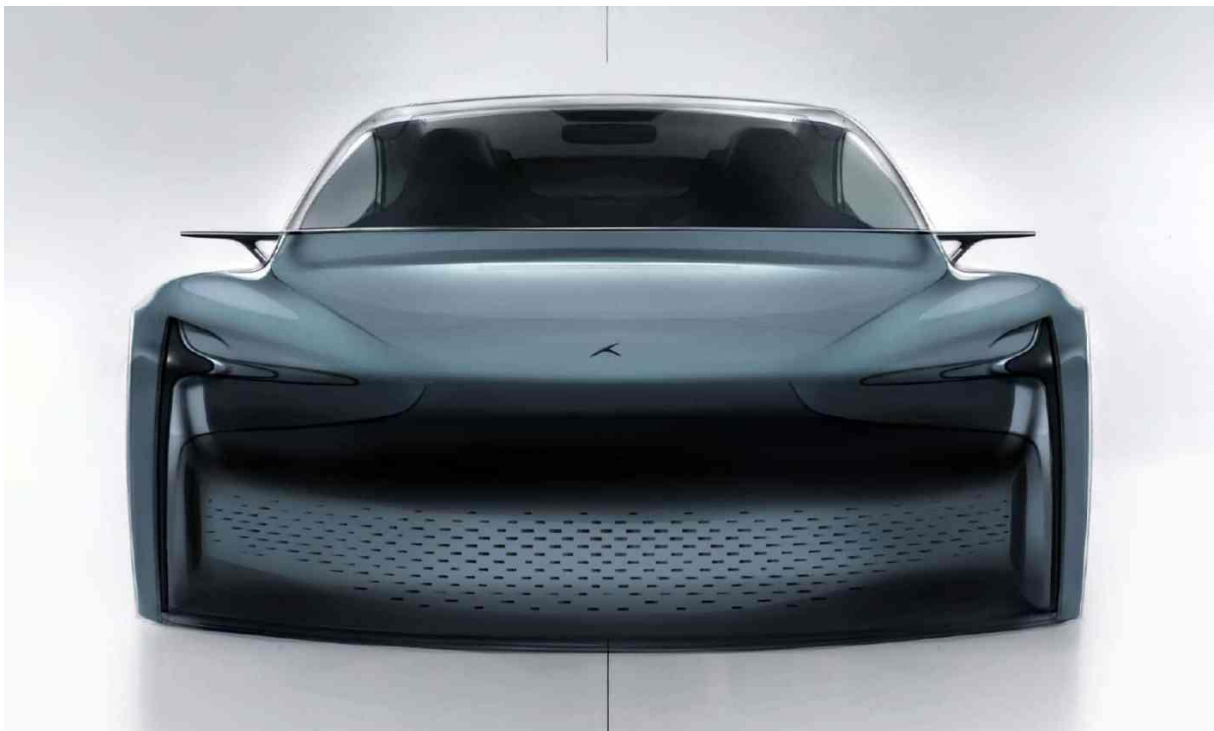


ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΛΟΠΟΝΝΗΣΟΥ  
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

# ΑΥΤΟΚΙΝΗΤΟ ΜΕ ΚΑΥΣΙΜΟ H<sub>2</sub>



ΣΠΟΥΔΑΣΤΕΣ:

ΑΓΓΕΛΙΔΗΣ ΑΝΤΩΝΙΟΣ (Α.Μ. 7039)

ΓΕΩΡΓΙΟΣ ΔΗΜΑΣ (Α.Μ. 7352)

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΜΑΥΡΙΔΗΣ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ

ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ

ΠΑΤΡΑ 2022

## ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Το παρόν τεύχος αποτελεί την Διπλωματική εργασία που εκπονήθηκε στο Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών του Πανεπιστημίου Πελοποννήσου. Η σημασία αυτής της εργασίας αποτελεί σημαντικό εγχειρίδιο τόσο για εμάς τους φοιτητές που εμπλουτίζουμε τις γνώσεις μας, αλλά και για το ευρύ κοινό με την ενημέρωση εναλλακτικών καυσίμων πάνω στην αυτοκίνηση, αλλά και γενικότερα στις εναλλακτικές πηγές ενέργειας. Κύριος στόχος αυτής της εργασίας είναι να γίνει ενημέρωση της χρήσης του υδρογόνου ως καύσιμο στις μεταφορές και στην τεχνολογική του εξέλιξη πάνω στην αυτοκίνηση, ως μία από τις εναλλακτικές λύσεις, που θα ωφελήσουν στην αντιμετώπιση προβλημάτων, όπως (φαινόμενο θερμοκηπίου, όξινη βροχή κ.α.), που αποτελούν σοβαρά ζητήματα για την ανθρώπινη υγεία, αλλά και για την ομαλή λειτουργία του περιβάλλοντος.

## ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Ευχαριστούμε θερμά τον Κύριο Μαυρίδη Κωνσταντίνο Καθηγητή του τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών για την πολύτιμη βοήθειά του για την πραγματοποίηση αυτής της εργασίας. Επίσης τους επόπτες καθηγητές μας Κύριο Καλογήρου Ιωάννη και Κύριο Βούρο Ανδρέα και τέλος τους γονείς μας για την στήριξη που μας πρόσφεραν κατά την διάρκεια των σπουδών μας.

Αγγελίδης Αντώνιος

Δήμας Γεώργιος

Φεβρουάριος 2022

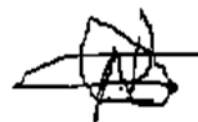
**Υπεύθυνη Δήλωση Φοιτητών:** Οι κάτωθι υπογεγραμμένοι Φοιτητές έχουμε επίγνωση των συνεπειών του Νόμου περί λογοκλοπής και δηλώνουμε υπεύθυνα ότι είμαστε συγγραφείς αυτής της Διπλωματικής Εργασίας, αναλαμβάνοντας την ευθύνη επί ολοκλήρου του κειμένου εξ ίσου, έχουμε δε αναφέρει στην Βιβλιογραφία μας όλες τις πηγές τις οποίες χρησιμοποιήσαμε και λάβαμε ιδέες ή δεδομένα. Δηλώνουμε επίσης ότι, οποιοδήποτε στοιχείο ή κείμενο το οποίο έχουμε ενσωματώσει στην εργασία μας προερχόμενο από Βιβλία ή άλλες εργασίες ή το διαδίκτυο, γραμμένο ακριβώς ή παραφρασμένο, το έχουμε πλήρως αναγνωρίσει ως πνευματικό έργο άλλου συγγραφέα και έχουμε αναφέρει ανελλιπώς το όνομά του και την πηγή προέλευσης.

Οι Φοιτητές

Δήμας Γεώργιος



Αγγελίδης Αντώνιος



## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα εργασία μελετάται η χρήση του στοιχείου υδρογόνου ως καύσιμο «πάνω» στις μεταφορές και ειδικότερα στην χρήση επιβατηγού αυτοκινήτου.

Αρχικά θα γίνει αναφορά στις μηχανές εσωτερικής καύσης (Μ.Ε.Κ.) και στους σημαντικότερους τύπους τους, με την σχετική ακολουθία μια ιστορικής αναδρομής. Εν συνεχεία θα περιγράφουν οι παραγόμενες εκπομπές συμβατικών καυσαερίων που αποτελούν σοβαρό πρόβλημα.

Στην πορεία εξετάζουμε τις μεθόδους παραγωγής και αποθήκευσης υδρογόνου, καθώς και την επισήμανση βασικών φυσικών και χημικών ιδιοτήτων του. Μετέπειτα περιγράφεται η χρήση του υδρογόνου στο αυτοκίνητο, κατασκευαστικά χαρακτηριστικά, όπως δομή κινητήρα με ενεργειακές κυψέλες και σύγκριση με αυτά των συμβατικών Μ.Ε.Κ. Ακόμη θα εξεταστούν και πιθανά προβλήματα καύσης υδρογόνου στις Μ.Ε.Κ.

Τέλος θα επισημανθούν τεχνολογικές εξελίξεις στην αυτοκίνηση με υδρογόνο, και θα γίνει παρουσίαση πρότυπων μοντέλων κορυφαίων αυτοκινητοβιομηχανιών που αποτελούν πρωτοπόροι στην κατασκευή αυτοκινήτων με χρήση καυσίμου υδρογόνου.

