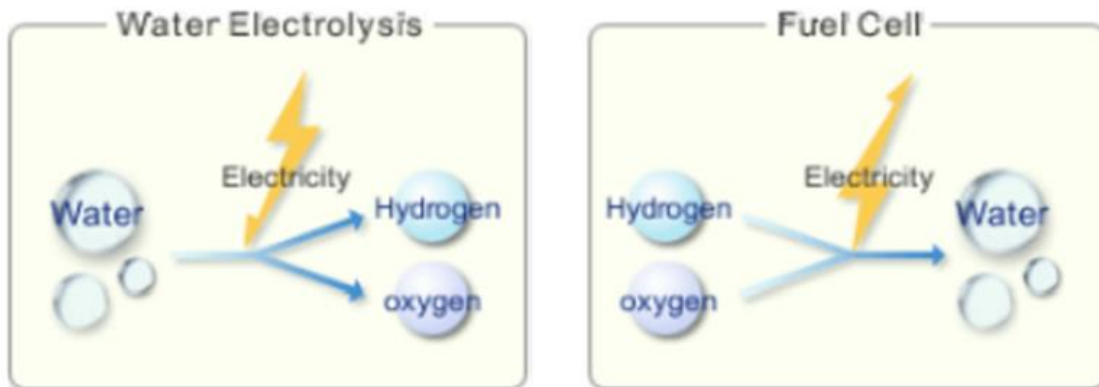
Η πηγή ενέργειας για το μέλλον αφορά άμεσα τις κυψέλες καυσίμου εφόσον δεν προκαλούν ατμοσφαιρικούς ρύπους. Στην σημερινή εποχή η μαζική ηλεκτροπαραγωγή γίνεται από πυρηνικά εργοστάσια και από εργοστάσια καύσης του άνθρακα. Η δημιουργία τεχνολογιών κυψελών καυσίμου έχει σκοπό να παράγει ηλεκτρική ενέργεια κατευθείαν από το καύσιμο και μάλιστα με ποσοστό απόδοσης περίπου 80%, ενώ η μέχρι στιγμής ηλεκτρική ενέργεια έχει μεγάλη διαδικασία παραγωγής καθώς το καύσιμο πρέπει πρώτα να μετατραπεί σε θερμική ενέργεια, έπειτα σε μηχανική ή κινητική και τέλος σε ηλεκτρική. Το αποτέλεσμα αυτής της διαδικασίας είναι η χαμηλή απόδοση του ενεργειακού συστήματος.

Ένα άλλο πλεονέκτημα που καθιστά τις κυψέλες καυσίμου εύχρηστες είναι ο μικρός τους όγκος καθώς παρέχεται η δυνατότητα να χρησιμοποιηθούν και σε οχήματα παίρνοντας την θέση των υγρών καυσίμων. Αυτοκίνητα, λεωφορεία, σπία και επιχειρήσεις είναι κάποιοι τομείς που μπορούν χρησιμοποιήσουν κυψέλες καυσίμου για την ηλεκτροπαραγωγή με μοναδικό απόβλητο το νερό. Η αντίδραση που πραγματοποιείται στις κυψέλες καυσίμου είναι η εξής:



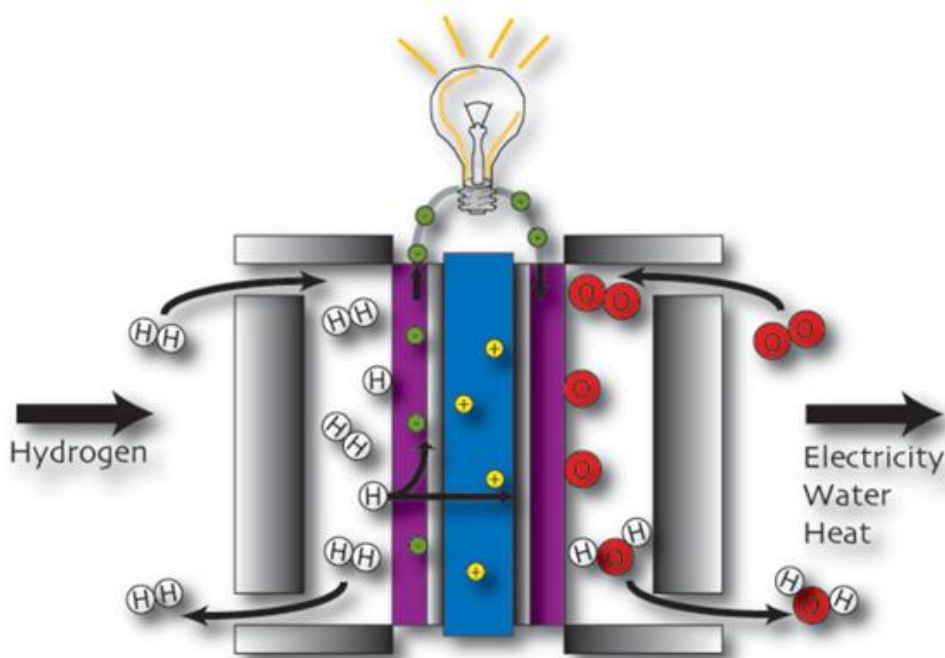
### **Πως λειτουργεί μια κυψέλη καυσίμου;**

Η κυψέλη καυσίμου θεωρητικά είναι το αντίθετο της ηλεκτρόλυσης του νερού. Στην ηλεκτρόλυση, το νερό διασπάται με την βοήθεια την ηλεκτρικής ενέργειας, ενώ στην κυψέλη καυσίμου το υδρογόνο και το οξυγόνο αντιδρούν και παράγουν νερό και ενέργεια.



Εικόνα 5-13. Ηλεκτρόλυση – κυψέλη καυσίμου. (ΖΟΥΝΤΟΥΡΙΔΟΥ, ΑΝΑΛΥΣΗ-ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΚΥΨΕΛΩΝ ΚΑΥΣΙΜΟΥ ΚΑΙ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΚΥΨΕΛΗΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ ΜΕΜΒΡΑΝΗΣ ΑΝΤΑΛΛΑΓΗΣ ΠΡΩΤΟΝΙΩΝ (PEMFC) ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ, 2006)

Με απλά λόγια η κυψέλη καυσίμου λειτουργεί σαν μια «μπαταρία», περιέχει δύο ηλεκτρόδια, την άνοδο και την κάθοδο. Μεταξύ τους βρίσκεται ένα πορώδες υλικό εμποτισμένο από έναν ηλεκτρολύτη ο οποίος έχει τον ρόλο αγωγού και φράγματος, δηλαδή βοηθάει να μετακινηθούν τα πρωτόνια και εμποδίζει τα ηλεκτρόνια. Επίσης, ο ηλεκτρολύτης παίζει σημαντικό ρόλο στην θερμοκρασία λειτουργίας της κυψέλης καυσίμου όπως για παράδειγμα αν χρησιμοποιηθεί ηλεκτρολύτης φωσφορικού οξέος τότε η θερμοκρασία που θα λειτουργεί το σύστημα θα είναι από 420° K έως 480° K. Η χρήση του καταλύτη είναι βασικό στοιχείο στις κυψέλες καυσίμου εφόσον προσφέρει βοήθεια για την διάσπαση του μορίου του υδρογόνου σε δύο ηλεκτρόνια και δύο πρωτόνια.



Εικόνα 5-14. Κυψέλη καυσίμου. (ΖΟΥΝΤΟΥΡΙΔΟΥ, ΑΝΑΛΥΣΗ-ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΚΥΨΕΛΩΝ ΚΑΥΣΙΜΟΥ ΚΑΙ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΚΥΨΕΛΗΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ ΜΕΜΒΡΑΝΗΣ ΑΝΤΑΛΛΑΓΗΣ ΠΡΩΤΟΝΙΩΝ (PEMFC) ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ, 2006)

Αρχικά, το καύσιμο, δηλαδή το αέριο H<sub>2</sub> οδηγείται στην άνοδο και με την χρήση καταλύτη διασπάται σε ηλεκτρόνια και πρωτόνια. Η κάθοδος διοχετεύεται με ατμοσφαιρικό αέρα που περιέχει O<sub>2</sub> σε αναλογία 21% κατ' όγκο. Τα πρωτόνια είναι αυτά που μπορούν να διαπεράσουν το πορώδες υλικό. Για να προκύψει τελική αντίδραση και για να παραχθεί ηλεκτρική ενέργεια, τα ηλεκτρόνια θα πρέπει να ξαναβρεθούν με τα πρωτόνια. Αυτό θα πραγματοποιηθεί χρησιμοποιώντας εξωτερικό κύκλωμα με τάση 0,7 Volts που θα συνδέει την κάθοδο με την άνοδο ώστε τα ηλεκτρόνια να μην έρθουν σε επαφή με την ηλεκτρολύτη. Τα στοιχεία θα πρέπει να βρίσκονται υπό πίεση διότι η θερμοκρασία λειτουργίας είναι πολύ υψηλή και υπάρχει φόβος εξάτμισης του H<sub>2</sub>O του ηλεκτρολύτη. Παρακάτω φαίνονται οι αντιδράσεις που πραγματοποιούνται στο σύστημα.

$H_2 \rightarrow 2H + 2e^-$	Άνοδος
$\frac{1}{2} O_2 + 2H + 2e^- \rightarrow H_2O$	Κάθοδος
$H_2 + \frac{1}{2} O_2 \rightarrow H_2O + \text{θερμότητα}$	Τελικό αποτέλεσμα

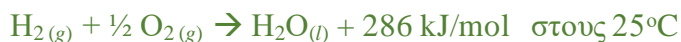
Ουσιαστικά, σχεδόν το 74% μπορεί να φτάσει η απόδοση μια κυψέλης καυσίμου και η ενέργεια που δεν αποδίδεται σαν ηλεκτρική, παρουσιάζεται σαν θερμική που χάνεται στο περιβάλλον. Ωστόσο, αυτή η θερμότητα μπορεί να εκμεταλλευτεί και απόδοση να φτάσει έως και 85%.

#### Θερμοδυναμική των κυψελών καυσίμου

Οι κυψέλες καυσίμου βασίζονται στους νόμους της θερμοδυναμικής επειδή μετατρέπουν την χημική ενέργεια του καυσίμου απευθείας σε ηλεκτρική. Οι παραπάνω αντιδράσεις είναι αυτές που συμβαίνουν στις κυψέλες καυσίμου, ωστόσο σίγουρα υπάρχουν και ενδιάμεσα στάδια τα οποία μπορεί να οδηγήσουν σε ανεπιθύμητες αντιδράσεις. Το βασικότερο θερμοδυναμικό μέγεθος που μας απασχολεί στις κυψέλες καυσίμου είναι η θερμότητα που εκλύεται από αυτές τις αντιδράσεις. Συγκεκριμένα η τελευταία αντίδραση είναι αυτή που απελευθερώνει την ενέργεια (θερμότητα) και παρακάτω φαίνεται η διαφορά ενθαλπίας της αντίδρασης.

$$\Delta H = (h_f)_{H_2O} - (h_f)_{H_2} - \frac{1}{2} (h_f)_{O_2} \quad (\text{kJ})$$

Όπου  $h_f$  είναι η ενθαλπία σχηματισμού άρα  $(h_f)_{H_2O}$  είναι η ενθαλπία σχηματισμού νερού όπου σε υγρή μορφή στο 25°C είναι 286 kJ/mol και η ενθαλπία των άλλων δύο είναι μηδέν εξ' ορισμού. Η συνολική, αναλυτική αντίδραση της κυψέλης καυσίμου είναι η παρακάτω:

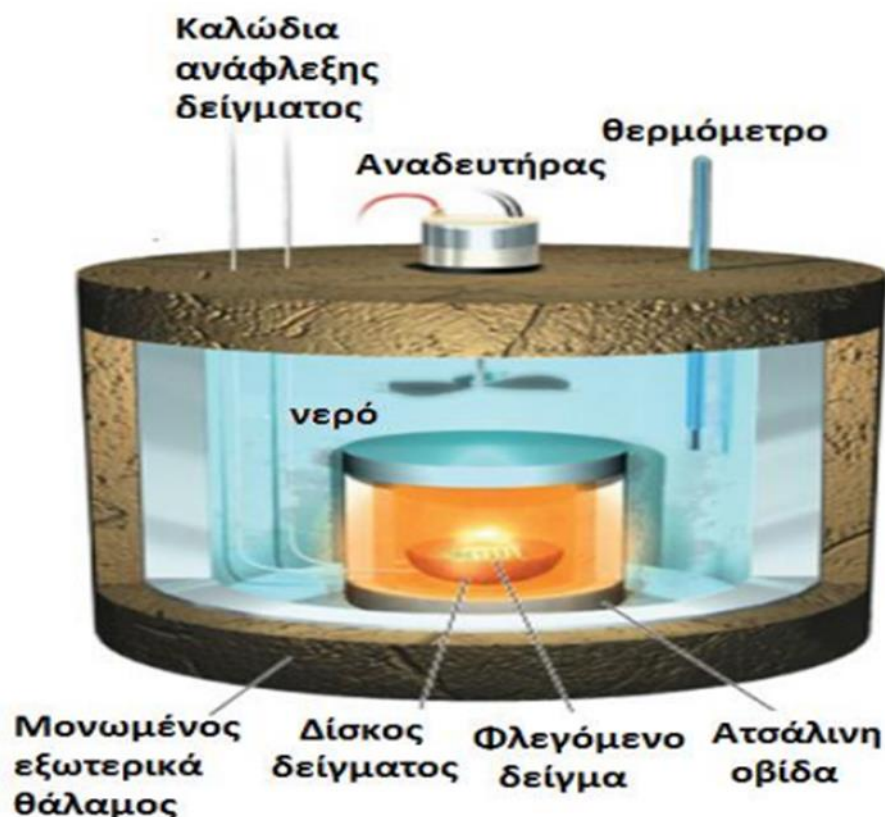


#### Ανώτερη και κατώτερη θερμογόνος δύναμη

Η ανώτερη και η κατώτερη θερμογόνος δύναμη μπορεί να μετρηθεί με τις θερμοδομετρικές οβίδες όπου στο κέντρο αυτής της οβίδας που περιβάλλεται από θερμομονωτικό ατσάλινο υλικό, μελετάται η ζητούμενη αντίδραση και γύρω από αυτό το υλικό υπάρχει νερό. Ο όγκος είναι σταθερός γι' αυτό και η θερμότητα που απορροφάται ή εκλύεται δεν είναι ίση με την διαφορά της ενθαλπίας αλλά με την διαφορά της εσωτερικής ενέργειας. Είναι εύκολο να υπολογιστεί η

θερμότητα καθώς η έκλυση της μεταφέρεται στο νερό και με ένα θερμόμετρο του συστήματος μετριέται η διαφορά θερμοκρασίας πριν και μετά την αντίδραση.

Για παράδειγμα, στο κέντρο της οβίδας υπάρχει 1 mol  $H_2$  με 0,5 mol  $O_2$  και γίνεται τέλεια καύση του υδρογόνου. Έπειτα, το νερό ως προϊόν καύσης αφήνεται υπό πίεση 1 atm στους  $25^\circ C$  μέχρι να κρυώσει όπου η μορφή του είναι υγρή. Η μέτρηση της οβίδας, δηλαδή η ανώτερη θερμογόνος δύναμη θα πρέπει να δείχνει ότι η εκλυόμενη θερμότητα είναι 286 kJ/mol.



Εικόνα 5-15. Θερμιδομετρική οβίδα. (Δημήτριος-Παναγιώτης, ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ ΓΙΑ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ)

Η κατώτερη θερμογόνος δύναμη του  $H_2$  υπολογίζεται με την ίδια διαδικασία μόνο που σε αυτή την περίπτωση γίνεται πρόσθεση περισσότερου  $O_2$  στο κέντρο της οβίδας ώστε να προκύψει αέριο μίγμα που θα περιλαμβάνει  $O_2$  και ατμό. Έτσι, η ένδειξη θερμότητας αυτή την φορά θα ισούται με 241 kJ/mol.

Με λίγα λόγια, γίνεται χρήση της ανώτερης θερμογόνου δύναμης για να μετρηθεί η εισερχόμενη ενέργεια στην κυψέλη καυσίμου όπου θα είναι και η μέγιστη. Όπως αναφέρθηκε πιο πάνω η ενέργεια δεν μετατρέπεται όλη σε ηλεκτρική, αυτό σημαίνει ότι υπάρχουν κάποιες μη αντιστρεπτές απώλειες στην μετατροπή ενέργειας εξαιτίας της αύξησης της εντροπίας της συνολικής αντίδρασης.

Σε μια κυψέλη καυσίμου αυτό το ποσοστό της ενθαλπίας που μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια είναι η μεταβολή της ελεύθερης ενέργειας Gibbs η οποία δίνεται από την σχέση:

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S$$

Η απόδοση οποιασδήποτε ενέργειας είναι:  $\frac{\text{ωφέλιμη ενέργεια}}{\text{ενέργεια που καταναλώθηκε}}$ . Στην συγκεκριμένη περίπτωση των κυψελών καυσίμου η ηλεκτρική ενέργεια είναι η ωφέλιμη και αυτή που καταναλώνεται λόγω καύσης του  $H_2$  είναι η μεταβολή της ενθαλπίας. Θεωρητικά, η ενέργεια Gibbs μπορεί να μετατραπεί σε ηλεκτρική, επομένως θα ισχύει ότι:  $\eta = \frac{\Delta G}{\Delta H} = \frac{237,34}{286,02} = 83\%$ .

### Κινητική ηλεκτροδίων

Η κινητική ηλεκτροδίων αφορά τον τομέα της ηλεκτροχημείας ο οποίος συμβάλλει στον συνολικό ρυθμό της αντίδρασης και στην επίδοση της λειτουργίας των κυψελών καυσίμου. Παρακάτω αναφέρονται οι αντιδράσεις που πραγματοποιούνται στα ηλεκτρόδια μιας κυψελής καυσίμου.

- Στον ηλεκτρολύτη διαλύονται τα αέρια αντιδρώντα.
- Στα ενεργά σημεία μέσα στο ηλεκτρόδιο πραγματοποιείται η διάχυση των αέριων αντιδρώντων που διαλύθηκαν.
- Εξαιτίας της διασπαστικής απορρόφησης στο ηλεκτρόδιο από τον ηλεκτρολύτη απορροφούνται τα αέρια αντιδρώντα.
- Μεταφέρονται τα αέρια αντιδρώντα τα οποία βρίσκονται μέσα στον ηλεκτρολύτη.
- Τα στοιχεία διαχέονται μακριά από το ηλεκτρόδιο.
- Μέσου του ηλεκτρολύτη μεταφέρονται τα ιόντα από ένα ηλεκτρόδιο στο άλλο.
- Μέσου εξωτερικού κυκλώματος μεταφέρονται ηλεκτρόνια από το ένα ηλεκτρόδιο στο άλλο.

Στην ηλεκτροχημεία όταν τα άτομα των στοιχείων αλλάζουν αριθμό οξειδωσης τότε αναφερόμαστε σε οξειδοαναγωγική αντίδραση. Η ποσότητα των ηλεκτρονίων που ανταλλάχθηκαν ονομάζεται «μισή-αντίδραση». Για τις κυψέλες καυσίμου στο ηλεκτρόδιο της ανόδου ορίζεται η παρακάτω μισή-αντίδραση:



Η υπέρταση είναι η διαφορά δυναμικού μεταξύ του θερμοδυναμικά ορισμένου οξειδοαναγωγικού δυναμικού με την πειραματική τιμή δυναμικού. Καθώς λειτουργεί μια κυψέλη καυσίμου παρατηρείται μείωση στο δυναμικό της λόγω των απωλειών στην υπέρταση του ηλεκτρολύτη, της ανόδου και της καθόδου. Το δυναμικό  $E$  ορίζεται ως εξής:

$$E = E_r - \eta_{act,a} - \eta_{act,c} - \eta_{ohm} - \eta_{mt,a} - \eta_{mt,c}$$

Όπου:  $E_r$  είναι το αντίστροφο δυναμικό

$\eta_{act,a}$  και  $\eta_{act,c}$  είναι οι υπερτάσεις ενεργοποίησης στην άνοδο και στην κάθοδο

$\eta_{mt,a}$  και  $\eta_{mt,c}$  είναι η μεταφορά μάζας και συγκέντρωση υπερτάσεως στην άνοδο και κάθοδο

$\eta_{ohm}$  είναι η ωμική υπέρταση της κυψέλης καυσίμου

Η θεωρητική τιμή της τάσης που υπολογίζεται από την μεταβολή της ενέργειας Gibbs είναι υψηλότερη από αυτήν που υπάρχει στο εξωτερικό κύκλωμα. Οι λόγοι που υπάρχουν αυτές οι απώλειες στην τάση είναι οι παρακάτω:

- Εξαιτίας της οξειδωσης της πλατίνας υπάρχει μικτό δυναμικό στο ηλεκτρόδιο του  $O_2$ .
- Οι κυψέλες καυσίμου οι οποίες λειτουργούν με χαμηλές θερμοκρασίες έχουν αργή κινητική ηλεκτροδίου στην αντίδραση μείωσης του  $O_2$  που ακολουθείται από μείωση της υπέρτασης σχεδόν 200 mV.
- Στην επιφάνεια της καθόδου διασταυρώνεται το υγρό  $H_2$  με το  $O_2$ .