Συμπερασματικά η χρήση του υδρογόνου ως καύσιμο στην αυτοκίνηση αποτελεί σοβαρή εναλλακτική λύση στην αντιμετώπιση σοβαρών ζητημάτων. Η χρήση του σε πρακτικές εφαρμογές δεν περιορίζεται μόνο στις μεταφορές. Όμως έντονος προβληματισμός υπάρχει στο κόστος παραγωγής, που «βρίσκεται» σε υψηλά επίπεδα και θα αποτελέσει έντονο προβληματισμό στην επιστημονική κοινότητα.

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το υδρογόνο αποτελεί από τα πρώτα στοιχεία που δημιουργήθηκαν στο σύμπαν. Είναι ένα στοιχείο άχρωμο, άγευστο, άοσμο και μη τοξικό. Το υδρογόνο μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως πρώτη ύλη, ως καύσιμο ή ως φορέας ενέργειας και ως μέσο αποθήκευσης. Χρησιμοποιείται σε πολλές εφαρμογές, στους τομείς της βιομηχανίας, των μεταφορών, ως ενέργεια και στα κτίρια. Για την παραγωγή υδρογόνου από αναμόρφωση υδρογονανθράκων, καταναλώνεται περίπου το (20-30%) του υδρογονάνθρακα και εκλύονται συνεπώς αέρια του «θερμοκηπίου».

Το πρόβλημα της ρύπανσης παραμένει και στην περίπτωση της ηλεκτρόλυσης, εφόσον η ηλεκτρική ενέργεια προέρχεται από ορυκτά καύσιμα. Εάν όμως η ηλεκτρική ενέργεια έχει παραχθεί από Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας, τότε κατά την παραγωγή του υδρογόνου εκλύονται μηδενικοί ρύποι.

Επί του παρόντος το υδρογόνο έχει κυρίως βιομηχανική χρήση ενώ οι ενεργειακές χρήσεις του αποτελούν ελάχιστο ποσοστό. Η βιομηχανία αμμωνίας καταναλώνει το (50) (%) του παραγόμενου υδρογόνου και τα διυλιστήρια το (37 %). Σημαντικές καταναλώσεις έχει και η βιομηχανία τροφίμων (υδρογόνωση ελαίων). Ο βασικός ενεργειακός χρήστης του υδρογόνου είναι η διαστημική βιομηχανία.

Το υδρογόνο μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν εναλλακτικό καύσιμο σε πλήθος (κατάλληλα τροποποιημένων) τεχνολογιών καύσης όπως καταλυτικούς καυστήρες, λέβητες αερίου, αεροστρόβιλους και κινητήρες εσωτερικής καύσης. Η καύση του υδρογόνου παράγει νερό αλλά, λόγω των υψηλών θερμοκρασιών καύσης, παράγονται και οξείδια του αζώτου.

Οι κυψελίδες καυσίμου είναι μία σχετικά πρόσφατη τεχνολογία που επιτρέπει μέσω ηλεκτροχημικής αντίδρασης την παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος, με μόνο υποπροϊόν το νερό. Η λειτουργία τους είναι αντίστροφη από αυτή μιας ηλεκτρολυτικής μονάδας και προσομοιάζει τη λειτουργία μιας μπαταρίας, με τη διαφορά ότι δεν έχει τον περιορισμό της εξάντλησης του καυσίμου.

Θέματα απεξάρτησης από εισαγόμενους υδρογονάνθρακες αφ' ενός αλλά και μείωσης των περιβαλλοντικών επιπτώσεων από τη χρήση ορυκτών καυσίμων αφ'

ετέρου, οδηγούν στο συμπέρασμα ότι στο μέλλον το υδρογόνο που θα παράγεται από ΑΠΕ θα παίξει σημαντικό ρόλο:

- μεσοπρόθεσμα, ως μέσο αποθήκευσης ενέργειας
- μακροπρόθεσμα, ως καθαρό καύσιμο για αποκεντρωμένη παραγωγή ενέργειας (για θέρμανση) ή για τις μεταφορές (καύσιμο στα αυτοκίνητα).

Υπό αυτό το σκεπτικό, η ευρωπαϊκή βιομηχανία έχει αποδοθεί σε έναν αγώνα δρόμου για να πλησιάσει τις ΗΠΑ και την Ιαπωνία στις τεχνολογίες για παραγωγή – χρήση υδρογόνου. Αντίστοιχα, η Ευρωπαϊκή Επιτροπή έχει σαν θέμα πρώτης προτεραιότητας την Έρευνα και Ανάπτυξη στο χώρο αυτό. Ορισμένες χώρες πλούσιες σε δυναμικό ΑΠΕ όπως η Νορβηγία και η Ισλανδία, έχουν ξεκινήσει σημαντικά εθνικά προγράμματα για την παραγωγή, χρήση και εξαγωγή υδρογόνου σε άλλες χώρες.

Σήμερα, η ποσότητες υδρογόνου που χρησιμοποιούνται παραμένουν περιορισμένες και το υδρογόνο παράγεται κατά κύριο λόγο από ορυκτά καύσιμα. Στόχος είναι, αφενός, η απανθρακοποίηση της παραγωγής υδρογόνου –η οποία καθίσταται δυνατή χάρη στην ταχεία μείωση του κόστους των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και την επιτάχυνση των τεχνολογικών εξελίξεων– και, αφετέρου, η επέκταση της χρήσης του υδρογόνου σε τομείς στους οποίους μπορεί να αντικαταστήσει τα ορυκτά καύσιμα.[28]

# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

## ΠΡΟΛΟΓΟΣ ΠΕΡΙΛΗΨΗ ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

<b>1. Μηχανές εσωτερικής καύσης</b> .....	9
1.1 Εισαγωγή – Ιστορική αναδρομή.....	9
1.2 Τετράχρονοι κινητήρες (4T) .....	10
1.3 Δίχρονοι κινητήρες (2T) .....	11
1.4 Κινητήρας βενζίνης (Otto).....	13
1.5 Κινητήρας πετρελαίου (Diesel) .....	13
1.6 Κινητήρας LPG .....	17
1.7 Περιστροφικός κινητήρας (Wankel) .....	18
<b>2. Το υδρογόνο ως στοιχείο</b> .....	21
2.1 Γενικά με το υδρογόνο .....	21
2.2 Χημικά .....	22
2.3 Φυσικά.....	22
2.4 Μέθοδοι παραγωγής υδρογόνου .....	23
2.4.1 Παραγωγή υδρογόνου από αναμόρφωση ατμών .....	24
2.4.2 Παραγωγή υδρογόνου από μερική οξείδωση υδρογονανθράκων .....	25
2.4.3 Παραγωγή υδρογόνου από αυτοθερμική αναμόρφωση .....	26
2.4.4 Παραγωγή υδρογόνου από αποθείωση καυσίμων .....	27
2.4.5 Παραγωγή υδρογόνου από αναμόρφωση πλάσματος (plasma) .....	28
2.4.6 Παραγωγή υδρογόνου από την αεριοποίηση βιομάζας .....	29
2.4.7 Παραγωγή υδρογόνου με ηλεκτρόλυση.....	31
2.4.8 Παραγωγή υδρογόνου με φωτοηλεκτροχημικό διαχωρισμό νερού .....	33
2.5 Τρόποι αποθήκευσης υδρογόνου.....	35
2.5.1 Συμπύεση υδρογόνου σε αέρια μορφή .....	35
2.5.2 Μετατροπή υδρογόνου σε κρυογονική μορφή .....	37
2.5.3 Αποθήκευση σε μεταλλικό υδρίδιο .....	37
2.5.4 Χημική αποθήκευση υδρογόνου .....	39
<b>3. Το Υδρογόνο ως καύσιμο στις κυψέλες καυσίμου</b> .....	43
3.1 Εισαγωγή.....	43
3.2 Τύποι κυψελών καυσίμου .....	43
3.2.1 Κυψέλες καυσίμου μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων (PEMFC) .....	44
3.2.2 Κυψέλες καυσίμου φωσφορικού οξέος (PAFC) .....	45