### Ηλεκτρολύτης

Η καρδιά της κυψέλης καυσίμου είναι ο ηλεκτρολύτης. Η κύρια ιδιότητα του είναι ότι επιτρέπει την μετακίνηση των ιόντων στο εσωτερικό του, για αυτόν τον λόγο πρέπει να είναι αγωγίμος ώστε να αποφευχθούν οι απώλειες. Ταυτόχρονα, ο ηλεκτρολύτης διαχωρίζει το καύσιμο από το οξειδωτικό ώστε να μην πραγματοποιηθεί απευθείας η αντίδραση τους.

Επιπρόσθετα, ο ηλεκτρολύτης είναι αυτός που προσδιορίζει τις συνθήκες λειτουργίας μιας κυψέλης καυσίμου, άρα ανάλογα τον ηλεκτρολύτη επηρεάζεται και η θερμοκρασία λειτουργίας. Συγκεκριμένα, οι κυψέλες οι οποίες έχουν υγρό ηλεκτρολύτη (φωσφορικό οξύ) η θερμοκρασία που λειτουργούν είναι αναγκαίο να είναι χαμηλή (κάτω από  $250^\circ C$ ) αλλιώς ο ηλεκτρολύτης θα εξατμιστεί. Σε αντίθεση με τον στερεό ηλεκτρολύτη η θερμοκρασία είναι υψηλή και ξεπερνάει τους  $650^\circ C$  και το κόστος είναι πιο χαμηλό εφόσον δεν απαιτείται ακριβός καταλύτης για αυτές τις θερμοκρασίες.

Το οξύ είναι υγρό με ελεύθερα ιόντα  $H_2$ , έτσι ένας όξινος καταλύτης πετυχαίνει σίγουρα τον σκοπό του. Οι αντιδράσεις στα ηλεκτρόδια είναι διαφορετικές όταν πρόκειται για αλκαλικούς ηλεκτρολύτες, διότι τα ηλεκτρόνια που έρχονται από την άνοδο αντιδρούν με το οξυγόνο στην κάθοδο και μαζί με το νερό προκύπτουν ανιόντα  $OH^-$ .

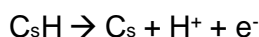
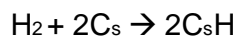


Το υδροξύλιο περνά μέσα από τον ηλεκτρολύτη και πηγαίνει από την κάθοδο στην άνοδο, όπου εκεί αντιδρά με το υδρογόνο απελευθερώνοντας έτσι ηλεκτρόνια και ενέργεια.



### Κριτήρια επιλογής ηλεκτροκαταλυτών

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω ο καταλύτης βοηθάει να οξειδωθεί το υδρογόνο. Οι δύο πλευρές του ηλεκτρολύτη επικαλύπτονται από ένα στρώμα καταλύτη που σχεδόν πάντα είναι πλατίνα Pt. Πιο κάτω φαίνονται οι αντιδράσεις οι οποίες παρουσιάζουν τον ρόλο του καταλύτη στην οξείδωση του H<sub>2</sub>.



Όσον αφορά τις κυψέλες καυσίμου που λειτουργούν σε χαμηλή θερμοκρασία, οι πιο κατάλληλοι καταλύτες είναι τα ευγενή μέταλλα, δηλαδή μπορεί να είναι το ρουθίνιο, το ασήμι, η πλατίνα, ο χρυσός και το παλλάδιο. Παράλληλα, μπορούν να χρησιμοποιηθούν και οργανικά υλικά που περιέχουν καταλυτικές ιδιότητες όπως είναι οι μεταλλικές πορφυρίνες και οι μεταλλικές φθαλοκυανιδίνες. Καθώς οι κυψέλες καυσίμου προσπαθούν να εμπορευματοποιηθούν, η χρήση καταλυτών αυξάνει αρκετά το κόστος κατασκευής τους. Για παράδειγμα η χρήση του καταλύτη πλατίνας μπορεί να αυξήσει το κόστος έως και 40%. Είναι ανάγκη η χρήση μεγαλύτερης ποσότητας καταλυτών για τον λόγο ότι οι αντιδράσεις πραγματοποιούνται στην επιφάνεια του καταλύτη με αποτέλεσμα να απαιτείται μεγάλη επιφάνεια ώστε να αυξηθεί η απόδοση της κυψέλης.

Για όλους αυτούς τους λόγους, αναπτύχθηκε η τεχνική: «χρήση καταλύτη υποβοηθούμενο από άνθρακα». Ο άνθρακας έχει κάποιες σημαντικές ιδιότητες όπως είναι η καλή αγωγιμότητα ηλεκτρονίων και η ανθεκτικότητα στην διάβρωση όπου κάνει πιο εύκολη την κατασκευή μεγάλης επιφάνειας με άνθρακα. Η λειτουργία του είναι η εξής. Τα μόρια του καταλύτη βρίσκουν θέση στην ήδη υπάρχουσα μεγάλη επιφάνεια που υποστηρίζεται από τον άνθρακα.

Υπάρχουν πάρα πολλές θέσεις και διασκορπισμένες στην επιφάνεια του υποστηρίγματος με αποτέλεσμα οι καταλύτες να πιάνουν την θέση και να κρυσταλλώνονται. Είναι ξεκάθαρο το γεγονός ότι εφόσον υπάρχει μεγάλη επιφάνεια δεν θα είναι εύκολο να βρεθούν τα μόρια του καταλύτη το ένα δίπλα στο άλλο όπως και τα μόρια του καυσίμου να έρθουν σε επαφή με τα μόρια του καταλύτη. Είναι απαραίτητο να υπάρχουν μικρότερες ωμικές απώλειες εσωτερικά στο στρώμα του καταλύτη.

Επίσης, με την χρήση άνθρακα ως υποστήριγμα υπάρχει η δυνατότητα χρήσης διάφορων μαζί καταλυτών οι οποίοι μπορούν να πετύχουν ακόμα υψηλότερους ρυθμούς ηλεκτροχημικής αντίδρασης. Αυτή τη μέθοδο την χρησιμοποιούμε συνήθως σε κυψέλες καυσίμου τύπου PEM και AFC. Πολλές εταιρίες χρησιμοποιούν αυτή τη μέθοδο διότι έχουν σκοπό την εμπορευματοποίηση των κυψελών καυσίμου.

Η πυκνότητα ρεύματος ανταλλαγής είναι ο ρυθμός μεταφοράς φορτίων ανά μονάδα επιφάνειας όταν ένα ηλεκτρόδιο βρίσκεται σε δυναμική ισορροπία με το διάλυμα μέσα στο οποίο είναι βυθισμένο. Αυτό γίνεται, όταν ο ρυθμός μεταφοράς των φορτίων στο ηλεκτρόδιο της καθόδου είναι ίσο με της ανόδου. Η πυκνότητα ρεύματος ανταλλαγής είναι ένας εύχρηστος τρόπος να προσδιοριστούν οι ρυθμοί αναγωγής και οξείδωσης του ηλεκτροδίου σε ισορροπία όταν οι

απώλειες δεν υπάρχουν από το υλικό του. Στην πραγματικότητα όμως δεν γίνεται άμεση μεταφορά φορτίου γι' αυτόν τον λόγο ο χαρακτηρισμός θεωρείται εσφαλμένος.

Αρκετά υψηλή πυκνότητα ρεύματος ανταλλαγής έχει η αντίδραση οξείδωσης του  $H_2$ , ενώ η υπέρταση χαρακτηρίζεται χαμηλή. Στην περίπτωση που το  $H_2$  αναμιγνύεται με άλλα αέριο όπως για παράδειγμα το διοξείδιο ή το μονοξείδιο του άνθρακα, τότε αυξάνεται η υπέρταση της ανόδου με συνέπεια να μειωθεί το ποσοστό απόδοσης της κυψέλης καυσίμου.

Για όλους αυτούς τους λόγους, οδηγούμαστε στην αναζήτηση ηλεκτροκαταλυτών για την αντίδραση του υδρογόνου οι οποίοι αυξάνουν την πυκνότητα ρεύματος ανταλλαγής και παρουσιάζουν υψηλή ανθεκτικότητα στην διάβρωση. Ακόμα, η παρουσία  $CO_2$  και  $CO$  δεν πρέπει να ασκεί επιρροή στον ηλεκτρολύτη διότι θα χρειαστεί να προστεθεί στην κυψέλη καυσίμου ένα σύστημα καθαρισμού του οξείδωσης που θα αυξήσει έτσι το κόστος της κατασκευής.

Καθώς το ποσοστό της απόδοσης μιας κυψέλης καυσίμου εξαρτάται από την παρουσία οξειδίων του άνθρακα, οι ηλεκτροκαταλύτες που φαίνεται να μην επηρεάζονται από την παρουσία του διοξειδίου του άνθρακα είναι σύνθετοι και είναι πλατίνας-ρουθηνίου Pt-Ru. Ωστόσο, αυτό δεν ισχύει για το μονοξείδιο του άνθρακα. Ένα μειονέκτημα που έχει ο ηλεκτροκαταλύτης πλατίνας είναι ότι στις κυψέλες καυσίμου που λειτουργούν σε χαμηλές θερμοκρασίες μπορεί να απορροφήσει μεγάλη ποσότητα του  $CO_2$  με συνέπεια να δεσμεύει τις θέσεις που υπάρχουν για να καλυφθούν από υδρογόνο. Το αποτέλεσμα αυτό είναι πως μειώνεται η ηλεκτροκαταλυτική ικανότητα της πλατίνας.

Όσον αφορά την παρουσία του μονοξειδίου του άνθρακα για την αντίδραση οξείδωσης του  $H_2$ , γίνεται προτίμηση μίγματα πλατίνας με στοιχεία όπως για παράδειγμα κασσίτερο, μολυβδαίνιο και ρουθίνιο ή κράματα. Ο καταλύτης ο οποίος δεν επηρεάζεται από την παρουσία μονοξειδίου του άνθρακα και άρα φαίνεται ο κατάλληλος είναι καταλύτης πλατίνας-ρουθηνίου.

## Εφαρμογές κυψελών καυσίμου

### Εφαρμογές στα οχήματα

Η χρήση κυψελών καυσίμου αρχικά προοριζόταν για τα αυτοκίνητα. Στην συνέχεια, αφού δοκιμάστηκε άρχισε να χρησιμοποιείται περαιτέρω. Η άνεση, η ψυχαγωγία και κυρίως η ασφάλεια είναι από τις κυριότερες προϋποθέσεις στα σύγχρονα αυτοκίνητα. Συγκεκριμένα, καθώς τοποθετείται η κυψέλη καυσίμου μέσα στο αυτοκίνητο, παράγει ηλεκτρική ενέργεια η οποία θέτει σε κίνηση τον ηλεκτροκινητήρα ο οποίος κινεί τους τροχούς του αυτοκινήτου. Οι ηλεκτροκινητήρες αποδίδουν περισσότερη ισχύ στις πιο χαμηλές ταχύτητες που χρησιμοποιούνται μέσα σε μια πόλη από τους περισσότερους οδηγούς.

Παράλληλα, τα σημερινά αυτοκίνητα για την ασφάλεια της λειτουργίας τους απαιτούν αρκετές ηλεκτρονικές-ηλεκτρικές διατάξεις, για παράδειγμα μια σειρά από ηλεκτρικούς κινητήρες οι οποίοι ανοίγουν-κλείνουν παράθυρα, θέτουν σε κίνηση αντλίες, προσαρμόζουν τις θέσεις των επιβατών κτλ. Χρειάζονται όμως και συστήματα για την άνεση των επιβατών όπως είναι ο κλιματισμός, συστήματα καθοδήγησης και ήχου και πολλά άλλα.

Ο λόγος που χρησιμοποιούν κυψέλες καυσίμου τα μέσα μεταφοράς (αυτοκίνητα, λεωφορεία ακόμα και υποβρύχια) είναι γιατί μπορούν να παράγουν ισχύ από ένα κλάσμα του Watt μέχρι



εκατοντάδες kWatt. Το υδρογόνο είναι το στοιχείο που χρειάζεται η κυψέλη καυσίμου ώστε να παράξει ηλεκτρική ενέργεια, οπότε χρειάζεται κάποιον φορέα ώστε να τροφοδοτεί την κυψέλη συνεχώς με H<sub>2</sub>. Αυτοί οι φορείς μπορεί να είναι η μεθανόλη, η βενζίνη και σαφώς το φυσικό αέριο.

Οι κυψέλες καυσίμου επιτυγχάνει τον συνδυασμό με το σύστημα προώθησης του αυτοκινήτου με διάφορους τρόπους οι οποίοι είναι:

- Οι κυψέλες καυσίμου φορτίζουν τις μπαταρίες των αυτοκινήτων παρέχοντας την ισχύ που χρειάζονται. Αυτό το σύστημα μπορεί να θεωρηθεί υβριδικό. Η ισχύς της κυψέλης καυσίμου εξαρτάται από το πόσο γρήγορα χρειάζεται να ξαναφορτιστεί η μπαταρία. Πιο συγκεκριμένα, μια μεγάλη μπαταρία θα χρειαστεί αργή επαναφόρτιση άρα και μικρή ισχύος κυψέλη καυσίμου.
- Οι μεγάλες κυψέλες καυσίμου μπορούν να εφοδιάσουν το αυτοκίνητο με όλη την απαραίτητη ισχύ ώστε να μπορέσει να κινηθεί. Η παρουσία μιας μπαταρίας μικρής σε μέγεθος βοηθάει για το ξεκίνημα του κινητήρα.
- Οι κυψέλες καυσίμου που δίνουν ελάχιστη ισχύ στο όχημα. Δηλαδή, επαναφορτίζει τις διατάξεις αποθήκευσης και έτσι δουλεύει παράλληλα με την μπαταρία.
- Οι κυψέλες καυσίμου να παρέχουν ισχύ μόνο στα βοηθητικά συστήματα τα οποία είναι π κλιματισμός, θέρμανση κτλ. Η μέθοδος αυτή είναι βοηθητική σε μεγάλα οχήματα όπως είναι τα λεωφορεία.

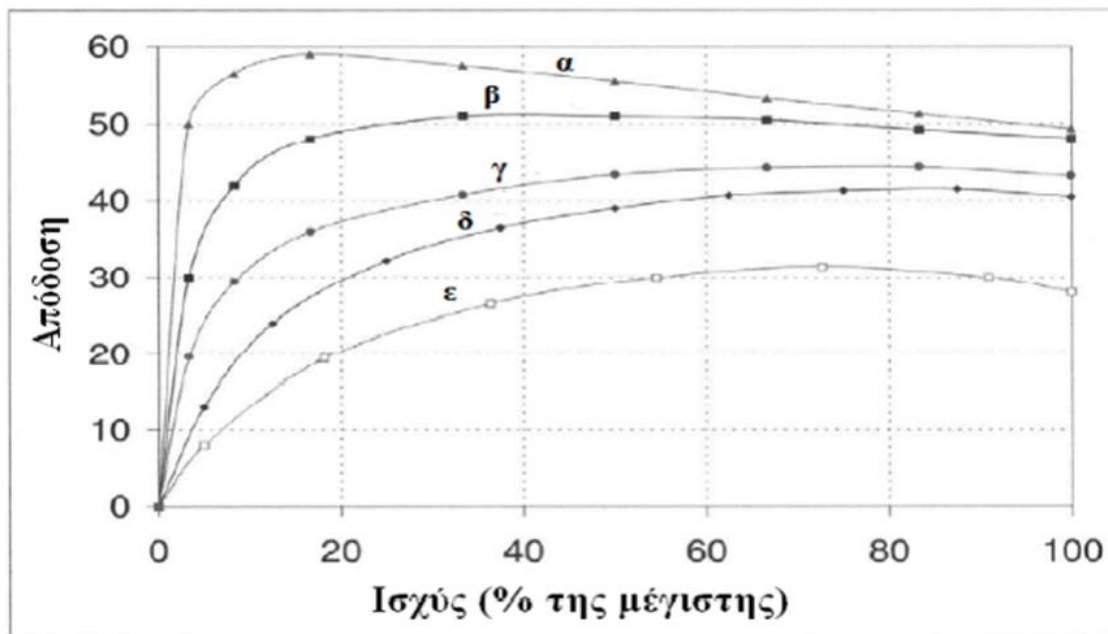
### Απαραίτητη απόδοση και ισχύς

Το εμβαδόν της μετωπικής του επιφάνειας, ο συντελεστής αεροδυναμικής αντίστασης, η ελκτική ικανότητα και η μάζα του μέσου μεταφοράς είναι παράμετροι οι οποίοι δείχνουν την απαίτηση σε ισχύ ενός κινητήρα. Προφανώς, με βάση την ταχύτητα, το φορτίο (βάρος επιβατών, αυτοκινήτου, αποσκευών), την επιτάχυνση αλλά και την κλίση του δρόμου η ισχύς του αυτοκινήτου αλλάζει.

Η απόδοση του κινητήρα ενός οχήματος εκφράζεται ως  $\frac{\text{ειδική κατανάλωση καυσίμου be (g)}}{\text{κιλοβαττώρα (kWh) παραγόμενης ενέργειας}}$ .

Η απόδοση σε ποσοστό 34% αντιστοιχεί σε βενζινοκινητήρες όπου η κατανάλωση είναι κοντά στα 240 g/kWh, ενώ η απόδοση 40% αντιστοιχεί σε κινητήρες diesel. Με τη χρήση κυψελών καυσίμου με μια κατανάλωση περίπου 60 g/kWh, το ποσοστό απόδοσης δεν φτάνει κάτω από το 50%.

Σημαντικό είναι να τονιστεί η διαφορά μιας κυψέλης καυσίμου και ενός κινητήρα εσωτερικής καύσης. Στην πρώτη περίπτωση, μπορούμε να έχουμε την μεγαλύτερη απόδοση με μικρά ποσοστά ισχύος, ενώ στην δεύτερη περίπτωση ένας κινητήρας εσωτερικής καύσης χρειάζεται μέγιστη ισχύ για να πετύχει μέγιστη απόδοση. Στο παρακάτω σχήμα φαίνονται οι διαφορές στις αποδόσεις και στην ισχύ κάθε μεθόδου και παρατηρείται ότι η χρήση κυψέλης καυσίμου με χαμηλή πίεση και θερμοκρασία είναι η πιο αποδοτική.



Εικόνα 5-16. Σύγκριση της απόδοσης των κυψελών καυσίμου με αυτή των μηχανών εσωτερικής καύσης: (α) κυψέλη καυσίμου που λειτουργεί σε χαμηλή θερμοκρασία και πίεση, (β) κυψέλη καυσίμου σε υψηλή θερμοκρασία και πίεση, (γ) κυψέλες με ενσωματωμένο αναμορφωτή καυσίμου, (δ) κινητήρας diesel, (ε) βενζινοκινητήρας. (Δημήτριος-Παναγιώτης, ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ ΓΙΑ ΠΑΡΑΓΩΓΗ)

### Σύγκριση κόστους

Εκτός από την ευκολία στην χρήση και τα περιβαλλοντικά οφέλη μια άλλη σημαντική παράμετρος είναι το κόστος. Το κόστος κατασκευής των κινητήρων εσωτερικής καύσης δεν είναι υπερβολικά υψηλό δηλαδή κυμαίνεται από 35 έως 40 \$ ανά κιλοβατώρα ισχύος, βέβαια με αυτόν τον κινητήρα δεν μετατρέπεται η χημική ενέργεια του καυσίμου απευθείας σε ηλεκτρική όπως συμβαίνει με την κυψέλη. Να τονιστεί ότι αυτό το κόστος μπορεί να οφείλεται και στην μαζική παραγωγή των κινητήρων αυτών. Λόγω του ότι οι κυψέλες καυσίμου είναι μια νέα τεχνολογία, μέχρι να εμπορευματοποιηθεί και να προχωρήσει σε μαζική παραγωγή, το κόστος της θα είναι αρκετά υψηλό. Δύο είναι οι παράμετροι που οδηγούν τις κυψέλες καυσίμου σε ένα υψηλό κόστος. Η πρώτη είναι η χρήση του ηλεκτροκαταλύτη πλατίνας το οποίο είναι ένα πολύτιμο μέταλλο και η δεύτερη είναι ότι στα οχήματα που συνήθως χρησιμοποιούνται κυψέλες καυσίμου τύπου PEM κατασκευάζονται ηλεκτρολυτικές μεμβράνες.