3.2.3 Κυψέλες καυσίμου αλκαλίων (AFC).....	46
3.2.4 Κυψέλες καυσίμου ανθρακικών αλάτων (MCFC).....	47
3.2.5 Κυψέλες καυσίμου στερεοποιημένων οξειδίων (SOFC) .....	48
3.2.6 Κυψέλες καυσίμου μεθανόλης (DMFC) .....	49
3.3 Το υδρογόνο ως μελλοντική πηγή .....	50
<b>4. Μηχανές εσωτερικής καύσης υδρογόνου (Μ.Ε.Κ. Υδρογόνου) .....</b>	<b>53</b>
4.1 Εισαγωγή.....	53
4.2 Ιδιότητες υδρογόνου και χρήση του στους κινητήρες εσωτερικής καύσης .....	56
4.2.1 Ευρύ φάσμα αναφλεξιμότητας.....	57
4.2.2 Χαμηλή πυκνότητα και μεγάλη ενέργεια καύσης κατά μάζα. ....	58
4.2.3 Υψηλή θερμοκρασία αυτανάφλεξης.....	58
4.2.4 Ελάχιστη ενέργεια ανάφλεξης.....	58
4.2.5 Απόσταση σβέσης.....	59
4.2.6 Υψηλός συντελεστής διάχυσης.....	59
4.2.7 Μεγάλη ταχύτητα καύσης .....	59
4.3 Καύση υδρογόνου στις ΜΕΚ.....	60
4.4 Παράγωγα καύσης στις ΜΕΚ υδρογόνου και σύγκριση με άλλα καύσιμα.....	60
4.4.1 Μονοξείδιο του άνθρακα (CO) .....	61
4.4.2 Διοξείδιο του άνθρακα (CO <sub>2</sub> ) .....	61
4.4.3 Οξειδία του αζώτου (NO <sub>x</sub> ) .....	61
4.4.4 Άκαυστοι υδρογονάνθρακες (UHC) .....	61
4.4.5 Αιθάλη .....	62
4.5 Φαινόμενα ανώμαλης καύσης στις ΜΕΚ υδρογόνου .....	62
4.5.1 Φαινόμενο αυθόρμητης αυτανάφλεξης ("backfire").....	62
4.5.2 Προανάφλεξη(pre-ignition).....	63
4.5.3 Κρουστική καύση(knocking) .....	63
4.6 Μέθοδοι έγχυσης υδρογόνου.....	64
4.6.1 Έγχυση υδρογόνου δια θύρας (PFI).....	64
4.6.2 Άμεση έγχυση υδρογόνου στον θάλαμο καύσης (DI) .....	65
4.7 Βαθμός απόδοσης ΜΕΚ υδρογόνου.....	66
4.8 Σύγκριση αυτοκινήτων με συμβατικά καύσιμα, επαναφορτιζόμενες μπαταρίες και κυψέλες καυσίμου με υδρογόνο.....	67
<b>5. Εξελίξεις και πρότυπα μοντέλα .....</b>	<b>67</b>
5.1 BMW Hydrogen 7 (2007) .....	69
5.2 Toyota Corolla Sport (2021) .....	71
5.3 Hyundai Nexo (2021).....	73
5.4 Εξελίξεις.....	76

## 6. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

## ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΕΣ

ΑΝΣ = Άνω Νεκρό Σημείο

ΚΝΣ = Κάτω Νεκρό Σημείο

Μ.Ε.Κ. = Μηχανές Εσωτερικής Καύσης

CNG = Συμπιεσμένο φυσικό αέριο (Compressed Natural Gas)

LPG = Υγροποιημένο αέριο πετρελαίου (Liquefied Petroleum Gas)

PFI = Έγχυση καυσίμου δια θύρας (Port Fuel Injection)

DI = Απευθείας έγχυση (Direct Injection)

SR = Αναμόρφωση ατμών (Steam Reforming)

ATR = Αυτοθερμική αναμόρφωση (Auto-thermal Reactor)

POX = Μερική οξείδωση υδρογονανθράκων (Partial Oxidation)

PEMFC = Κυψέλη καυσίμου μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων (Proton Exchange Membrane Fuel Cell)

PAFC = Κυψέλη καυσίμου φωσφορικού οξέος (Phosphoric Acid Fuel Cell)

AFC = Κυψέλη καυσίμου αλκαλίων (Alkaline Fuel Cell)

MCFC = Κυψέλη καυσίμου ανθρακικών αλάτων

SOFC = Κυψέλη καυσίμου στερεοποιημένων οξειδίων (Solid Oxides Fuel Cell)

DMFC = Κυψέλη καυσίμου μεθανόλης (Direct Methane Fuel Cell)

PEC = Φωτοηλεκτροχημική διάσπαση νερού σε κυψέλη (PhotoElectrochemical Cell)

CPOX = Μερική οξείδωση υδρογονανθράκων με καταλύτη (Catalytic Partial Oxidation)

AEL = Αλκαλική ηλεκτρόλυση (Alkaline Electrolysis)

SI = Ανάφλεξη με σπινθήρα (Spark Ignition)

LHV = Κατώτατη θερμογόνος δύναμη (Lower Heating Value)





# 1. Η ΜΗΧΑΝΗ ΕΣΩΤΕΡΙΚΗΣ ΚΑΥΣΗΣ

## 1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ - ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ

Οι Μηχανές Εσωτερικής Καύσης (ΜΕΚ), είναι θερμικές μηχανές που παράγουν μηχανικό έργο καταναλώνοντας θερμική ενέργεια, η οποία περιέχεται στα υγρά καύσιμα. Η λειτουργία τους βασίζεται στην μετατροπή μέρους της θερμικής ενέργειας σε μηχανικό έργο προκαλώντας την περιστροφή της ατράκτου.

Οι κινητήρες των μηχανών εσωτερικής καύσης ταξινομούνται ανάλογα με:

- Το καύσιμο που καταναλώνουν σε βενζινοκινητήρες, πετρελαιοκινητήρες και κινητήρες αερίου. Τα καύσιμα που χρησιμοποιούνται είναι είτε υγρά όπως η βενζίνη και το πετρέλαιο, είτε αέρια όπως το υγραέριο και το φυσικό αέριο.
- Τους χρόνους λειτουργίας τους σε τετράχρονους κινητήρες και δίχρονους κινητήρες
- Την υπερπλήρωση καυσίμου ή όχι σε υπερπληρωμένους κινητήρες και φυσικής αναπνοής (ατμοσφαιρικούς).