Για παράδειγμα, στα οχήματα που χρησιμοποιούν αυτού του είδους κυψέλες καυσίμου (PEM), χρειάζονται έναν ηλεκτροκαταλύτη πλατίνας  $0,4 \text{ mg/cm}^2$  της επιφάνειας των ηλεκτροδίων. Θεωρώντας μια πυκνότητα ισχύος  $0,7 \text{ W/cm}^2$  επιφάνειας προκύπτει ότι χρειάζεται σχεδόν  $1 \text{ mg}$  πλατίνας/  $\text{W}$  ισχύος (ή  $1 \text{ g/kW}$ ). Ωστόσο,  $20 \text{ \$}$  κοστίζει μόνο  $1 \text{ g}$  πλατίνας με αποτέλεσμα να φτάνει σχεδόν το κόστος των κινητήρων εσωτερικής καύσης χωρίς να έχει κοστολογηθεί όλη η κυψέλη καυσίμου ακόμα.

Όσον αφορά το κόστος κατασκευής των πολυμερικών μεμβρανών, αυτό ανέρχεται στα 500 \$/m<sup>2</sup> (70\$/kW). Παρ' όλα αυτά, οι κατασκευαστές θεωρούν ότι εάν αυξηθεί αρκετά η ζήτηση των μεμβρανών τότε σαφώς και θα μειωθεί το κόστος στο μισό.

Τελικά, για να επιτευχθούν όλοι αυτοί οι στόχοι θα πρέπει να βελτιωθεί η απόδοση των κυψελών καυσίμου, να μειωθεί η μάζα του ηλεκτροκαταλύτη πλατίνας ή αλλιώς να βρεθεί ένα άλλο υλικό το οποίο είναι φθηνότερο και τέλος να μειωθεί και το κόστος κατασκευής των μεμβρανών.

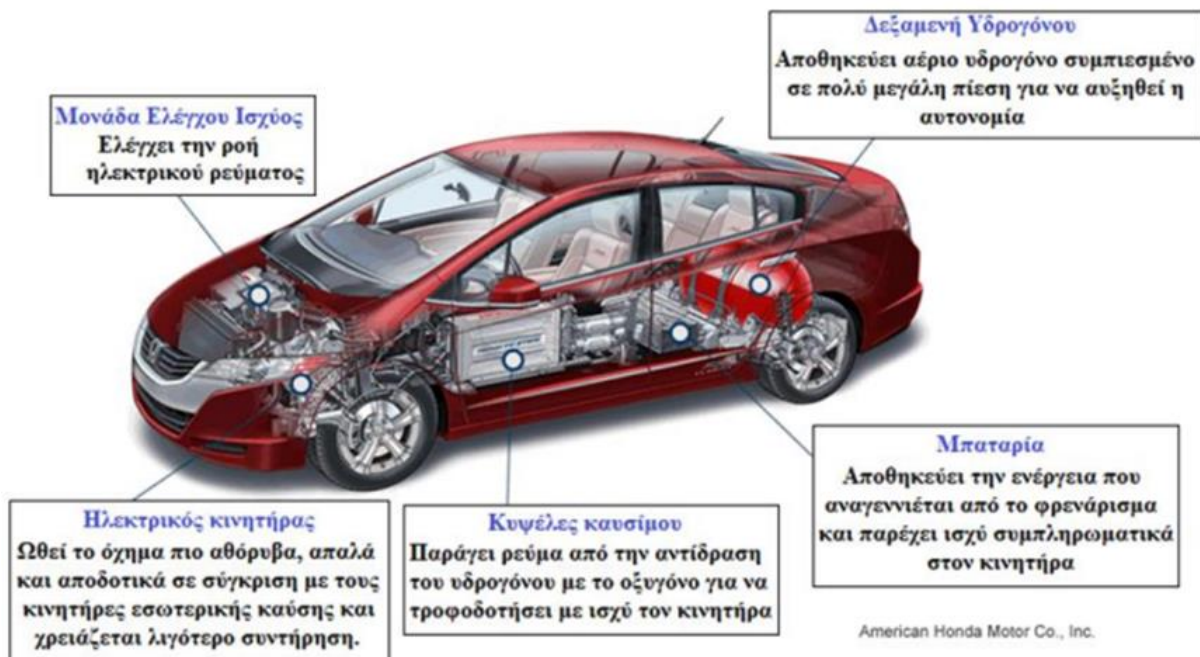
### Προβλήματα που αφορούν το καύσιμο

Οι κυψέλες καυσίμου όπως προαναφέρθηκε ως καύσιμο χρησιμοποιούν το υδρογόνο. Αυτό μπορεί να προέλθει από διάφορες πηγές όπως είναι η μεθανόλη, η βενζίνη και το φυσικό αέριο. Ωστόσο, η επιλογή του εξαρτάται από διάφορους παράγοντες οι οποίοι είναι:

- Η εθνική πολιτική της χώρας.
- Κατά πόσο πολύπλοκη είναι η κατασκευή και πόσο κοστίζει η αποθήκευση, η μεταφορά και η διανομή.
- Η ασφάλεια και η αποφυγή τυχόν ατυχημάτων.
- Η υποδομή και τα δίκτυα διανομής που υπάρχουν σε συνδυασμό με το κόστος της κατασκευής δικτύου διανομής καινούριου καυσίμου.
- Περιβαλλοντικές συνέπειες.
- Η τιμή ανά λίτρο καυσίμου σε σχέση με τα χιλιόμετρα που διανύει το όχημα με 1 lt αυτού του καυσίμου.

Ένα σημαντικό εμπόδιο για να αναπτυχθούν και να εφαρμοστούν οι κυψέλες καυσίμου είναι η ανεπάρκεια υποδομών για το H<sub>2</sub>. Λόγω του ότι δεν υπάρχει ζήτηση σε H<sub>2</sub>, δεν υπάρχουν και σταθμοί ανεφοδιασμού. Παρ' όλα αυτά, η πιο οικονομική λύση για εφοδιασμό υδρογόνου είναι από το φυσικό αέριο και όχι από την βενζίνη διότι η τιμή του είναι 2-3 φορές χαμηλότερη από την τιμή της βενζίνης.

Άλλο ένα εμπόδιο είναι η αποθήκευση του υδρογόνου. Το H<sub>2</sub> αποθηκεύεται μόνο όταν είναι υδρίδιο κάποιου μετάλλου ή συμπιεσμένο αέριο ή υγροποιημένο. Βέβαια, τα δοχεία που αποθηκεύεται το συμπιεσμένο υδρογόνο είναι πολύ μεγάλα ακόμα και σε πιέσεις 450 bar. Για να αποθηκευτεί 1 κιλό υδρογόνου απαιτείται 40-50 lt κενού χώρου. Προφανώς, ένα αυτοκίνητο που μεταφέρει καύσιμο εξαρτάται από την χιλιομετρική κατανάλωση που μετρείται σε lt καυσίμου/100 km διαδρομής.



Εικόνα 5-17. Όχημα με κυψέλη καυσίμου. (Fuel economy)

Το υδρογόνο που είναι σε υγροποιημένη μορφή καταλαμβάνει λιγότερο όγκο σχεδόν 30 lt/kg όμως η υγροποίηση του συμβαίνει σε αρκετά χαμηλές θερμοκρασίες (-253°C). Επίσης, χρειάζεται ενέργεια περίπου το 30% της ισοδύναμης ενέργειας του υγροποιημένου H<sub>2</sub>. Ενώ η συμπίεση γίνεται στα 450 bar και η ενέργεια που απαιτείται είναι στα 10% της ισοδύναμης ενέργειας.

### Τύποι κυψελών καυσίμου

Ανάλογα λοιπόν με τον τύπο του ηλεκτρολύτη οι κυψέλες καυσίμου διακρίνονται σε:

- Κυψέλες καυσίμου στερεών οξειδίων SOFC
- Κυψέλες καυσίμου άμεσης μεθανόλης DMFC
- Κυψέλες καυσίμου τήγματος ανθρακικών αλάτων MCFC
- Κυψέλες καυσίμου πολυμερών ηλεκτρολυτών PEFC
- Αλκαλικές κυψέλες καυσίμου AFC
- Κυψέλες καυσίμου φωσφορικού οξέος PAFC

Πίνακας 5-3. Αντιδράσεις κάθε τύπου κυψέλης καυσίμου. (ΖΟΥΝΤΟΥΡΙΔΟΥ, ΑΝΑΛΥΣΗ-ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΚΥΨΕΛΩΝ ΚΑΥΣΙΜΟΥ ΚΑΙ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΚΥΨΕΛΗΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ ΜΕΜΒΡΑΝΗΣ ΑΝΤΑΛΛΑΓΗΣ ΠΡΩΤΟΝΙΩΝ (PEMFC) ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ, 2006)

<b>ΚΥΨΕΛΗ ΚΑΥΣΙΜΟΥ</b>	<b>ΑΝΤΙΔΡΑΣΗ ΑΝΟΔΟΥ</b>	<b>ΜΕΤΑΦΕΡΟΜΕΝΟ ΙΟΝ</b>	<b>ΑΝΤΙΔΡΑΣΗ ΚΑΘΟΔΟΥ</b>
<b>AFC</b>	$H_2 + 2OH^- \rightarrow 2H_2O + 2e^-$	$OH^-$	$O_2 + 2H_2O + 4e^- \rightarrow 2OH^-$
<b>PEMFC</b>	$H_2 \rightarrow 2H_2 + 2e^-$	$H^+$	$O_2 + 4H^+ \rightarrow 2H_2O$
<b>DMFC</b>	$CH_3OH + H_2O \rightarrow CO_2 + 6H^+ + 6e^-$	$H^+$	$O_2 + 4H^+ + 4e^- \rightarrow 2H_2O$
<b>PAFC</b>	$H_2 \rightarrow 2H_2 + 2e^-$	$H^+$	$O_2 + 4H^+ \rightarrow 2H_2O$
<b>MCFC</b>	$H_2 + CO_3^- \rightarrow H_2O + 2e^-$	$CO_3^-$	$O_2 + 2CO_2 + 4e^- \rightarrow CO_3^-$
<b>SOFC</b>	$H_2 + O^- \rightarrow H_2O + 2e^-$ $CO + O_2 \rightarrow CO_2 + 2e^-$	$O^-$	$O_2 + e^- \rightarrow 2O^-$

Πανεπιστήμιο Δυτικής Μακεδονίας-Τμήμα Χημικών Μηχανικών

Πίνακας 5-4. Τύποι κυψελών καυσίμου και βασικά στοιχεία. (ΖΟΥΝΤΟΥΡΔΟΥ, ΑΝΑΛΥΣΗ-ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΚΥΨΕΛΩΝ ΚΑΥΣΙΜΟΥ ΚΑΙ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΚΥΨΕΛΗΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ ΜΕΜΒΡΑΝΗΣ ΑΝΤΑΛΛΑΓΗΣ ΠΡΩΤΟΝΙΩΝ (PEMFC) ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ, 2006)

	ΤΥΠΟΙ ΚΥΨΕΛΩΝ ΚΑΥΣΙΜΟΥ					
	AFC	PEMFC	DMFC	PAFC	MCFC	SOFC
<b>Ηλεκτρολύτης</b>	Υδροξείδιο του καλίου	Πολυμερές	Πολυμερές	Φωσφορικό οξύ	Μίγμα ανθρακικών αλκαλίων	Σταθεροποιημένο ζιρκόνιο
<b>Κατάσταση ηλεκτρολύτη</b>	Υγρός	Στερεός	Στερεός	Ακίνητοποιημένο υγρό	Ακίνητοποιημένο υγρό	Στερεός
<b>Θερμοκρασία λειτουργίας</b>	60-90	70-100	90	150-220	600-700	650-1000
<b>Ανταλλάξιμο φορτίο</b>	OH <sup>-</sup>	H <sup>+</sup>	H <sup>+</sup>	H <sup>+</sup>	CO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	O <sup>-</sup>
<b>Ανοδος</b>	Ni ή Pt	Λευκόχρυσος	Λευκόχρυσος ή ρουθίνιο	Λευκόχρυσος	Οξειδίο του νικελίου	Στερεός
<b>Κάθοδος</b>	Pt ή οξειδίο του νικελίου	Λευκόχρυσος	Λευκόχρυσος ή ρουθίνιο	Λευκόχρυσος	Οξειδίο του νικελίου	Σταθεροποιημένο ζιρκόνιο
<b>Δομή κυψέλης</b>		Βασιμένη σε γραφίτη	Ανοξειδωτο ατσάλι			Κεραμικό υλικό
<b>Καταλύτης</b>		Λευκόχρυσος		Λευκόχρυσος	Νικέλιο	Υπεροξείδια
<b>Θερμότητα από συμπαραγωγή</b>	Καθόλου	Χαμηλής ποιότητας	Καθόλου	Αποδεκτή για πολλές εφαρμογές	Υψηλή	Υψηλή
<b>Βάθος απόδοσης</b>	50-70%	40-50%	25-40%	40-45%	50-60%	50-60%
<b>Καύσιμο</b>	H <sub>2</sub> . Απαραίτητη η απομάκρυνση του CO <sub>2</sub> από τα αέρια της ανόδου και καθόδου	H <sub>2</sub> . Αν αυτό προέρχεται από αναμόρφωση, η περιεκτικότητα σε CO να είναι CO <10ppm	Διάλυμα νερού/μεθανόλης	H <sub>2</sub> και από αναμόρφωση	H <sub>2</sub> , CO, φυσικό αέριο	H <sub>2</sub> , CO, φυσικό αέριο
<b>Μέγιστη πυκνότητα ισχύος</b>		700		200	160	200(500 υπό ανάπτυξη)
<b>Ισχύς</b>	Μέχρι 20kW	Μέχρι 250kW	<10kW	>50kW	>1MW	>200kW
<b>Εφαρμογές</b>	Μικρές μονάδες. Χρήση σε διαστημικές εφαρμογές	Οικιακή και εμπορική παραγωγή. Συστήματα κίνησης οχημάτων.	Φορητές συσκευές	Εμπορική παραγωγή. Μεγάλα οχήματα	Εμπορική και βιομηχανική παραγωγή. Μονάδες μεγάλης ισχύος	Οικιακή, εμπορική και βιομηχανική παραγωγή

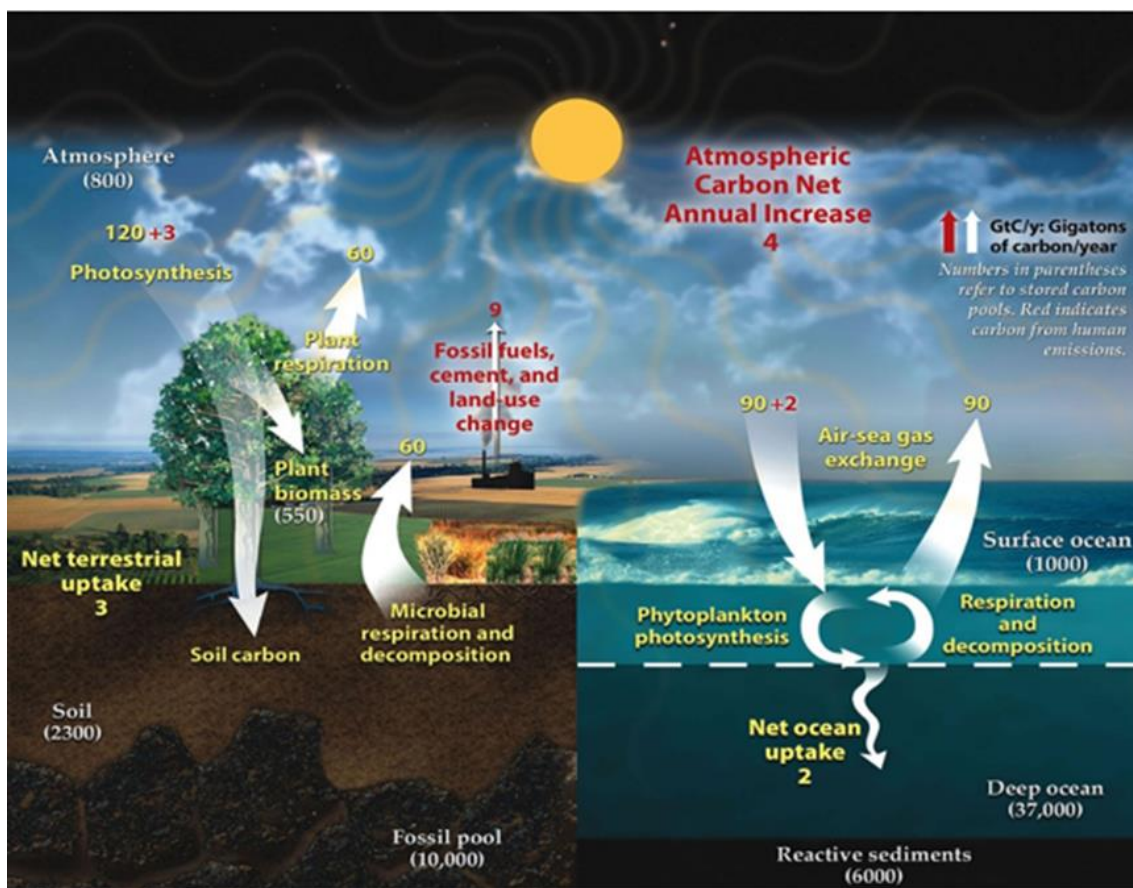
## 6. Δέσμευση και αξιοποίηση του άνθρακα

### *Ιστορική ανασκόπηση*

Το διοξείδιο του άνθρακα, μια από τις ενώσεις που περιλαμβάνει ο αέρας ήταν το πρώτο συστατικό που ερευνήθηκε την εποχή του μεσαίωνα. Ο Φλαμανδός ο οποίος ήταν ιατρός και χημικός κατά τον 17<sup>ο</sup> αιώνα αντιλήφθηκε πως κατά την διεργασία της καύσης άνθρακα σε ένα κλειστό δοχείο, προκύπτει ότι η μάζα της στάχτης είναι αρκετά πιο μικρή της αρχικής. Το συμπέρασμα – εξήγηση που διεξήχθη ήταν ότι κάποιο κομμάτι του αρχικού άνθρακα μετατράπηκε σε ένα αόρατο αέριο που το ονόμασε «wild spirit» ή gas. Ο φυσιολόγος Joseph Black, την δεκαετία του 1750-1760 έκανε μια σημαντική διαπίστωση ότι το CO<sub>2</sub> είναι πυκνότερο από τον αέρα με αποτέλεσμα να μην συμμετέχει στις ζωικές λειτουργίες των οργανισμών. Σαν συμπέρασμα ο Black κατέληξε πως το CO<sub>2</sub> ήταν το προϊόν της ζύμωσης των μικροοργανισμών και της αναπνοής των ζώων.

### *Ο κύκλος του άνθρακα*

Ο κύκλος του άνθρακα είναι μια φυσική κυκλική διαδικασία μετατροπής της ανόργανης οξειδωμένης μορφή του (CO<sub>2</sub>) στη μορφή διάφορων οργανικών ενώσεων στο φυτικό αλλά και στο ζωικό βασίλειο. Ως βασικό σημείο του κύκλου του άνθρακα είναι οι χερσαίοι και υδατικοί φωτοσυνθετικοί οργανισμοί στους οποίους πραγματοποιείται η δέσμευση του διοξειδίου του άνθρακα. Έπειτα το διοξείδιο του άνθρακα θα μετατραπεί σε οργανικές ενώσεις όπου προσλαμβάνονται από τους ζωικούς οργανισμούς και μετά ξανά εκλύεται στο περιβάλλον.



Εικόνα 6-1. Ο βιο-γεωχημικός κύκλος του άνθρακα. (ΑΝΑΚΤΗΣΗ ΚΑΙ ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗ ΤΟΥ ΔΙΟΞΕΙΔΙΟΥ ΤΟΥ ΑΝΘΡΑΚΑ, 2020)

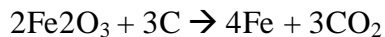
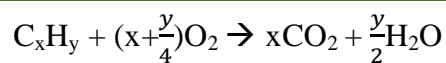
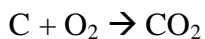
### Τρόποι παρασκευής και σύνθεσης του διοξειδίου του άνθρακα

Το κύριο προϊόν καύσης κάθε μορφής άνθρακα άρα και κάθε είδους οργανικής ένωσης είναι σαφέστατα το CO<sub>2</sub>. Η ένωση αυτή συμμετέχει ή ακόμα και παρασκευάζεται σε πάρα πολλές αντιδράσεις που πραγματοποιούνται στην φύση αλλά και στην βιομηχανία. Όσον αφορά τον τομέα του εργαστηρίου το διοξείδιο του άνθρακα μπορεί να παρασκευαστεί αντιδρώντας με ισχυρό οξύ όπως είναι για παράδειγμα το HCl, με ανθρακικά ορυκτά όπως ο ασβεστόλιθος και με μαγειρική σόδα.



Στον τομέα της βιομηχανίας το διοξείδιο του άνθρακα μπορεί να παραχθεί με αναγωγή μεταλλικών οξειδίων με άνθρακα, με πύρωση ανθρακικών ορυκτών και ακόμα με την ζύμωση σακχάρων. Παρακάτω φαίνονται οι αντιδράσεις.





Σημαντικό είναι να τονιστεί πως οι αντιδράσεις παραγωγής υδρογόνου μέσω ατμοαναμόρφωσης μεθανίου ή μέσω μετατόπισης του μονοξειδίου του άνθρακα είναι αντιδράσεις που πραγματοποιούνται σε μεγάλη κλίμακα στην βιομηχανία και παράγουν μεγάλες ποσότητες  $\text{CO}_2$ . Παρατηρείται λοιπόν ότι στη βιομηχανία είναι πολύ εύκολο να παραχθεί διοξείδιο του άνθρακα διότι αποτελεί παραπροϊόν πολλών βιομηχανικών αντιδράσεων.

### ***Τοξικότητα του $\text{CO}_2$***

Η τοξικότητα του διοξειδίου του άνθρακα είναι ανάλογη με την συγκέντρωση. Συγκεκριμένα σε χαμηλές συγκεντρώσεις το  $\text{CO}_2$  δεν είναι τοξικό, σε υψηλές όμως μπορεί να οδηγήσει σε σοβαρές επιπτώσεις για τον οργανισμό όπως καρδιακές αρρυθμίες, αύξηση αρτηριακής πίεσης και σε κλειστούς χώρους δρα ως ναρκωτικό.

Πίνακας 6-1. Επιδράσεις CO<sub>2</sub> σε διάφορες συγκεντρώσεις στον ανθρώπινο οργανισμό. (ΓΟΥΝΗΣ, ΑΝΑΚΤΗΣΗ ΚΑΙ ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗ ΤΟΥ ΔΙΟΞΕΙΔΙΟΥ ΤΟΥ ΑΝΘΡΑΚΑ, 2020)

<b>1000 ppm/0,1%</b> → Παρατεταμένη έκθεση επηρεάζει την ικανότητα συγκέντρωσης
<b>5000 ppm/0,5%</b> → Το κανονικό όριο ασφάλειας (HSE, OSA)
<b>10.000 ppm/1%</b> → Αυξάνει κάπως ο ρυθμός αναπνοής
<b>15.000 ppm/1,5%</b> → Το κανονικό όριο για σύντομη έκθεση
<b>20.000 ppm/2%</b> → Ο ρυθμός αναπνοής αυξάνεται κατά 50%. Έκθεση για κάποιες ώρες προκαλεί κόπωση και κεφαλαλγία
<b>30.000 ppm/3%</b> → Διπλασιάζεται ο ρυθμός αναπνοής. Πιθανός ίλιγγος, αύξηση καρδιακού ρυθμού πίεσης, κεφαλαλγία. Μείωση ακουστικής οξύτητας.
<b>40.000-50.000 ppm/4-5%</b> → Όριο έναρξης επικίνδυνων συμπτωμάτων. Τετραπλασιάζεται ο ρυθμός αναπνοής. Σε 30 λεπτά εμφανίζονται ενδείξεις δηλητηρίασης και αίσθημα ασφυξίας.
<b>50.000-100.000 ppm/5-10%</b> → Αίσθημα όξινης γεύσης οξυανθρακούχου ποτού. Δύσκολη αναπνοή, ίλιγγος, πονοκέφαλος, προβλήματα όρασης. Σύγχυση μετά από λίγα λεπτά και λιποθυμία.
<b>100.000-1.000.000 ppm/10-100%</b> → Αναισθησία επερχόμενη ταχύτερα, όσο μεγαλύτερη η συγκέντρωση. Ασφυξία

### **Πηγές εκπομπών του CO<sub>2</sub>**

Οι πηγές εκπομπής του διοξειδίου του άνθρακα χωρίζονται σε φυσικές και ανθρωπογενείς, σταθερές ή κινητές. Ως φυσική πηγή εκπομπής CO<sub>2</sub> μπορεί να θεωρηθεί μια ηφαιστειακή έκρηξη καθώς μπορεί να παράγει τον συγκεκριμένο ρύπο στα επίπεδα των 200·10<sup>3</sup> τόνους CO<sub>2</sub> παγκοσμίως. Ακόμα, φυσικές πηγές μπορεί να είναι η διάλυση των ανθρακικών πετρωμάτων, η αναπνευστική λειτουργία όλων των ζωντανών οργανισμών και τέλος η αποδόμηση φυτικής βιομάζας. Οι ανθρωπογενείς εκπομπές CO<sub>2</sub> περιλαμβάνουν δραστηριότητες όπως είναι η γεωργία, η κτηνοτροφία, η βιομηχανία, η θέρμανση κτιρίων και η παραγωγή ενέργειας. Ωστόσο την μεγαλύτερη πηγή εκπομπής αποτελεί η παραγωγή ενέργειας με ποσοστό 78% επί των συνολικών ανθρωπογενών πηγών ενέργειας με το CO<sub>2</sub> να αποτελεί το κυριότερο θερμοκηπιακό ρύπο με ποσοστό συμμετοχής περίπου 80% επί του συνόλου των εκλυόμενων αερίων του θερμοκηπίου.

Πίνακας 6-2. Κατανομή του μέσου όρου των εκπομπών CO<sub>2</sub> ανά κατηγορία του ενεργειακού τομέα στην Ελλάδα για τα έτη 2008-2015. (ΑΝΑΚΤΗΣΗ ΚΑΙ ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗ ΤΟΥ ΔΙΟΞΕΙΔΙΟΥ ΤΟΥ ΑΝΘΡΑΚΑ, 2020)

Κατηγορία ενεργειακού τομέα	Ποσοστό εκπομπών (μ.ο)
Μεταφορές και αποθήκευση	8,2%
Μονάδες Ηλεκτρικής Ενέργειας	51,2%
Νοικοκυριά και οικιακή θέρμανση	19,52%
Συνολικές εκπομπές CO <sub>2</sub> από τον ενεργειακό τομέα	78,92%

Οι συμβατικές πηγές ενέργειας παράγουν διοξείδιο του άνθρακα, μονοξείδιο του άνθρακα, οξείδια του αζώτου, οξείδια του θείου, πτητικές οργανικές ενώσεις και σωματιδιακούς ρύπους. Η καύση του λιγνίτη για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας δημιουργεί όλες τις παραπάνω εκπομπές καθώς αποτελεί μια φθηνή πηγή ενέργειας. Σημαντικό είναι να γίνει αναφορά η περιβαλλοντική επιβάρυνση των περιοχών εξόρυξης του, τόσο στο έδαφος όσο και στην τοπική ατμόσφαιρα λόγω των υψηλών συγκεντρώσεων αιωρούμενων σωματιδίων. Υπάρχει όμως μια συμβατική πηγή ενέργειας η οποία παράγει τις λιγότερες εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα ανά μονάδα μάζας και παραγόμενης ενέργειας. Αυτή είναι το φυσικό αέριο το οποίο περιέχει κυρίως μεθάνιο (υδρογονάνθρακας) δίνοντας λιγότερο εκλυόμενο διοξείδιο του άνθρακα 2,75 kg/1 kg CH<sub>4</sub> στην τέλεια καύση του. Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται πόσες εκπομπές αέριου ρύπου παράγει κάθε καύσιμο και παρατηρείται πως το φυσικό αέριο έχει τις λιγότερες.

Πίνακας 6-3. Στοιχεία καυσίμων. (ΑΝΑΚΤΗΣΗ ΚΑΙ ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗ ΤΟΥ ΔΙΟΞΕΙΔΙΟΥ ΤΟΥ ΑΝΘΡΑΚΑ, 2020)

Καύσιμο	Κατώτερος θερμογόνος δύναμη (kWh/kg)	Εκπομπές αέριου ρύπου (g/kg καυσίμου)					
		CO <sub>2</sub>	SO <sub>2</sub>	CO	NO <sub>x</sub>	HC	PM
Μαζούτ	11,45	3,175	14	0,565	5,363	0,188	1,832
Ντίζελ	11,92	3,142	0,7	0,572	2,384	0,191	0,286
Φυσικό Αέριο	13,83	2,715	0,0	0,332	2,102	0,08	0,1

Ο πρωτογενής έλεγχος των εκπομπών έχει σκοπό να αποφύγει όσο το δυνατό περισσότερο την δημιουργία αερίων του θερμοκηπίου κυρίως του CO<sub>2</sub> από τις ανθρωπογενείς πηγές όπως είναι για παράδειγμα οι μονάδες παραγωγής ενέργειας. Επομένως, ο πρωτογενής έλεγχος κάνει

προσπάθειες να μειώσει ή ακόμα και να αποφύγει την δημιουργία προϊόντων καύσης υδρογονανθράκων με σκοπό την μείωση έκλυσης του διοξειδίου ή άλλων αντίστοιχων αέριων ρύπων του θερμοκηπίου. Αυτός ο σκοπός μπορεί να πραγματοποιηθεί με δύο τρόπους. Ο ένας τρόπος είναι η χρήση καθαρότερων καυσίμων όπως είναι το φυσικό αέριο στις βιομηχανίες και στις μεταφορές. Ο άλλος τρόπος είναι χρήση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας με κατάργηση της χρήσης όλων των ορυκτών καυσίμων.

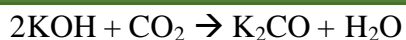
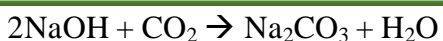
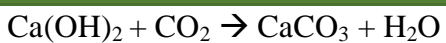
Καθώς η Διεθνής κοινότητα αντιλήφθηκε τις αρνητικές συνέπειες της κλιματικής αλλαγής από τους ρύπους, πήρε αποφάσεις χρησιμοποιώντας πρωτογενούς και δευτερογενούς ελέγχους εκπομπών αέριων ρύπων οι οποίοι προέρχονται από ανθρώπινη δράση. Έτσι, οι γενικοί στόχοι που έθεσε το Ευρωπαϊκό Συμβούλιο αφορούν την μείωση του CO<sub>2</sub> και πιο γενικά των αέριων ρύπων κατά 40% σε σχέση με αυτές του 1990, έως το 2030. Ωστόσο, το 2030 το 27% της ενέργειας θα προέρχεται αποκλειστικά και μόνο από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Τέλος, θα χρειαστεί η βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης σε ποσοστό 27%. Με λίγα λόγια, για να επιτευχθούν οι παραπάνω στόχοι υπάρχουν τρεις τρόποι.

- i. Χρήση καθαρότερων καυσίμων νέας τεχνολογίας όπου θα υπάρχουν χαμηλές εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα.
- ii. Χρήση ολοένα και περισσότερο ΑΠΕ.
- iii. Βελτίωση τεχνικών ελέγχου εκπομπών δίνοντας έμφαση στο CO<sub>2</sub> μέσω τεχνολογιών δέσμευσης.

### 6.1. Δέσμευση του CO<sub>2</sub>

Δέσμευση του διοξειδίου το άνθρακα σε αναπνευστικές συσκευές με νατράσβεστο

Η νατράσβεστος είναι μια ανόργανη χημική ουσία όπου έχει την ικανότητα να δεσμεύει το CO<sub>2</sub> απορροφώντας την υγρασία. Με αυτήν την ιδιότητα η νατράσβεστος χρησιμοποιείται σε αναπνευστικές συσκευές κλειστού ή ημίκλειστου κυκλώματος CCUBA σε πυροσβεστικές στολές, σε υποβρύχια, σε καταδυτικούς κώδωνες κτλ. Ακόμα και στην ιατρική χρησιμοποιείται για την δέσμευση του CO<sub>2</sub> που εκλύεται κατά την αναπνοή των ασθενών όταν βρίσκονται σε νάρκωση. Σε αυτού του είδους συσκευές πραγματοποιούνται οι παρακάτω αντιδράσεις:



Δέσμευση του CO<sub>2</sub> από το ρεύμα καυσαερίων, μετά την καύση ορυκτών καυσίμων

Το CO<sub>2</sub> μπορεί να δεσμευτεί με 4 τρόπους:

- i. Από τις χημικές βιομηχανίες
- ii. Κατά τον καθαρισμό του φ.α

iii. Κατά την επεξεργασία του πετρελαίου

iv. Από το ρεύμα καυσαερίων της καύσης ορυκτών καυσίμων στις μονάδες παραγωγής ενέργειας.

#### Διαχωρισμός και δέσμευση του διοξειδίου του άνθρακα με διαλύτες

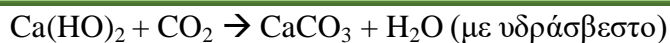
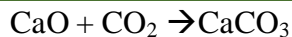
Στα διυλιστήρια για τον καθαρισμό του φυσικού αερίου εδώ και πολλά χρησιμοποιούν την μέθοδο της απορρόφησης που είναι ανάλογη της πίεσης και της θερμοκρασίας για δέσμευση του CO<sub>2</sub> σε διαλύματα διαφόρων χημικών ουσιών. Αυτήν την μέθοδο πλέον την χρησιμοποιούν και στον διαχωρισμό του από τα καυσαέρια των μονάδων ηλεκτροπαραγωγής. Η διαδικασία της μεθόδου αυτής είναι η εξής. Αρχικά, ψύχονται τα καυσαέρια μαζί με το CO<sub>2</sub> και έπειτα αναμειγνύονται με ένα διαλύτη όπως για παράδειγμα είναι η αμίνη, στους 40 με 60°C με σκοπό να δεσμευτεί το CO<sub>2</sub> ενώ όλα τα άλλα αέρια εξέρχονται από το διάλυμα. Στην συνέχεια, για να αποθηκευτεί ή να χρησιμοποιηθεί πρέπει να θερμανθεί το διάλυμα με το δεσμευμένο CO<sub>2</sub>. Αυτή η διαδικασία μπορεί να επαναληφθεί αρκετές φορές συνεχόμενα με το ρεύμα των καυσαερίων να έχει καθαριστεί (αποθείωση) κυρίως όταν έχει χρησιμοποιηθεί σαν καύσιμο ο γαιάνθρακας και το πετρέλαιο. Η φυσική απορρόφηση εννοείται κυρίως σε χαμηλές θερμοκρασίες και μεγάλες πιέσεις (525 kPa). Η χημική απορρόφηση εννοείται σε χαμηλές πιέσεις διοξειδίου του άνθρακα κάτω από 525 kPa. Χρησιμοποιούνται βασικούς διαλύτες αμίνων στην χημική απορρόφηση διότι το CO<sub>2</sub> είναι όξινο αέριο, διαλυόμενο σε H<sub>2</sub>O και σχηματίζει ανθρακικό και όξινο ανθρακικό οξύ. Παραδείγματα τέτοιων αμινών είναι η διαιθανολαμίνη, η μονοαιθανολαμίνη και η μεθυλδιαιθανολαμίνη. Η παραπάνω διαδικασία είναι από τις πιο αποτελεσματικές σε ποσοστό 98% όμως απαιτεί μεγάλη ποσότητα διαλύτη. Υπάρχει ένα βασικό μειονέκτημα που έχει η χημική απορρόφηση και αυτό είναι ότι το μεγάλο ενεργειακό κόστος κατά την φάση ανάκτησης της αμίνης.

#### Κρυογενικός διαχωρισμός

Ένας άλλος τρόπος για να διαχωριστεί το CO<sub>2</sub> από τα άλλα αέρια με επαναλαμβανόμενα και διαδοχικά βήματα ψύξης και συμπύκνωσης. Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται σε συγκεντρώσεις διοξειδίου του άνθρακα πάνω από το 90%. Το κυριότερο μειονέκτημα της διαδικασίας αυτής είναι ότι χρειάζεται αρκετά υψηλή ποσότητα ενέργειας για την ψύξη και απομάκρυνση του H<sub>2</sub>O από τα καυσαέρια πριν από την ψύξη. Τέλος, μετά από αυτήν την διαδικασία το CO<sub>2</sub> είναι καθαρό και συμπιεσμένο με αποτέλεσμα να μεταφέρεται και να αποθηκεύεται εύκολα για μελλοντική χρήση.

#### Προσρόφηση σε CaO

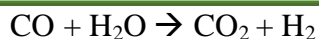
Το διοξείδιο του άνθρακα δεσμεύεται μέσω του κύκλου ενανθράκωσης/ασβεστοποίησης σε ροφητικό υλικό συνήθως σε οξείδιο του ασβεστίου ή σε συνθετικό ροφητή που βασίζεται στο CaO με την μέθοδο της αυτανάφλεξης. Με την χρήση του υδράσβεστου βελτιώνεται και σταθεροποιείται η απόδοση του κύκλου. Αυτή η μέθοδος της προσρόφησης έχει σαν βάση την αντίδραση ενανθράκωσης σε πίεση 1 atm και θερμοκρασία 670°C.



Έπειτα σε έναν άλλον αντιδραστήρα σταθερής κλίνης σε θερμοκρασία περίπου 900°C γίνεται η εκρόφηση και η συλλογή του CO<sub>2</sub> από CaCO<sub>3</sub> για να ξανά σχηματιστεί CaO με βάση την αντίστροφη πορεία των παραπάνω αντιδράσεων.

### Προσρόφηση σε στερεά μεγάλου εμβαδού

Ενώσεις που έχουν την δυνατότητα να προσροφούν με φυσική προσρόφηση διάφορα αέρια εξαιτίας του μεγάλου επιφανειακού εμβαδού είναι ο ενεργός άνθρακας, ο ζεόλιθος και τα οξειδία μετάλλων. Η εκρόφηση των στερεών προκύπτει με την αύξηση της θερμοκρασίας και την μείωση της πίεσης, ενώ αντίθετα συμβαίνει η προσρόφηση. Η στήλη PSA χρησιμοποιείται για τον διαχωρισμό του CO<sub>2</sub> από το φυσικό αέριο, αλλά για την απομάκρυνση του και την παραγωγή H<sub>2</sub> χρησιμοποιείται ο αντιδραστήρας water gas shift που περιλαμβάνει την παρακάτω αντίδραση:



### Διαχωρισμός με μεμβράνες

Οι μεμβράνες βοηθάνε στον διαχωρισμό του διοξειδίου του άνθρακα με τα άλλα αέρια διότι αποτελούνται από συνθετικά πολυμερή που επιτρέπουν την διάχυση επιλεγμένων αερίων. Υπάρχουν δύο είδη μεμβρανών. Οι πολυμερικές μεμβράνες οι οποίες είναι σχετικά φθηνές αλλά δεν πετυχαίνουν υψηλή ροή αερίου και οι πορώδεις ανόργανες μεμβράνες οι οποίες χρησιμοποιούν ποικίλους μηχανισμούς μεταφοράς αερίων και είναι πολύ πιο διαπερατές από τις άλλες μεμβράνες. Βέβαια οι ανόργανες μεμβράνες έχουν αρκετά μεγάλο κόστος όμως μπορούν να λειτουργήσουν σε υψηλές συνθήκες θερμοκρασίας, πίεσης και διάβρωσης.

### Καύση με οξυγόνο

Στην συγκεκριμένη περίπτωση το καύσιμο θα καεί με καθαρό οξυγόνο και όχι με αέρα ώστε να αποφευχθούν αέρια, όπως το άζωτο. Σε αυτήν την μέθοδο είναι απαραίτητος ένας εναλλάκτης θερμότητας διότι η καύση μπορεί να αγγίξει τους 3500°C με αποτέλεσμα να γίνει αναγκαία η ελάττωση της. Το καύσιμο με τον άνθρακα έρχεται σε μίξη με το καθαρό O<sub>2</sub> αλλά και με το καυσαέριο που ανακυκλώνεται παράγοντας έτσι CO<sub>2</sub> και υδρατμούς. Χρησιμοποιώντας συμπύκνωση γίνεται απομάκρυνση του νερού από τα προϊόντα και μια μονάδα κρυογονικού διαχωρισμού αέρα (ASU) για την απομάκρυνση περισσειας οξυγόνου και άλλων ρύπων. Το βασικό μειονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι το ενεργειακό κόστος στη μονάδα ASU, όμως τα πλεονεκτήματα είναι περισσότερα εφόσον το κόστος για να δεσμευτεί το διοξείδιο του άνθρακα είναι το φθηνότερο σε σχέση με άλλες μεθόδους εξαιτίας του μικρού όγκου καυσαερίων και της μεγάλης απόδοσης που μπορεί να φτάνει και το 100%.

### Δέσμευση του CO<sub>2</sub> σε ηλεκτροχημικά κελιά

Οι κυψέλες καυσίμου χρησιμοποιούνται περίπου εδώ και 50 χρόνια για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας αλλά και αποθήκευση της. Υπάρχουν διάφορα είδη κυψελών. Αυτή όμως που αφορά την δέσμευση του διοξειδίου του άνθρακα είναι η κυψέλη καυσίμου τήγματος ανθρακικών αλάτων MCFC. Συγκεκριμένα έχει την δυνατότητα να απορροφά το οξυγόνο (από τον αέρα) και το διοξείδιο του άνθρακα (ατμοαναμόρφωση φ.α) στην κάθοδο, ενώ μπορεί να εξέρθουν ανθρακικά ιόντα προς τη γέφυρα ηλεκτρολύτη στους 650°C. Στην άνοδο υπάρχει το H<sub>2</sub> από την αναμόρφωση του μεθανίου όπως και κάποια ανθρακικά άλατα, ενώ στην εκροή υπάρχει το νερό προς χρήση και το CO<sub>2</sub> προς επαναχρησιμοποίηση στην κάθοδο. Οι αντιδράσεις που λαμβάνουν χώρα είναι οι παρακάτω:

Άνοδος	$H_2 + (CO_3)^{2-} \rightarrow H_2O + CO_2 + 2e^-$
Κάθοδος	$O_2 + 2CO_2 + 4e^- \rightarrow 2(CO_3)^{2-}$
Συνολικά	$H_2 + \frac{1}{2} O_2 + CO_2 \rightarrow H_2O + CO_2$

Από τις αντιδράσεις φαίνεται πως οι συγκεκριμένες κυψέλες χρησιμοποιούν ανθρακικά άλατα που προέρχονται από το CO<sub>2</sub> και παράλληλα υπάρχει η ηλεκτροπαραγωγή με ποσοστό απόδοσης 60%.

## 6.2. Αξιοποίηση του διοξειδίου του άνθρακα

### Βιομηχανία τροφίμων

Αξιοποιώντας τις ιδιότητες και τα φυσικά χαρακτηριστικά του διοξειδίου του άνθρακα, οι βιομηχανίες μπορούν να χρησιμοποιήσουν την ένωση αυτή ώστε να προστατέψουν το περιβάλλον. Συγκεκριμένα, το διοξείδιο του άνθρακα θεωρείται ασφαλές αέριο για χρήση για αυτόν τον λόγο μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν διογκωτικό σε ζύμες αρτοποιίας και ως προστατευτικό αέριο για συντήρηση τροφίμων. Επιπρόσθετα, μια ακόμα βασική χρήση του CO<sub>2</sub> είναι η εκχύλιση με υπερκρίσιμο CO<sub>2</sub> αλλά και η παραγωγή καφέ χωρίς καφεΐνη, η απομόνωση αρωμάτων, αποσταγμάτων και καρυκευμάτων. Ακόμα, χρήσιμη είναι η αξιοποίηση του στερεού διοξειδίου του άνθρακα (ξηρός πάγος) με σκοπό να ψυχθούν μονάδες παραγωγής θερμότητας.

### Χημική βιομηχανία

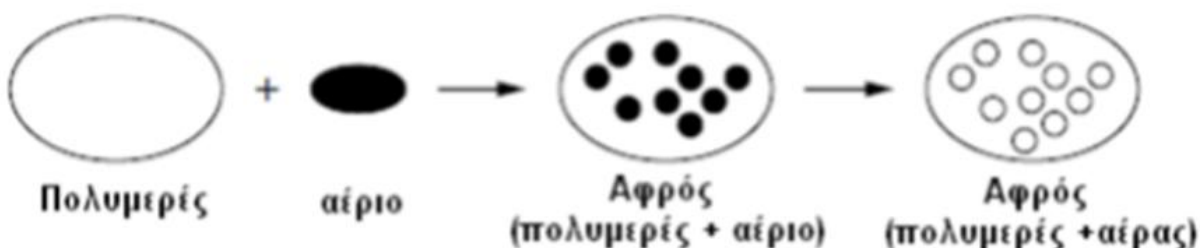
Υπάρχουν διάφορες χρήσεις του CO<sub>2</sub> και σε αυτόν τον τομέα όπως είναι οι πυροσβεστήρες Διοξειδίου του Άνθρακα οι οποίοι χρησιμοποιούνται σε πυρκαγιές με εύφλεκτα υγρά όπως υγρά καθαρισμού, πετρελαιοειδή ακόμα και σε πυρκαγιές σε ηλεκτρικές εγκαταστάσεις καθώς το διοξείδιο του άνθρακα είναι κακός αγωγός του ηλεκτρισμού. Μια άλλη χρήση είναι η κοπή και επεξεργασία μετάλλων αλλά και η συγκόλληση τους. Για να χρησιμοποιηθεί το CO<sub>2</sub> αποτελεσματικά στην χημική βιομηχανία πρέπει να τηρηθούν κάποιοι κανόνες οι οποίοι είναι οι εξής:

- Από την νέα διαδικασία πρέπει να προκύπτει ελάττωση των ολικών εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα.

- Προφανώς η νέα διαδικασία πρέπει να είναι ενεργειακά αποδοτικότερη.
- Είναι αναγκαίο να καθορίζεται από καλύτερες συνθήκες ασφαλείας οι οποίες να είναι και φιλικές προς το περιβάλλον.
- Χρειάζεται να υπάρχει ένα οικονομικό σχέδιο το οποίο θα σιγουρεύει την βιωσιμότητα της.

### Παραγωγή συνθετικών πολυμερών

Το διοξείδιο του άνθρακα επειδή έχει την ικανότητα να παράγει αέριο όταν αλλάζει η φυσική του κατάσταση μπορεί να χαρακτηριστεί ως φυσικός παράγοντας διόγκωσης. Τα αέρια διαλύονται πλήρως και εύκολα στο τήγμα ενός πολυμερούς, με αποτέλεσμα να σχηματιστεί όσο το δυνατόν καλύτερος αφρισμός.



Εικόνα 6-2. Αφρισμός πολυμερικού υλικού. (ΓΟΥΝΗΣ, ΑΝΑΚΤΗΣΗ ΚΑΙ ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗ ΤΟΥ ΔΙΟΞΕΙΔΙΟΥ ΤΟΥ ΑΝΘΡΑΚΑ, 2020)

Με λίγα λόγια για να χρησιμοποιηθεί το αέριο ως παράγοντας διόγκωσης, χρειάζεται να γίνει η μέθοδος της διάχυσης ως τρόπος αφρισμού. Για αρχή, σε συνθήκες μεγάλης πίεσης πρέπει να γίνει ο κορεσμός του υλικού με το αέριο και έπειτα επιδιώκεται η πτώση της πίεσης ώστε να επιτευχθεί η διάχυση του στο υλικό και τελικά ο αφρισμός. Ωστόσο, ο παράγοντας διόγκωσης για να λειτουργήσει στο μέγιστο βαθμό χρειάζεται να βρίσκεται στην υπερκρίσιμη κατάσταση (31°C, 7,38 MPa).

### Παραγωγή συνθετικών καυσίμων

Το συνθετικό καύσιμο (synfuel) το λαμβάνουμε από το syngas το οποίο παράγεται κατά την αεριοποίηση άνθρακα ή βιομάζας και είναι μίγμα από CO και H<sub>2</sub>. Με λίγα λόγια, το synfuel είναι η βενζίνη, το ντίζελ ή η κηροζίνη και για την παραγωγή τους οι πηγές που χρησιμοποιούνται είναι ο άνθρακας, η βιομάζα και το φυσικό αέριο.

Η αναμόρφωση μόνο με ατμό παράγει αέριο σύνθεσης μεγάλου λόγου H<sub>2</sub>/CO σε σχέση με την αναμόρφωση μεθανίου με διοξείδιο του άνθρακα.

Η ξηρή αναμόρφωση CH<sub>4</sub> δίνεται από την παρακάτω αντίδραση:

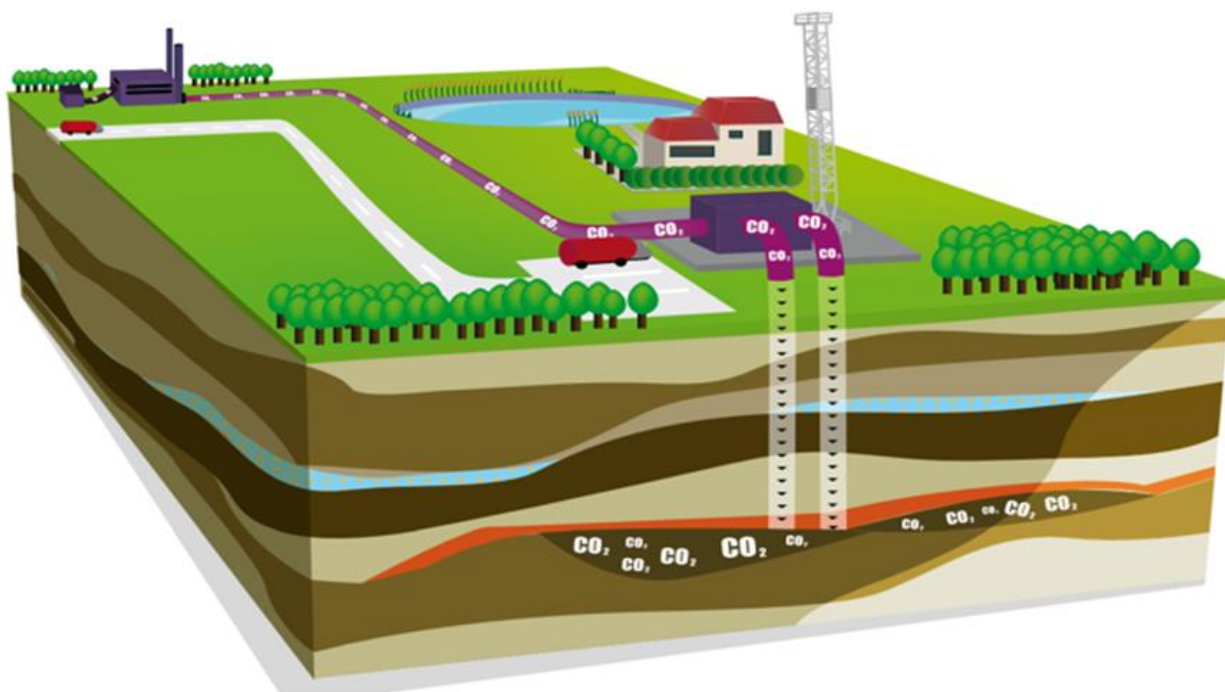




Αυτή η μέθοδος έχει ένα βασικό μειονέκτημα στην ευρεία βιομηχανία το οποίο είναι η απόρριψη για απενεργοποίηση των καταλυτών (Ni) με το χρόνο αντίδρασης εξαιτίας της εναπόθεσης άνθρακα στις μεγάλες θερμοκρασίες που απαιτούνται.

### Αποθήκευση και αξιοποίηση του CO<sub>2</sub> στη διαδικασία της δύλισης

Άλλη μια μέθοδος για να ελαττωθούν οι συγκεντρώσεις CO<sub>2</sub> είναι η Δέσμευση και Αποθήκευση Άνθρακα (Carbon Capture and Storage, CCS). Ο σκοπός αυτής της μεθόδου είναι να γίνει αποτροπή της απελευθέρωσης του διοξειδίου του άνθρακα που προέρχεται από μεγάλες πηγές όπως είναι για παράδειγμα τα χημικά εργοστάσια ή τα εργοστάσια ηλεκτροπαραγωγής και έπειτα η δέσμευση του σε υπόγειο γεωλογικό σχηματισμό.



Εικόνα 6-3. Μονάδα CCS. (ΓΟΥΝΗΣ, ΑΝΑΚΤΗΣΗ ΚΑΙ ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗ ΤΟΥ ΔΙΟΞΕΙΔΙΟΥ ΤΟΥ ΑΝΘΡΑΚΑ, 2020)

### Στάδια της διαδικασίας CCS:

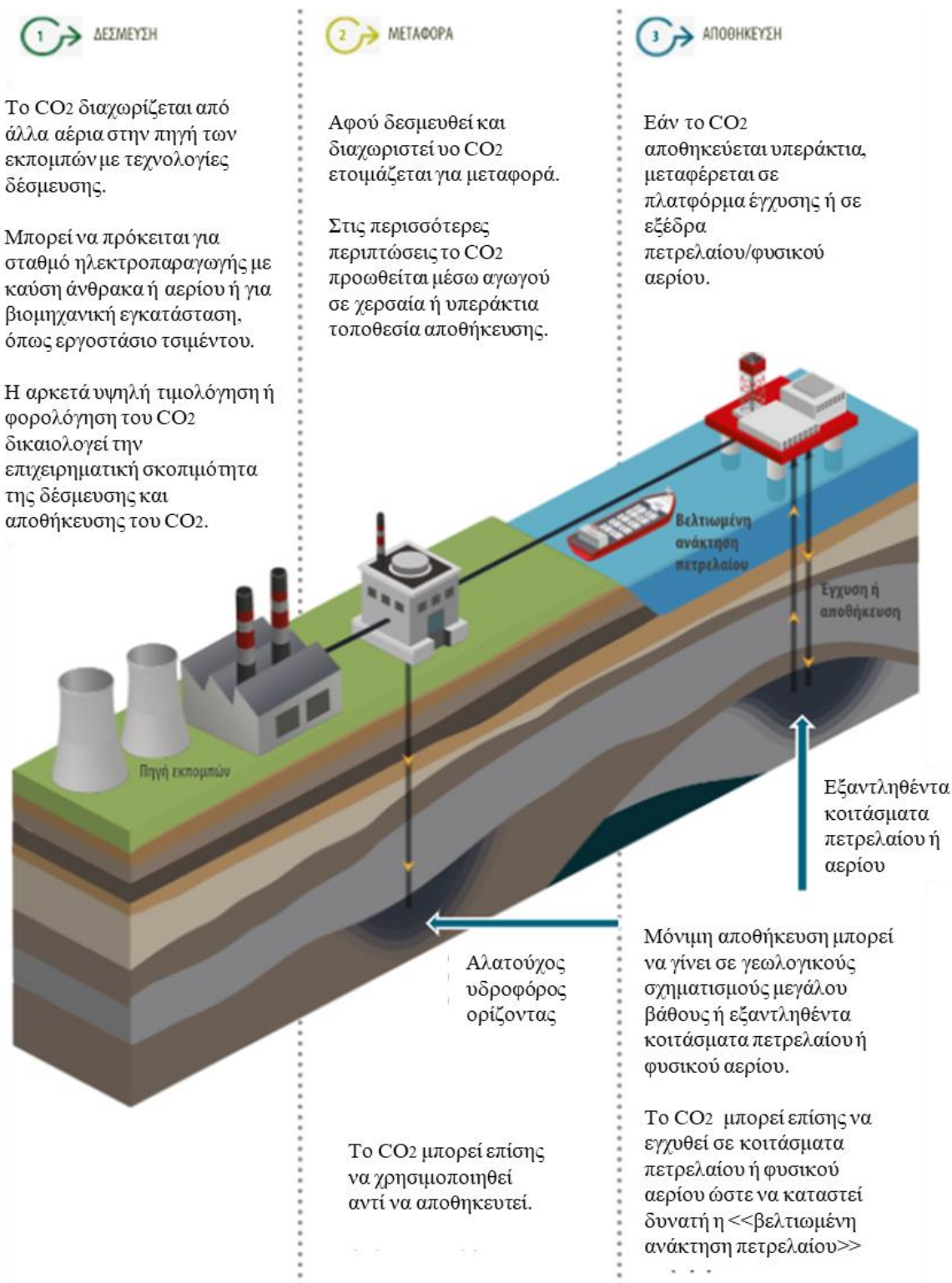
1<sup>ο</sup> Στάδιο: *Δέσμευση*. Γίνεται απευθείας στη βιομηχανία που αποδεσμεύεται το CO<sub>2</sub> από την καύση των καυσίμων και περιέχει τον διαχωρισμό του από τα άλλα αέρια.

2<sup>ο</sup> Στάδιο: *Μεταφορά*. Αφού έχει ολοκληρωθεί ο διαχωρισμός του διοξειδίου του άνθρακα, στην συνέχεια επιτυγχάνεται η συμπίεση του έως το υπερκρίσιμο σημείο.

3<sup>ο</sup> Στάδιο: *Αποθήκευση*. Τέλος, πραγματοποιείται έγχυση του CO<sub>2</sub> σε κατάλληλους γεωλογικούς σχηματισμούς οι οποίοι μπορεί να είναι υπεράκτιοι ή χερσαίοι.

Το πρώτο στάδιο είναι αυτό που έχει το μεγαλύτερο κόστος (~ 2/3) σε σχέση με τα στάδια δύο και τρία. Η μεταφορά του συνήθως πραγματοποιείται με πλοία, αγωγούς και φορτηγά σιδηροδρόμων.

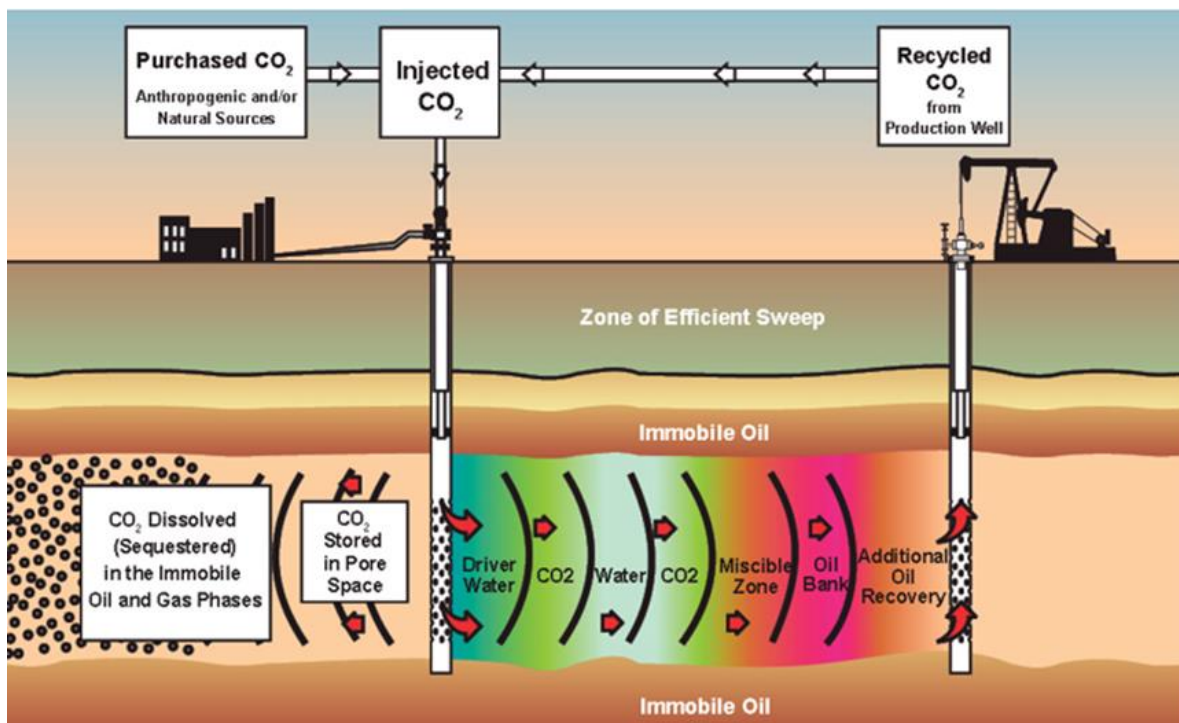
Όσον αφορά το κόστος της μονάδας CCS, για να θεωρηθεί βιώσιμο πρέπει το κόστος του να είναι πιο μικρό από το κόστος εκπομπής διοξειδίου του άνθρακα. Αυτή η μέθοδος χρησιμοποιεί το 10-40% της ενέργειας (ενεργειακή ποινή) που παράγεται από έναν σταθμό ηλεκτροπαραγωγής. Για να κατασκευαστεί μια τέτοια μονάδα χρειάζεται ισχυρό κεφάλαιο. Για μονάδα μεγάλης κλίμακας το κόστος υπολογίζεται περίπου στα 0,5-1,1 δις. ευρώ ανά έργο. Σύμφωνα με κάποιες εκτιμήσεις μόνο η δέσμευση του άνθρακα υπολογίζεται πως θα προσθέσει 7 GBP/Mwh στο κόστος της ηλεκτρικής ενέργειας από σταθμό ηλεκτροπαραγωγής με φυσικό αέριο.



Εικόνα 6-4. Δέσμευση και αποθήκευση διοξειδίου του άνθρακα. (Διασφάλιση της δέσμευσης και ασφαλούς χρήσης αποθήκευσης διοξειδίου του άνθρακα στην Ευρώπη)

### Ενισχυμένη ανάκτηση φυσικού αερίου

Σε αυτή την μέθοδο το διοξείδιο του άνθρακα διοχετεύεται στον πάτο μιας δεξαμενής φυσικού αερίου ώστε να συγκεντρωθεί εκεί και το υπόλοιπο φυσικό αέριο να οδηγηθεί στην επιφάνεια με σκοπό να το συλλέξουν.



Εικόνα 6-5. Μέθοδος ενισχυμένης ανάκτησης πετρελαίου με διοξείδιο του άνθρακα. (ΓΟΥΝΗΣ, ΑΝΑΚΤΗΣΗ ΚΑΙ ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗ ΤΟΥ ΔΙΟΞΕΙΔΙΟΥ ΤΟΥ ΑΝΘΡΑΚΑ, 2020)

### Αξιοποίηση του διοξειδίου το άνθρακα στη διαδικασία της φωτοσύνθεσης

Η αντίδραση της φωτοσύνθεσης που πραγματοποιείται στους χλωροπλάστες είναι η εξής:



Το  $\text{CO}_2$  διαλύεται στο νερό και μεταφέρεται από αυτό στους χλωροπλάστες όπου με την βοήθεια της ενέργειας του ήλιου πραγματοποιείται η διάσπαση του νερού στα στοιχεία του. Με την φωτόλυση του νερού απελευθερώνεται στο περιβάλλον το  $\text{O}_2$  και το  $\text{H}_2$  δεσμεύεται από διάφορα ένζυμα όπου βοηθάνε στην αντίδραση με το  $\text{CO}_2$  ώστε να σχηματιστεί γλυκόζη. Τέλος, γίνεται μετατροπή της γλυκόζης σε πολυσακχαρίτες (άμυλο) με σκοπό να καλύψουν κάποιες ανάγκες του φυτού.

### Αξιοποίηση του διοξειδίου του άνθρακα σε σύγχρονα συστήματα παραγωγής βιομάζας

Μια εναλλακτική μέθοδος αξιοποίησης του  $\text{CO}_2$  είναι η πρόσληψη του από τα φύκη. Τα μικροφύκη έχουν την ικανότητα να προσλαμβάνουν και να δεσμεύουν το διοξείδιο του άνθρακα το οποίο υπάρχει στην ατμόσφαιρα ή ακόμα και στα καυσέρια στους σταθμούς

ηλεκτροπαραγωγής. Βέβαια η πρόσληψη διοξειδίου του άνθρακα από τα καυσαέρια είναι πιο αποδοτική μέθοδος για τα μικροφύκη διότι υπάρχει υψηλή συγκέντρωση CO<sub>2</sub> έως και 20%. Ωστόσο, κρίνεται αναγκαίο η ψύξη των μικροφυκών διότι δεν είναι ανθεκτικά στις υψηλές συγκεντρώσεις καυσαερίων NO<sub>x</sub> και SO<sub>x</sub>. Για να είναι αποτελεσματική η χρήση των μικροφυκών στην μείωση του διοξειδίου του άνθρακα, είναι σημαντικό να τηρούνται κάποια πρότυπα τα οποία αναφέρονται παρακάτω.

- Εύκολη συγκομιδή
- Δυνατότητα αξιοποίησης μικροφυκών στις μονάδες επεξεργασίας υγρών αποβλήτων
- Αντοχή στις μεγάλες θερμοκρασίες των καυσαερίων με στόχο η αποφυγή ψύξης τους
- Πιθανότητα ταχείας ανάπτυξης τους και μεγάλη ταχύτητα δέσμευσης του CO<sub>2</sub>
- Ανθεκτικότητα σε ρύπους από καυσαέρια (NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub>)

## 7. Νομοθετικό Πλαίσιο

Σε αυτό το κεφάλαιο είναι απαραίτητη να επισημανθεί η δυσκολία καταγραφής του νομοθετικού πλαισίου καθώς έγινε εκτεταμένη έρευνα χωρίς να υπάρχουν πολλές πηγές ώστε να γίνει καταγραφή των νόμων που ισχύουν. Παρακάτω παρατίθενται οι νόμοι από την ρυθμιστική αρχή ενέργειας (ΡΑΕ) για το δίκτυο διανομής φυσικού αερίου.

Η διανομή φυσικού αερίου, ως μονοπωλιακή δραστηριότητα, διαχωρίστηκε από την προμήθεια φυσικού αερίου με το Ν.4336/2015. Εκ του νόμου, συστάθηκαν, οι εταιρίες ΕΔΑ Αττικής, ως κύριος και διαχειριστής του δικτύου της περιφέρειας Αττικής, ΕΔΑ Θεσσαλονίκης-Θεσσαλίας, ως κύριος και διαχειριστής των δικτύων του νομού Θεσσαλονίκης και της περιφέρειας Θεσσαλίας (δύο διαχειριστές που συγχωνεύθηκαν σε μία εταιρεία) και η ΔΕΔΑ, ως κύριος και διαχειριστής της Λοιπής Ελλάδας πλην των περιοχών της ΕΔΑ Αττικής και ΕΔΑ Θεσσαλονίκης-Θεσσαλίας. Επιπρόσθετα, η ΡΑΕ έχει χορηγήσει Άδειες Διανομής Φυσικού Αερίου στην εταιρεία «ΗΛΙΟΧΩΡΑ Α.Ε.» για τον Δήμο Μαντουδίου-Λίμνης-Αγίας Άννας της Εύβοιας και στην εταιρεία «HENGAS Α.Ε.» για τον Δήμο Δεσκάτης Γρεβενών της Περιφέρειας Δυτικής Μακεδονίας, τον Δήμο Παιονίας της Περιφερειακής Ενότητας Κιλκίς της Περιφέρειας Κεντρικής Μακεδονίας, τον Δήμο Πολυγύρου της Περιφερειακής Ενότητας Χαλκιδικής της Περιφέρειας Κεντρικής Μακεδονίας, τον Δήμο Έδεσσας της Περιφερειακής Ενότητας Πέλλας της Περιφέρειας Κεντρικής Μακεδονίας, τον Δήμο Μεγαλόπολης της Περιφέρειας Πελοποννήσου και τον Δήμο Κορίνθου της Περιφέρειας Πελοποννήσου, τον Δήμο Τρίπολης της Περιφέρειας Πελοποννήσου.

Τα δίκτυα διανομής της χώρας, ανάλογα με την πίεση λειτουργίας τους διακρίνονται στο Δίκτυο μέσης πίεσης (με ονομαστική πίεση 19,0 bar) και στο Δίκτυο χαμηλής πίεσης (με ονομαστική πίεση 0,025 – 4,0 bar).

Με την Απόφαση ΡΑΕ 589/2013 (ΦΕΚ Β' 487/20.07.2017), εκδόθηκε ο Κώδικας Διαχείρισης Δικτύου Διανομής. Με τον Κώδικα ρυθμίζονται τα δικαιώματα και οι υποχρεώσεις του Διαχειριστή του Δικτύου Διανομής, των Χρηστών του Δικτύου Διανομής και των Τελικών Πελατών που συνδέονται στο Δίκτυο Διανομής και θέματα που αφορούν στη διαχείριση, συντήρηση, ανάπτυξη, λειτουργία του Δικτύου Διανομής, καθώς και στους όρους και προϋποθέσεις πρόσβασης των Χρηστών Διανομής στο Δίκτυο Διανομής και στις παρεχόμενες από τον Διαχειριστή του Δικτύου υπηρεσίες.

Ο Διαχειριστής υποχρεούται να παρέχει στους Χρήστες Διανομής και στους Τελικούς Πελάτες, κατά τους ειδικότερους όρους και προϋποθέσεις του Κώδικα Διαχείρισης Δικτύου Διανομής τις Υπηρεσίες της Βασικής Δραστηριότητας Διανομής κατά τον πλέον οικονομικό, διαφανή και άμεσο τρόπο, χωρίς διακρίσεις μεταξύ των Χρηστών Διανομής ή των Τελικών Πελατών.

Στη Βασική Δραστηριότητα του Διαχειριστή περιλαμβάνονται, μεταξύ άλλων:

- Παροχή πρόσβασης χρήσης του Δικτύου Διανομής στους Χρήστες Διανομής, με αντικειμενικά και αμερόληπτα κριτήρια, χωρίς να τίθεται σε κίνδυνο η ομαλή και ασφαλή λειτουργία του Δικτύου Διανομής, σύμφωνα με τα ειδικότερα οριζόμενα στον παρόντα Κώδικα και την οικεία νομοθεσία

- Ανάπτυξη (σχεδιασμός και κατασκευή) του Δικτύου Διανομής
- Επιθεώρηση, συντήρηση, αντικατάσταση και αναβάθμιση του Δικτύου Διανομής
- Εξασφάλιση της ασφάλειας του Δικτύου Διανομής, διαχείριση και άμεση ανταπόκριση σε καταστάσεις έκτακτης ανάγκης, διαχείριση κρίσεων
- Θεώρηση μελετών Εσωτερικών Εγκαταστάσεων και διενέργεια αυτοψίας σε νέες οικοδομές
- Προώθηση της χρήσης του Φυσικού Αερίου μέσω μεθόδων αγοράς για την ανάπτυξη του Δικτύου Διανομής και τη σύνδεση νέων Τελικών Πελατών με το Δίκτυο Διανομής
- Ανάπτυξη και λειτουργία εύχρηστων και ασφαλών πληροφοριακών συστημάτων, για την εκτέλεση των δραστηριοτήτων του Διαχειριστή
- Διαχείριση διαδικασιών αλλαγής Χρήστη Διανομής σε Σημείο Παράδοσης
- Ενεργοποίηση Μετρητών

Οι δαπάνες του Διαχειριστή για τις ανωτέρω υπηρεσίες Διανομής ανακτώνται από τα Τιμολόγια Διανομής σύμφωνα με τη μεθοδολογία που προσδιορίζεται στον Κανονισμό Τιμολόγησης και σύμφωνα με το εγκεκριμένο από τη ΡΑΕ Πρόγραμμα Ανάπτυξης του Διαχειριστή. Ο Κανονισμός Τιμολόγησης Βασικής Δραστηριότητας Διανομής Φυσικού Αερίου εκδόθηκε με την Απόφαση ΡΑΕ 328/2016. Με τον Κανονισμό Τιμολόγησης ρυθμίζεται η μεθοδολογία καθορισμού των τιμολογίων της Βασικής Δραστηριότητας Διανομής, όπως ορίζεται στον Κώδικα, και σύμφωνα με τις διατάξεις του άρθρου 88 του ν. 4001/2011, των Δικτύων Διανομής Αττικής, Θεσσαλονίκης, Θεσσαλίας και λοιπής Ελλάδας.

Με την Απόφαση ΡΑΕ 235/2019, εγκρίθηκε ο Κανονισμός Μετρήσεων Δικτύου Διανομής. Με τον Κανονισμό ορίζονται οι αρμοδιότητες και οι υποχρεώσεις των Διαχειριστών των Δικτύων Διανομής Φυσικού Αερίου και τα δικαιώματα και οι υποχρεώσεις των Χρηστών και των Τελικών Πελατών αναφορικά με τα θέματα μέτρησης ή εκτίμησης της παραδοθείσας ποσότητας και παραμέτρων ποιότητας Φυσικού Αερίου στο Δίκτυο Διανομής, η διαδικασία διαχείρισης και ελέγχου των μετρήσεων, η διαδικασία επίλυσης διαφορών και οι κανόνες παροχής στοιχείων και ανταλλαγής δεδομένων σχετικά με τις μετρήσεις.

Αξίζει, επιπλέον ν' αναφερθούμε στην τηλεφωνική επικοινωνία που υπήρξε με τον κ. Σπύρο Τζιάκα, Πρόεδρο της Βιοαέριο Λαγκαδά Α.Ε σχετικά με το θεσμικό πλαίσιο που ισχύει αυτή τη στιγμή στη χώρα μας και αφορά την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από άλλες πηγές. Διαπιστώθηκε, για ακόμη μια φορά η έλλειψη νομοθεσίας στην Ελλάδα καθώς και ο ίδιος στην επιχείρηση του δεν βασίζεται πάνω σε κάποια νομοθεσία παρά μόνο κάνει πιλοτική εφαρμογή.

## 8. Συμπεράσματα

Στο τέλος αυτής της εργασίας διεξάγονται κάποια συμπεράσματα που φανερώνουν εάν τελικά το φυσικό αέριο είναι κατάλληλο καύσιμο για χρήση και αν το υδρογόνο που προέρχεται από το μεθάνιο του φυσικού αερίου συμφέρει για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Επίσης, φαίνεται και ποιοι τρόποι είναι αποτελεσματικοί για την αξιοποίηση και την δέσμευση του διοξειδίου του άνθρακα.

Το φυσικό αέριο έχει κεντρίσει το ενδιαφέρον πολλών επιστημόνων και τα τελευταία χρόνια ανεβαίνει κατάταξη αφού ο στόχος είναι να ξεπεράσει την βεζίνη και τον λιγνίτη. Η επιλογή του συγκεκριμένου συμβατικού καυσίμου έγινε κατά κύριο λόγο για να μειωθεί η ατμοσφαιρική ρύπανση. Επιπρόσθετα, το ότι το φυσικό αέριο είναι ένα ακίνδυνο καύσιμο και έχει κάποιες ιδιότητες οι οποίες το κάνουν κατάλληλο για τους κινητήρες υψηλής συμπίεσης, το καθιστά αυτομάτως ένα χρήσιμο και βολικό καύσιμο.

Η πρώτη σύγκριση που έγινε ανάμεσα στο φυσικό αέριο και στα άλλα συμβατικά καύσιμα το οποίο επιλέγεται σήμερα όλο και περισσότερο, είναι πως παράγει αρκετά μικρές ποσότητες διοξειδίου του άνθρακα για κάθε μονάδα παραγόμενης ενέργειας με αποτέλεσμα να καθιστάται άριστο καύσιμο. Παράλληλα, σημαντικοί παράγοντες είναι πως έχει την πιο υψηλή θερμογόνο δύναμη η οποία αποτελεί και τη βάση για να υπολογιστεί η θερμική απόδοση και ότι δεν χρειάζεται αποθηκευτικούς χώρους.

Τέλος, μια σημαντική αφορμή για την επιλογή του είναι πως λόγω όλων αυτών των πλεονεκτημάτων που παρουσιάστηκαν έχει πολλές εφαρμογές. Άλλα σημαντικά πλεονεκτήματα που έχει αυτό το καύσιμο είναι το μικρό κόστος του, η εύκολη διαχείριση, η οικολογική του συνεισφορά και η ασφάλεια του. Αυτά τα τέσσερα βασικά στοιχεία, έκαναν το φυσικό αέριο να επιλεγεί για μια μονάδα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.

Το μπλε υδρογόνο είναι το καύσιμο που προέρχεται από κάποιο καύσιμο και συγκεκριμένα από το φυσικό αέριο. Δεν βλάπτει το περιβάλλον και θεωρείται τελείως ακίνδυνο διότι κατά την καύση του δεν παράγει ρύπους. Κάποια από τα πλεονεκτήματα είναι ότι προσφέρει μεγάλο ποσό θερμότητας και έχει την ικανότητα να μεταφέρεται σε μεγάλες αποστάσεις χωρίς να υπάρχουν σημαντικές απώλειες. Το κόστος του πρόκειται να μειωθεί αν υπάρξει βελτιστοποίηση των μεθόδων παραγωγής του.

Υπάρχουν διάφορες μέθοδοι και τεχνολογίες για να παραχθεί το υδρογόνο από το φυσικό αέριο. Αυτή η μέθοδος που επιλέχθηκε σε αυτήν την εργασία είναι η ατμοαναμόρφωση μεθανίου SMR. Οι λόγοι για την επιλογή αυτή είναι ότι είναι η λιγότερο δαπανηρή και αυτή που χρησιμοποιείται περισσότερο. Επίσης, σε σύγκριση με τις άλλες μεθόδους έχει την μεγαλύτερη απόδοση όπου για μεγάλα συστήματα μπορεί να φτάσει σε ποσοστό 85%.

Παρ'όλα αυτά, είναι μια αρκετά σύνθετη διαδικασία και απαιτεί αρκετές διεργασίες οι οποίες δεν διευκολύνουν την παραγωγική διαδικασία της ηλεκτροπαραγωγικής μονάδας.

Σε συνδιασμό με την παραπάνω μέθοδο παραγωγής υδρογόνου, επιλέξαμε για να ολοκληρωθεί η μονάδα ηλεκτροπαραγωγής, μια κυψέλη καυσίμου. Αφού η κυψέλη καυσίμου δέχεται σαν



καύσιμο το υδρογόνο, το μόνο απόβλητο που εκπέμπεται από αυτήν την διεργασία είναι το νερό. Έτσι, καταλήγουμε στο συμπέρασμα πως είναι μια μέθοδος η οποία δεν αφήνει περιβαλλοντικό αποτύπωμα. Επίπλεον, ένα τέτοιο σύστημα θα μπορούσε να έχει μια αρκετά μεγάλη απόδοση.

Βέβαια, μέχρι σήμερα ένα τέτοιο σύστημα έχει μόνο συμπληρωματικό ρόλο για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας σε μια βιομηχανία, χωρίς αυτό να σημαίνει πως ο ρόλος του δεν είναι σημαντικός.

Οι προσπάθειες για τον περιορισμό των αυξανόμενων εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα και η ταυτόχρονη κάλυψη της όλο και αυξανόμενης παγκόσμιας ενεργειακής ζήτησης, μπορούν να επιτευχθούν μόνο με την ανάπτυξη ενός ολοκληρωμένου χαρτοφυλακίου τεχνολογιών που περιλαμβάνει εναλλακτικές πηγές ενέργειας, ενεργειακά αποδοτικά συστήματα και μέτρα για την δέσμευση, αξιοποίηση και αποθήκευση του άνθρακα. Γίνεται επομένως εύκολα αντιληπτό, πως ανεξάρτητα από την ανάπτυξη αποδοτικών και καθαρών ενεργειακών λύσεων, οι τεχνολογίες CCS είναι απαραίτητες να εφαρμοστούν. Άρα, ο συνδιασμός μιας μονάδας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με ένα καύσιμο καλύτερο «περιβαλλοντικά» σε σχέση με τα άλλα, και μια μονάδα αξιοποίησης του άνθρακα θα ήταν ο ιδανικός.

Συμπερασματικά, είναι μια μονάδα η οποία ακόμα βρίσκεται υπό επεξεργασία καθώς χρειάζεται να επιλυθούν κάποια εμπόδια. Ωστόσο, θα μπορούσε στο μέλλον να πετύχει και να λυθεί το περιβαλλοντικό πρόβλημα εφόσον δεν θα εκπέμπει σχεδόν κανέναν ρύπο.

## 9. Βιβλιογραφία Κεφαλαίων

### 9.1. Κεφάλαιο 2

- Φυσικό αέριο, Βικιπαίδεια, Πηγή:  
[https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%A6%CF%85%CF%83%CE%B9%CE%BA%CF%8C\\_%CE%B1%CE%AD%CF%81%CE%B9%CE%BF](https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%A6%CF%85%CF%83%CE%B9%CE%BA%CF%8C_%CE%B1%CE%AD%CF%81%CE%B9%CE%BF)
- Μεταφορά και Διανομή Φυσικού Αερίου στην Ελλάδα Η Περίπτωση του Αγωγού ΠΟΣΕΙΔΩΝ, Κωνσταντίνα Γκιόκα, Πάτρα, Ιούνιος 2020, σελίδα 15, Πηγή:  
[https://apothesis.eap.gr/bitstream/repo/46029/1/123100\\_%CE%93%CE%9A%CE%99%CE%9F%CE%9A%CE%91\\_%CE%9A%CE%A9%CE%9D%CE%A3%CE%A4%CE%91%CE%9D%CE%A4%CE%99%CE%9D%CE%91.pdf](https://apothesis.eap.gr/bitstream/repo/46029/1/123100_%CE%93%CE%9A%CE%99%CE%9F%CE%9A%CE%91_%CE%9A%CE%A9%CE%9D%CE%A3%CE%A4%CE%91%CE%9D%CE%A4%CE%99%CE%9D%CE%91.pdf)
- ΟΙ ΔΕΛΦΟΙ ΚΑΙ ΤΟ ΜΑΝΤΕΙΟ ΤΩΝ ΔΕΛΦΩΝ, 2015, Πηγή:  
<https://theancientwebgreece.wordpress.com/2015/06/20/%CE%BF%CE%B9-%CE%B4%CE%B5%CE%BB%CF%86%CE%BF%CE%B9-%CE%BA%CE%B1%CE%B9-%CF%84%CE%BF-%CE%BC%CE%B1%CE%BD%CF%84%CE%B5%CE%B9%CE%BF-%CF%84%CF%89%CE%BD-%CE%B4%CE%B5%CE%BB%CF%86%CF%89%CE%BD/>
- Εθνικό Σύστημα Μεταφοράς Φ.Α, Πηγή:  
<https://www.desfa.gr/national-natural-gas-system/transmission>
- Βιβλίο: Εφαρμογές υγρών και αερίων καυσίμων, Καθηγητής Τσανακτσίδης Γ. Κωνσταντίνος
- Εγκρίθηκε η χρηματοδότηση του δικτύου φυσικού αερίου για Καστοριά,Μανιάκους, Άργος Ορεστικό και Γρεβενά, 25 Φεβρουαρίου 2021, Πηγή:  
<https://www.capital.gr/oikonomia/3528219/egkrithike-i-xrimatodotisi-tou-diktuou-fusikou-aeriou-gia-kastoria-maniakous-argos-orestiko-kai-grebena>

### 9.2. Κεφάλαιο 3

- The role of hydrogen and fuel cells in the global energy system - Energy & Environmental Science, Iain Staffell, Daniel Scamman, Anthony Velazquez Abad, Paul Balcombe, Paul E. Dodds, Paul Ekins, Nilay Shahd and Kate R. Warda, Πηγή:  
<https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2019/ee/c8ee01157e#!divAbstractg/en/content/articlelanding/2019/ee/c8ee01157e#!divAbstract>
- CAPEX vs. OPEX: What's the Difference?, 2021, Πηγή:  
<https://www.investopedia.com/ask/answers/112814/whats-difference-between-capital-expenditures-capex-and-operational-expenditures-opex.asp>
- Hydrogen production from natural gas and biomethane with carbon capture and storage – A techno-environmental analysis, Cristina Antonini, Karin Treyer, Anne Streb, Mijndert

van der Spek, Christian Bauer and Marco Mazzotti, Πηγή:

<https://pubs.rsc.org/en/content/articlehtml/2020/se/d0se00222d>

- Ειδικά Κεφάλαια Παραγωγής Ενέργειας Ενότητα 5(α): Παραγωγή Υδρογόνου Αναπλ. Καθηγητής: Γεώργιος Μαρνέλλος, Πηγή:  
[https://eclass.uowm.gr/modules/document/file.php/MECH101/%CE%91%CE%A3%CE%9A%CE%97%CE%A3%CE%95%CE%99%CE%A3/5%CE%B1\\_%CE%A0%CE%B1%CE%81%CE%B1%CE%B3%CF%89%CE%B3%CE%AE%20%CE%A5%CE%B4%CF%81%CE%BF%CE%B3%CF%8C%CE%BD%CE%BF%CF%85\\_oc.pdf](https://eclass.uowm.gr/modules/document/file.php/MECH101/%CE%91%CE%A3%CE%9A%CE%97%CE%A3%CE%95%CE%99%CE%A3/5%CE%B1_%CE%A0%CE%B1%CE%81%CE%B1%CE%B3%CF%89%CE%B3%CE%AE%20%CE%A5%CE%B4%CF%81%CE%BF%CE%B3%CF%8C%CE%BD%CE%BF%CF%85_oc.pdf)
- Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο θεσσαλονίκης σχολή θετικών επιστημών τμήμα φυσικής πτυχιακή εργασία με θέμα: τεχνολογίες υδρογόνου για παραγωγή ενέργειας, Γρηγοριάδης Δημήτριος-Παναγιώτης, Πηγή:  
<http://ikee.lib.auth.gr/record/135314/files/%CE%A4%CE%B5%CF%87%CE%BD%CE%BF%CE%BB%CE%BF%CE%B3%CE%AF%CE%B5%CF%82%20%CE%A5%CE%B4%CF%81%CE%BF%CE%B3%CF%8C%CE%BD%CE%BF%CF%85%20%CE%B3%CE%B9%CE%B1%20%CF%80%CE%B1%CF%81%CE%B1%CE%B3%CF%89%CE%B3%CE%AE%20%CE%B5%CE%BD%CE%AD%CF%81%CE%B3%CE%B5%CE%B9%CE%B1%CF%82.pdf>
- Διπλωματική Εργασία του φοιτητή του Τμήματος Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Τεχνολογίας Υπολογιστών της Πολυτεχνικής Σχολής του Πανεπιστημίου Πατρών, Νάκης Σταύρος, Πάτρα, Μάιος 2010, Πηγή:  
<https://nemertes.lis.upatras.gr/jspui/bitstream/10889/3964/1/%ce%9d%ce%91%ce%9a%ce%97%ce%a3%20%ce%a3%ce%a4%ce%91%ce%a5%ce%a1%ce%9f%ce%a3.pdf>
- What is CCUS?, Research Coordination Network Carbon Capture, Utilization, and Storage NSF Science, Engineering, and Education for Sustainability, Πηγή:  
<https://www.aiche.org/ccusnetwork/what-ccus>
- Global Carbon Emissions, 08 January 2020, Πηγή:  
<https://www.co2.earth/global-co2-emissions>

### 9.3. Κεφάλαιο 4

- Παραγωγή ενέργειας από συμβατικά ορυκτά καύσιμα και εναλλακτικές πηγές ενέργειας, Πηγή:  
<4D6963726F736F667420576F7264202D20D0E1F1E1E3F9E3DE20E5EDDDDF1E3E5E9E1F220E1F0FC20F3F5ECE2E1F4E9EADC20EFF1F5EAF4DC20EAE1FDF3E9ECE12DC4E9E1F4ECE7ECE1F4E985>
- ΟΙ ΠΑΓΚΟΣΜΙΕΣ ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ ΤΟΥ ΦΥΣΙΚΟΥ ΑΕΡΙΟΥ ΚΑΙ ΤΟ ΜΕΛΛΟΝ ΤΗΣ ΛΙΓΝΙΤΙΚΗΣ ΗΛΕΚΤΡΟΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ, ΚΟΛΤΣΑΚΛΗΣ ΝΙΚΟΛΑΟΣ, 2010, Πηγή:  
[http://ikee.lib.auth.gr/record/290654/files/%CE%9F%CE%99\\_%CE%A0%CE%91%CE%93%CE%9A%CE%9F%CE%A3%CE%9C%CE%99%CE%95%CE%A3\\_%CE%A0%CE%A1%CE%9F%CE%9F%CE%A0%CE%A4%CE%99%CE%9A%CE%95%CE%A3\\_%CE%A4%CE%9F%CE%A5\\_%CE%A6%CE%A5%CE%A3%CE%99%CE%9A%CE%9F%CE%A5\\_%CE%91%CE%95%CE%A1%CE%99%CE%9F%CE%A5.pdf](http://ikee.lib.auth.gr/record/290654/files/%CE%9F%CE%99_%CE%A0%CE%91%CE%93%CE%9A%CE%9F%CE%A3%CE%9C%CE%99%CE%95%CE%A3_%CE%A0%CE%A1%CE%9F%CE%9F%CE%A0%CE%A4%CE%99%CE%9A%CE%95%CE%A3_%CE%A4%CE%9F%CE%A5_%CE%A6%CE%A5%CE%A3%CE%99%CE%9A%CE%9F%CE%A5_%CE%91%CE%95%CE%A1%CE%99%CE%9F%CE%A5.pdf)

- ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΜΕΤΑΒΛΗΤΟΥ ΚΟΣΤΟΥΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΜΟΝΑΔΩΝ ΕΛΛΗΝΙΚΟΥ ΣΗΕ, Γουργούλας Θωμάς, Πασαχίδης Θεόδωρος, Πηγή: [https://ee.auth.gr/wp-content/uploads/participants-database/\\_\\_\\_\\_\\_4.pdf](https://ee.auth.gr/wp-content/uploads/participants-database/_____4.pdf)
- Εισαγωγή στην Ενεργειακή Τεχνολογία, Νίκος Μαμάσης & Ανδρέας Ευστρατιάδης Τομέας Υδατικών Πόρων & Περιβάλλοντος, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο Αθήνα, 2018, Πηγή: [https://www.itia.ntua.gr/en/getfile/1902/1/documents/ET2018\\_Intro.pdf](https://www.itia.ntua.gr/en/getfile/1902/1/documents/ET2018_Intro.pdf)
- Εισαγωγή στην Ενεργειακή Τεχνολογία, Ηλεκτρική ενέργεια, Νίκος Μαμάσης & Ανδρέας Ευστρατιάδης Τομέας Υδατικών Πόρων & Περιβάλλοντος, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο Αθήνα, 2018, Πηγή: [https://www.itia.ntua.gr/en/getfile/1902/2/documents/ET2018\\_ElecticEnergy.pdf](https://www.itia.ntua.gr/en/getfile/1902/2/documents/ET2018_ElecticEnergy.pdf)
- Ορυκτά καύσιμα και ενέργεια, Νίκος Μαμάσης & Ανδρέας Ευστρατιάδης Τομέας Υδατικών Πόρων & Περιβάλλοντος, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο Αθήνα, 2018, [https://www.itia.ntua.gr/en/getfile/1902/3/documents/ET2018\\_Fossil.pdf](https://www.itia.ntua.gr/en/getfile/1902/3/documents/ET2018_Fossil.pdf)
- ΑΠΟΛΙΓΝΙΤΟΠΟΙΗΣΗ | ΣΔΑΜ - Σχέδιο Δίκαιης Αναπτυξιακής Μετάβασης, Πηγή: <https://sdam.gr/node/142>
- Απολιγνιτοποίηση: Πώς μειώνει δραστικά το κόστος για τα δικαιώματα ρύπων. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα του πρώτου τριμήνου 2021 της επιχείρησης που ανακοινώθηκαν την περασμένη εβδομάδα, η μέση τιμή για τα δικαιώματα διαμορφώθηκε στα 31,7 ευρώ ανά τόνο CO<sub>2</sub>. Πηγή: <https://www.skai.gr/news/environment/apolignitopoiisi-pos-meionei-drastika-to-kostos-gia-ta-dikaiomata-rypon>
- Η Απολιγνιτοποίηση Και Οι Έλληνες. Μια έρευνα στις περιοχές που θα πληγούν περισσότερο από το κλείσιμο των λιγνιτικών μονάδων της ΔΕΗ, ΘΟΔΩΡΗΣ ΓΕΩΡΓΑΚΟΠΟΥΛΟΣ | ΝΟΕΜΒΡΙΟΣ 2020, Πηγή: <https://www.dianeosis.org/2020/11/i-apolignitopoiisi-kai-oi-ellines/>

#### 9.4. Κεφάλαιο 5

- Τεχνολογία Πετρελαίου και Φυσικού Αερίου Υδρογονοκατεργασία— Υδρογονοπυρόλυση, Εργαστήριο Τεχνολογίας Καυσίμων Και Λιπαντικών ΕΜΠ, Πηγή: <https://docplayer.gr/30572780-Tehnologia-petrelaiou-kai-kai-lipantikou-emp.html>
- High-efficiency power production from natural gas with carbon capture
- Author links open overlay panel, Thomas A. Adams II, Paul I. Barton, 2010, Πηγή: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378775309018503>
- Αέριο από την Εξόρυξη Πετρελαίου (APG) / Αέριο Καύσης, Clarke Energy, Πηγή: <https://www.clarke-energy.com/el/applications/associated/>
- Διατμηματικό Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών «Φυσική και Τεχνολογικές Εφαρμογές» Μελέτη Νανοκαταλυτών για την Πετρελαϊκή Βιομηχανία με μεθόδους Φασματοσκοπίας Πυρηνικού Μαγνητικού Συντονισμού (NMR), ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ, Τσέλου Παναγιώτας, σελ 11-12, Πηγή: <http://www.physics.ntua.gr/gr/dpms/diplomatikes/2016/tselou.pdf>
- Global Syngas Technologies Council, Πηγή:

<https://globalsyngas.org/syngas-technology/syngas-conditioning-purification/water-gas-shift/>

- ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ ΚΑΙ ΕΛΕΓΧΟΣ ΤΗΣ ΣΥΝΕΡΓΑΣΙΜΟΤΗΤΑΣ ΜΕ ΤΣΙΜΕΝΤΑ ΤΟΥ ΠΡΟΪΟΝΤΟΣ ΞΗΡΗΣ ΑΠΟΘΕΙΩΣΗΣ ΚΑΥΣΑΕΡΙΩΝ ΜΕ ΑΣΒΕΣΤΗ, Ευγενία Α. Γκικόκα, 2014, Πηγή:  
<https://dspace.lib.ntua.gr/xmlui/bitstream/handle/123456789/40179/final%20pdf%204.pdf?sequence=2>
- Flue-gas desulfurization, Βικιπαίδεια, Πηγή:  
[https://en.wikipedia.org/wiki/Flue-gas\\_desulfurization](https://en.wikipedia.org/wiki/Flue-gas_desulfurization)
- Water–gas shift reaction, Πηγή:  
[https://en.wikipedia.org/wiki/Water%20%80%93gas\\_shift\\_reaction](https://en.wikipedia.org/wiki/Water%20%80%93gas_shift_reaction)
- Water gas shift reaction for hydrogen production and carbon dioxide capture: A review, Wei-Hsin Chen, Chia-Yang Chen, 15 January 2020, Πηγή:  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0306261919317659#f0100>
- Pressure Swing Adsorption Unit, James G. Speight, in Heavy Oil Recovery and Upgrading, 2019, Πηγή:  
<https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/pressure-swing-adsorption-unit>
- Pressure Swing Adsorption, Shivaji Sircar, 2002, Πηγή:  
<https://pubs.acs.org/doi/pdf/10.1021/ie0109758>
- Purification of Hydrogen by Pressure Swing Adsorption, S. SIRCAR & T. C. GOLDEN, 2006, Πηγή:  
[https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1081/SS-100100183?casa\\_token=GzvTk6ZtdXYAAAAA%3AI6hNYdCBpJJPgWpf8kE3o4O1Ex2wGQcI\\_YyoUJwhNQrp2cofMKgJdEdi6pChRAz7A1ccvD8E1XtIEg&](https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1081/SS-100100183?casa_token=GzvTk6ZtdXYAAAAA%3AI6hNYdCBpJJPgWpf8kE3o4O1Ex2wGQcI_YyoUJwhNQrp2cofMKgJdEdi6pChRAz7A1ccvD8E1XtIEg&)  
Hydrogen purification using compact pressure swing adsorption system for fuel cell, Edy Herianto Majlana, Wan Ramli Wan Dauda, Sunny E. Iyuke, Abu Bakar Mohamad, A. Amir H., Kadhum, Abdul Wahab Mohammad, Mohd. Sobri Takriff, Nurhaswani Bahamana, Μάρτιος 2009 Πηγή:  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360319909000263>
- Hydrogen purification from refinery fuel gas by pressure swing adsorption, A. Malek, S. Farooq, 16 Απριλίου 2004, Πηγή:  
<https://aiche.onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1002/aic.690440906>
- “Εφαρμογές Κυψελών Καυσίμου στη Ναυτιλία - Προοπτικές για Μεγάλης Ισχύος Μονάδες”, Μπακαλάρου Ανδρέα, Δεκέμβριος 2019, Πηγή:  
<https://core.ac.uk/download/pdf/326046961.pdf>
- ΑΝΑΛΥΣΗ-ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΚΥΨΕΛΩΝ ΚΑΥΣΙΜΟΥ ΚΑΙ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΚΥΨΕΛΗΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ ΜΕΜΒΡΑΝΗΣ ΑΝΤΑΛΛΑΓΗΣ ΠΡΩΤΟΝΙΩΝ (PEMFC) ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ, ΕΡΙΕΤΤΑ Ι. ΖΟΥΝΤΟΥΡΙΔΟΥ, 2006, Πηγή:  
<http://artemis.cslab.ece.ntua.gr:8080/jspui/bitstream/123456789/14660/1/DT2006-0179.pdf>
- ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ ΤΜΗΜΑ ΦΥΣΙΚΗΣ ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ ΜΕ ΘΕΜΑ:

ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ ΓΙΑ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ, Γρηγοριάδης

Δημήτριος-Παναγιώτης, Πηγή:

<http://ikee.lib.auth.gr/record/135314/files/%CE%A4%CE%B5%CF%87%CE%BD%CE%BF%CE%BB%CE%BF%CE%B3%CE%AF%CE%B5%CF%82%20%CE%A5%CE%B4%CF%81%CE%BF%CE%B3%CF%8C%CE%BD%CE%BF%CF%85%20%CE%B3%CE%B9%CE%B1%20%CF%80%CE%B1%CF%81%CE%B1%CE%B3%CF%89%CE%B3%CE%AE%20%CE%B5%CE%BD%CE%AD%CF%81%CE%B3%CE%B5%CE%B9%CE%B1%CF%82.pdf>

## 9.5. Κεφάλαιο 6

- Προοπτικές για τη Δέσμευση & Αποθήκευση CO<sub>2</sub> στην Ελλάδα, Πηγή:  
<https://www.iene.gr/kozani09/articlefiles/conclusions.pdf>
- ΑΝΑΚΤΗΣΗ ΚΑΙ ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗ ΤΟΥ ΔΙΟΞΕΙΔΙΟΥ ΤΟΥ ΑΝΘΡΑΚΑ, ΓΟΥΝΗΣ, ΣΠΥΡΙΔΩΝ, 20-Σεπ-2020, Πηγή:  
<https://apothesis.eap.gr/handle/repo/48955>
- Ολοκληρωμένος σχεδιασμός προηγμένων διεργασιών δέσμευσης άνθρακα και παραγωγής εναλλακτικών καυσίμων από CO<sub>2</sub> και βιομάζα, Ατσόνιος, Κωνσταντίνος (2015, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο (ΕΜΠ)), Πηγή:  
<https://thesis.ekt.gr/thesisBookReader/id/36722?lang=el#page/34/mode/2up>
- Carbon capture and storage, Wikipedia, Πηγή:  
[https://en.wikipedia.org/wiki/Carbon\\_capture\\_and\\_storage](https://en.wikipedia.org/wiki/Carbon_capture_and_storage)

## 9.6. Κεφάλαιο 7

- ΡΑΕ Ρυθμιστική Αρχή Ενέργειας, Πηγή:  
<https://www.rae.gr/%ce%b4%ce%af%ce%ba%cf%84%cf%85%ce%b1-%ce%b4%ce%b9%ce%b1%ce%bd%ce%bf%ce%bc%ce%ae%cf%82-%cf%86%ce%b1/>

## 10. Αναφορές

Ανάκτηση από ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ & ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΩΝ ΔΙΑΘΕΣΙΜΩΝ:

<https://eclass.aspete.gr/modules/document/file.php/POL224/%2B10o-%CE%94%CE%A5%CE%A0%CE%95%CE%94%207-1-2021.pdf>

Ανάκτηση από Φυσικό Αέριο:

[https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%A6%CF%85%CF%83%CE%B9%CE%BA%CF%8C\\_%CE%B1%CE%AD%CF%81%CE%B9%CE%BF#/media/%CE%91%CF%81%CF%87%CE%B5%CE%AF%CE%BF:Natural\\_gas\\_production\\_world.PNG](https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%A6%CF%85%CF%83%CE%B9%CE%BA%CF%8C_%CE%B1%CE%AD%CF%81%CE%B9%CE%BF#/media/%CE%91%CF%81%CF%87%CE%B5%CE%AF%CE%BF:Natural_gas_production_world.PNG)

Ανάκτηση από Τεχνολογίες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας:

<https://slideplayer.gr/slide/12514292/?hcb=1>

Ανάκτηση από Παραγωγή ενέργειας από συμβατικά ορυκτά καύσιμα και εναλλακτικές πηγές ενέργειας:

<http://perseus.thermo.mech.ntua.gr/develop/sites/default/files/enallaktikes%20morfes%20energeias.pdf>

Ανάκτηση από Διασφάλιση της δέσμευσης και ασφαλούς χρήσης αποθήκευσης διοξειδίου του άνθρακα στην Ευρώπη: <https://agiosathanasios.org.cy/wp-content/uploads/2020/09/CO2-1.pdf>

Ανάκτηση από wikipedia: [https://en.wikipedia.org/wiki/William\\_Robert\\_Grove](https://en.wikipedia.org/wiki/William_Robert_Grove)

Ανάκτηση από Hydrogen purification using compact pressure swing adsorption system for fuel cell: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319909000263>

Ανάκτηση από Hydrogen purification using compact pressure swing adsorption system for fuel cell: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319909000263>

Ανάκτηση από Hydrogen purification using compact pressure swing adsorption system for fuel cell: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319909000263>

Ανάκτηση από Hydrogen purification using compact pressure swing adsorption system for fuel cell: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319909000263>

Ανάκτηση από Hydrogen purification using compact pressure swing adsorption system for fuel cell: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319909000263>

Ανάκτηση από Water–gas shift reaction:

[https://en.wikipedia.org/wiki/Water%20%80%93gas\\_shift\\_reaction](https://en.wikipedia.org/wiki/Water%20%80%93gas_shift_reaction)

Ανάκτηση από Water Gas Shift: <https://globalsyngas.org/syngas-technology/syngas-conditioning-purification/water-gas-shift/>

Ανάκτηση από Αποθείωση καυσαερίων: [https://en.wikipedia.org/wiki/Flue-gas\\_desulfurization](https://en.wikipedia.org/wiki/Flue-gas_desulfurization)

Ανάκτηση από Hydrodesulfurization and Hydrodenitrogenation:

<http://www.columbia.edu/cu/chemistry/groups/parkin/hds.html>

Ανάκτηση από Συνδεσμος μεταλλευτικων επιχειρησεων: <https://www.sme.gr/portfolio-items/%CE%BB%CE%B9%CE%B3%CE%BD%CE%AF%CF%84%CE%B7%CF%82/>

- . Ανάκτηση από Fuel economy: <http://www.fueleconomy.gov/feg/fuelcells.html>
- (2018, 05 04). Retrieved from Το Εθνικό Σύστημα Φυσικού Αερίου και ο ρόλος του ΔΕΣΦΑ ως Διαχειριστή: [https://petrochem.chemdays.gr/wp-content/uploads/2018/07/10.DESFA\\_4\\_speakers.pdf](https://petrochem.chemdays.gr/wp-content/uploads/2018/07/10.DESFA_4_speakers.pdf)
- (2018, 06 03). Ανάκτηση από Φυσικό αέριο: [https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%A6%CF%85%CF%83%CE%B9%CE%BA%CF%8C\\_%CE%B1%CE%AD%CF%81%CE%B9%CE%BF](https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%A6%CF%85%CF%83%CE%B9%CE%BA%CF%8C_%CE%B1%CE%AD%CF%81%CE%B9%CE%BF)
- (2018, 06). Ανάκτηση από Μελέτη Ανάπτυξης 2019-2028: <https://www.desfa.gr/userfiles/5fd9503d-e7c5-4ed8-9993-a84700d05071/%CE%9C%CE%B5%CE%BB%CE%AD%CF%84%CE%B7%20%CE%91%CE%BD%CE%AC%CF%80%CF%84%CF%85%CE%BE%CE%B7%CF%82%20%CE%95%CE%A3%CE%A6%CE%91%202019-2028.pdf>
- (2018, Ιούνιος). Ανάκτηση από Μελέτη Ανάπτυξης 2019-2028: <https://www.desfa.gr/userfiles/5fd9503d-e7c5-4ed8-9993-a84700d05071/%CE%9C%CE%B5%CE%BB%CE%AD%CF%84%CE%B7%20%CE%91%CE%BD%CE%AC%CF%80%CF%84%CF%85%CE%BE%CE%B7%CF%82%20%CE%95%CE%A3%CE%A6%CE%91%202019-2028.pdf>
- (2019). Ανάκτηση από Outlook for energy: A perspective to 2014: [https://corporate.exxonmobil.com/-/media/Global/Files/outlook-for-energy/2019-Outlook-for-Energy\\_v4.pdf](https://corporate.exxonmobil.com/-/media/Global/Files/outlook-for-energy/2019-Outlook-for-Energy_v4.pdf)
- (2020, 06 01). Ανάκτηση από Νέους αγωγούς αερίου για τη Δυτική Μακεδονία και την Πάτρα μελετάει ο ΔΕΣΦΑ – Ετοιμάζει το νέο 10ετές αναπτυξιακό πρόγραμμα έργων: <https://energypress.gr/news/neoys-agogoyis-aerioy-gia-ti-dytiki-makedonia-kai-tin-patra-meletaei-o-desfa-etoimazei-neo>
- (2020, Σεπτεμβρίου 20). Ανάκτηση από ΑΝΑΚΤΗΣΗ ΚΑΙ ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗ ΤΟΥ ΔΙΟΞΕΙΔΙΟΥ ΤΟΥ ΑΝΘΡΑΚΑ: <https://apothesis.eap.gr/handle/repo/48955>
- (2020, Σεπτέμβριος 20). Ανάκτηση από ΑΝΑΚΤΗΣΗ ΚΑΙ ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗ ΤΟΥ ΔΙΟΞΕΙΔΙΟΥ ΤΟΥ ΑΝΘΡΑΚΑ: <https://apothesis.eap.gr/handle/repo/48955>
- (2020, Σεπτέμβριος 20). Ανάκτηση από ΑΝΑΚΤΗΣΗ ΚΑΙ ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗ ΤΟΥ ΔΙΟΞΕΙΔΙΟΥ ΤΟΥ ΑΝΘΡΑΚΑ: <https://apothesis.eap.gr/handle/repo/48955>
- (2020). Ανάκτηση από Hydrogen production costs using natural gas in selected regions, 2018: <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/hydrogen-production-costs-using-natural-gas-in-selected-regions-2018-2>
- (2021, 01 02). Ανάκτηση από Πρεμιέρα για τον αγωγό TAP που φέρνει το αζέρικο αέριο στην Ελλάδα: <https://www.newmoney.gr/roh/palmos-oikonomias/energeia/premiera-gia-ton-agogo-tap-pou-ferni-to-azeriko-aerio-stin-ellada/>
- Wei-Hsin Chen, C.-Y. C. (χ.χ.). Ανάκτηση από Water gas shift reaction for hydrogen production and carbon dioxide capture: A review: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261919317659#0100>



Wei-Hsin Chen, C.-Y. C. (2020, January 15). Ανάκτηση από Water gas shift reaction for hydrogen production and carbon dioxide capture: A review:  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261919317659#0100>

Αργυρόπουλος Φώτης, Π. Σ. (2015). Υβριδικό σύστημα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Πάτρα. Ανάκτηση από  
<http://repository.library.teiwest.gr/xmlui/bitstream/handle/123456789/3681/%CE%A5%CE%92%CE%A1%CE%99%CE%94%CE%99%CE%9A%CE%9F%20%CE%A3%CE%A5%CE%A3%CE%A4%CE%97%CE%9C%CE%91%20%CE%A0%CE%91%CE%A1%CE%91%CE%93%CE%A9%CE%93%CE%97%CE%A3%20%CE%97%CE%9B%CE%95%CE%9A%CE>

Βικιπαίδεια. Ανάκτηση από a Lab: <http://www.a-lab.gr/productinfo.asp?id=1086>

ΓΟΥΝΗΣ, Σ. (2020, Σεπτέμβριος 20). Ανάκτηση από ΑΝΑΚΤΗΣΗ ΚΑΙ ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗ ΤΟΥ ΔΙΟΞΕΙΔΙΟΥ ΤΟΥ ΑΝΘΡΑΚΑ: <https://apothesis.eap.gr/handle/repo/48955>

ΓΟΥΝΗΣ, Σ. (2020, Σεπτέμβριος 20). Ανάκτηση από ΑΝΑΚΤΗΣΗ ΚΑΙ ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗ ΤΟΥ ΔΙΟΞΕΙΔΙΟΥ ΤΟΥ ΑΝΘΡΑΚΑ: <https://apothesis.eap.gr/handle/repo/48955>

Δημήτριος-Παναγιώτης, Γ. (χ.χ.). Ανάκτηση από ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ ΓΙΑ ΠΑΡΑΓΩΓΗ :

<http://ikee.lib.auth.gr/record/135314/files/%CE%A4%CE%B5%CF%87%CE%BD%CE%BF%CE%BB%CE%BF%CE%B3%CE%AF%CE%B5%CF%82%20%CE%A5%CE%B4%CF%81%CE%BF%CE%B3%CF%8C%CE%BD%CE%BF%CF%85%20%CE%B3%CE%B9%CE%B1%20%CF%80%CE%B1%CF%81%CE%B1%CE%B3%CF%89%CE%B3%CE%AE%20%CE%B5%CE%BD%>

Δημήτριος-Παναγιώτης, Γ. (χ.χ.). Ανάκτηση από ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ ΓΙΑ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ:

<http://ikee.lib.auth.gr/record/135314/files/%CE%A4%CE%B5%CF%87%CE%BD%CE%BF%CE%BB%CE%BF%CE%B3%CE%AF%CE%B5%CF%82%20%CE%A5%CE%B4%CF%81%CE%BF%CE%B3%CF%8C%CE%BD%CE%BF%CF%85%20%CE%B3%CE%B9%CE%B1%20%CF%80%CE%B1%CF%81%CE%B1%CE%B3%CF%89%CE%B3%CE%AE%20%CE%B5%CE%BD%>

Δημήτριος-Παναγιώτης, Γ. (χ.χ.). Ανάκτηση από ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ ΓΙΑ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ:

<http://ikee.lib.auth.gr/record/135314/files/%CE%A4%CE%B5%CF%87%CE%BD%CE%BF%CE%BB%CE%BF%CE%B3%CE%AF%CE%B5%CF%82%20%CE%A5%CE%B4%CF%81%CE%BF%CE%B3%CF%8C%CE%BD%CE%BF%CF%85%20%CE%B3%CE%B9%CE%B1%20%CF%80%CE%B1%CF%81%CE%B1%CE%B3%CF%89%CE%B3%CE%AE%20%CE%B5%CE%BD%>

*Ειδικά κεφάλαια παραγωγής ενέργειας.* (χ.χ.). Ανάκτηση από  
[https://eclass.uowm.gr/modules/document/file.php/MECH101/%CE%91%CE%A3%CE%9A%CE%97%CE%A3%CE%95%CE%99%CE%A3/5%CE%B1\\_%CE%A0%CE%B1%CF%81%CE%B1%CE%B3%CF%89%CE%B3%CE%AE%20%CE%A5%CE%B4%CF%81%CE%BF%CE%B3%CF%8C%CE%BD%CE%BF%CF%85\\_oc.pdf](https://eclass.uowm.gr/modules/document/file.php/MECH101/%CE%91%CE%A3%CE%9A%CE%97%CE%A3%CE%95%CE%99%CE%A3/5%CE%B1_%CE%A0%CE%B1%CF%81%CE%B1%CE%B3%CF%89%CE%B3%CE%AE%20%CE%A5%CE%B4%CF%81%CE%BF%CE%B3%CF%8C%CE%BD%CE%BF%CF%85_oc.pdf)

Ευστρατιάδης, Ν. Μ. (2018). Εισαγωγή στην Ενεργειακή Τεχνολογία. 10. Αθήνα. Ανάκτηση από [https://www.itia.ntua.gr/en/getfile/1902/1/documents/ET2018\\_Intro.pdf](https://www.itia.ntua.gr/en/getfile/1902/1/documents/ET2018_Intro.pdf)

Ευστρατιάδης, Ν. Μ. (χ.χ.). Εισαγωγή στην Ενεργειακή Τεχνολογία. Αθήνα. Ανάκτηση από [https://www.itia.ntua.gr/en/getfile/1902/1/documents/ET2018\\_Intro.pdf](https://www.itia.ntua.gr/en/getfile/1902/1/documents/ET2018_Intro.pdf)

Ευστρατιάδης, Ν. Μ. (χ.χ.). Εισαγωγή στην Ενεργειακή Τεχνολογία. Ανάκτηση από [https://www.itia.ntua.gr/en/getfile/1902/1/documents/ET2018\\_Intro.pdf](https://www.itia.ntua.gr/en/getfile/1902/1/documents/ET2018_Intro.pdf)

ΖΟΥΝΤΟΥΡΙΔΟΥ, Ε. Ι. (2006). Ανάκτηση από ΑΝΑΛΥΣΗ-ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΚΥΨΕΛΩΝ ΚΑΥΣΙΜΟΥ ΚΑΙ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΚΥΨΕΛΗΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ ΜΕΜΒΡΑΝΗΣ ΑΝΤΑΛΛΑΓΗΣ ΠΡΩΤΟΝΙΩΝ (PEMFC) ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ: <http://artemis.cslab.ece.ntua.gr:8080/jspui/bitstream/123456789/14660/1/DT2006-0179.pdf>

ΖΟΥΝΤΟΥΡΙΔΟΥ, Ε. Ι. (2006). Ανάκτηση από ΑΝΑΛΥΣΗ-ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΚΥΨΕΛΩΝ ΚΑΥΣΙΜΟΥ ΚΑΙ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΚΥΨΕΛΗΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ ΜΕΜΒΡΑΝΗΣ ΑΝΤΑΛΛΑΓΗΣ ΠΡΩΤΟΝΙΩΝ (PEMFC) ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ: <http://artemis.cslab.ece.ntua.gr:8080/jspui/bitstream/123456789/14660/1/DT2006-0179.pdf>

ΖΟΥΝΤΟΥΡΙΔΟΥ, Ε. Ι. (2006). Ανάκτηση από ΑΝΑΛΥΣΗ-ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΚΥΨΕΛΩΝ ΚΑΥΣΙΜΟΥ ΚΑΙ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΚΥΨΕΛΗΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ ΜΕΜΒΡΑΝΗΣ ΑΝΤΑΛΛΑΓΗΣ ΠΡΩΤΟΝΙΩΝ (PEMFC) ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ: <http://artemis.cslab.ece.ntua.gr:8080/jspui/bitstream/123456789/14660/1/DT2006-0179.pdf>

ΖΟΥΝΤΟΥΡΙΔΟΥ, Ε. Ι. (2006). Ανάκτηση από ΑΝΑΛΥΣΗ-ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΚΥΨΕΛΩΝ ΚΑΥΣΙΜΟΥ ΚΑΙ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΚΥΨΕΛΗΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ ΜΕΜΒΡΑΝΗΣ ΑΝΤΑΛΛΑΓΗΣ ΠΡΩΤΟΝΙΩΝ (PEMFC) ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ: <http://artemis.cslab.ece.ntua.gr:8080/jspui/bitstream/123456789/14660/1/DT2006-0179.pdf>

ΖΟΥΝΤΟΥΡΙΔΟΥ, Ε. Ι. (2006). Ανάκτηση από ΑΝΑΛΥΣΗ-ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΚΥΨΕΛΩΝ ΚΑΥΣΙΜΟΥ ΚΑΙ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΚΥΨΕΛΗΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ ΜΕΜΒΡΑΝΗΣ ΑΝΤΑΛΛΑΓΗΣ ΠΡΩΤΟΝΙΩΝ (PEMFC) ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ: <http://artemis.cslab.ece.ntua.gr:8080/jspui/bitstream/123456789/14660/1/DT2006-0179.pdf>

ΜΑΡΤΑΒΑΛΤΖΗ, Χ. (2010). Ανάκτηση από Ανάπτυξη Υλικών για Παραγωγή Υδρογόνου μέσω Ατμοαναμόρφωσης Μεθανίου με in situ Δέσμευση Διοξειδίου του Άνθρακα: <https://docplayer.gr/47627621-Anaptyxi-ylikon-gia-paragogi-ydrogonoy-meso-atmoanamorfosis-methanioy-me-in-situ-desmeysi-dioxeidiou-toy-anthraka.html>

Νικόλαος, Κ. Οι παγκόσμιες προοπτικές του φυσικού αερίου και το μέλλον της λιγνιτικής ηλεκτροπαραγωγής στην Ελλάδα. Ανάκτηση από [http://ikee.lib.auth.gr/record/290654/files/%CE%9F%CE%99\\_%CE%A0%CE%91%CE%](http://ikee.lib.auth.gr/record/290654/files/%CE%9F%CE%99_%CE%A0%CE%91%CE%)

93%CE%9A%CE%9F%CE%A3%CE%9C%CE%99%CE%95%CE%A3\_%CE%A0%CE%A1%CE%9F%CE%9F%CE%A0%CE%A4%CE%99%CE%9A%CE%95%CE%A3\_%CE%A4%CE%9F%CE%A5\_%CE%A6%CE%A5%CE%A3%CE%99%CE%9A%CE%9F%CE%A5\_%CE%91%CE%95%CE%A5%

πηγη. Ανάκτηση από [https://petrochem.chemdays.gr/wp-content/uploads/2018/07/10.DESFA\\_4\\_speakers.pdf](https://petrochem.chemdays.gr/wp-content/uploads/2018/07/10.DESFA_4_speakers.pdf)

ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ ΓΙΑ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ. (χ.χ.). Ανάκτηση από <http://ikee.lib.auth.gr/record/135314/files/%CE%A4%CE%B5%CF%87%CE%BD%CE%BF%CE%BB%CE%BF%CE%B3%CE%AF%CE%B5%CF%82%20%CE%A5%CE%B4%CF%81%CE%BF%CE%B3%CF%8C%CE%BD%CE%BF%CF%85%20%CE%B3%CE%B9%CE%B1%20%CF%80%CE%B1%CF%81%CE%B1%CE%B3%CF%89%CE%B3%CE%AE%20%CE%B5%CE%BD%>

ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ ΓΙΑ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ. (χ.χ.). Ανάκτηση από <http://ikee.lib.auth.gr/record/135314/files/%CE%A4%CE%B5%CF%87%CE%BD%CE%BF%CE%BB%CE%BF%CE%B3%CE%AF%CE%B5%CF%82%20%CE%A5%CE%B4%CF%81%CE%BF%CE%B3%CF%8C%CE%BD%CE%BF%CF%85%20%CE%B3%CE%B9%CE%B1%20%CF%80%CE%B1%CF%81%CE%B1%CE%B3%CF%89%CE%B3%CE%AE%20%CE%B5%CE%BD%>

*Το Εθνικό Σύστημα Φυσικού Αερίου και ο ρόλος του ΔΕΣΦΑ ως Διαχειριστή.* (2018, 05 04).  
Ανάκτηση από [https://petrochem.chemdays.gr/wp-content/uploads/2018/07/10.DESFA\\_4\\_speakers.pdf](https://petrochem.chemdays.gr/wp-content/uploads/2018/07/10.DESFA_4_speakers.pdf)

Υπάρχουσες τεχνολογίες και τελικές χρήσεις του καυσίμου του μέλλοντος - H2. Ανάκτηση από [http://tkm.tee.gr/wp-content/uploads/2018/02/HydrogenTechnology\\_Final.pdf](http://tkm.tee.gr/wp-content/uploads/2018/02/HydrogenTechnology_Final.pdf)