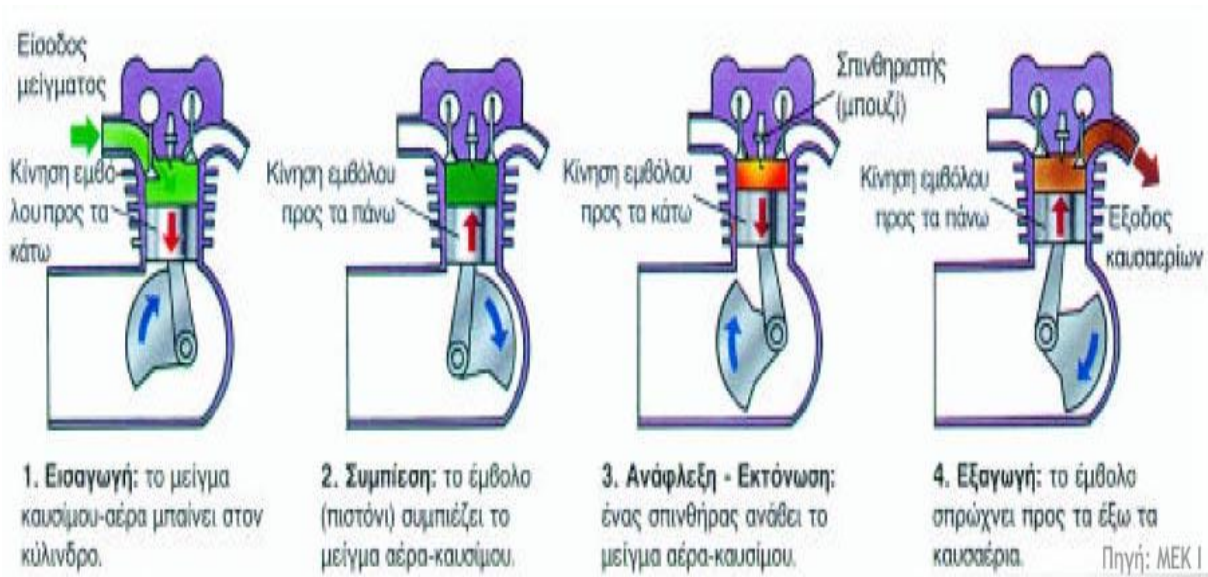
Η ιστορία των μηχανών εσωτερικής καύσης, αρχίζει μόλις το (1860), τη χρονιά δηλαδή που ο **(Jean Joseph Etienne Lenoir)**, ένας Βέλγος εφευρέτης, κατασκεύασε τον πρώτο πρακτικά χρησιμοποιήσιμο κινητήρα, από τον οποίο προέρχονται όλοι οι άλλοι κινητήρες εσωτερικής καύσεως. Εντούτοις η αποδιδόμενη ισχύς ήταν πολύ μικρή, σε αυτόν τον πρώτο κινητήρα, αφού το προς καύση μείγμα γκαζιού-αέρα συμπιεζόταν ελάχιστα πριν την ανάφλεξη. Ο επόμενος σημαντικός σταθμός ήταν στα 1876 όταν ο Γερμανός κόμης και μηχανικός **(Nicolas Otto)** εφάρμοσε στην πράξη, με επιτυχία για πρώτη φορά την αρχή του τετράχρονου κύκλου που είχε προτείνει ο Γάλλος **(Boderossa)**. Με τον τετράχρονο κύκλο το μείγμα συμπιεζόταν, πράγμα που βελτίωσε σημαντικά την αποδιδόμενη ισχύ. Την ίδια περίπου εποχή άρχισε να χρησιμοποιείται αντί για το γκάζι η βενζίνη (ένα κλασματικό απόσταγμα του πετρελαίου που αρχικά ονομαζόταν γκαζολίνη). Κατά την διάρκεια του 1880 η μεγαλύτερη πρόοδος σημειώθηκε στη Γερμανία από τους **(Gottlieb Wilhelm Daimler)**, και **(Karl Benz)**. Ο **(Daimler)** που δούλευε μαζί με τον **(Wilhelm Maybach)**, κατασκεύασε τον πρώτο κινητήρα του το 1883, προξενώντας αίσθηση μια και ο κινητήρας του περιστρεφόταν τέσσερις φορές γρηγορότερα από τους κινητήρες **(Otto)** με (900) στροφές το λεπτό. Ο **(Benz)** από την άλλη μεριά, είχε σαν αντικειμενικό του σκοπό την κατασκευή ενός δικού του αυτοκινούμενου οχήματος και το 1885 τοποθέτησε τον πρώτο κινητήρα σε ένα τρίκυκλο. Μέσα σε ένα χρόνο περίπου και οι δύο κατασκεύαζαν αυτοκίνητα προς πώληση.[30]

## 1.2 Τετράχρονοι κινητήρες (4T)

Τετράχρονοι κινητήρες ονομάζονται οι κινητήρες που εκτελούν ένα πλήρες κύκλο λειτουργίας σε τέσσερις(4) χρόνους ή ισοδύναμα σε δύο (2) πλήρης περιστροφές της στροφαλοφόρου ατράκτου. Ο μηχανισμός στροφάλου – διωστήρα – εμβόλου αποτελεί τον κύριο κινηματικό μηχανισμό που συγκροτεί την εμβολοφόρο ΜΕΚ. Με το μηχανισμό αυτό η παλινδρομική κίνηση του εμβόλου μετατρέπεται μέσω του διωστήρα σε περιστροφική στην στροφαλοφόρο άτρακτο. Λόγω της παλινδρομικής αυτής κίνησης το έμβολο λειτουργεί μεταξύ δύο (2) ακραίων σημείων του Άνω Νεκρού Σημείου (ΑΝΣ) και του Κάτω Νεκρού Σημείου (ΚΝΣ). Η απόσταση που διανύει το έμβολο από το (ΑΝΣ) έως το (ΚΝΣ) καλείται διαδρομή του εμβόλου ή 'χρόνος' και αντιστοιχεί σε μισή περιστροφή (180°) του στροφάλου. Στην πράξη η σειρά ανοίγματος/κλεισίματος των βαλβίδων και του εγχυτήρα δεν ταυτίζεται με την θέση του εμβόλου στα (ΑΝΣ) και (ΚΝΣ), αλλά σε αντίστοιχα σημεία που προσδίδουν βέλτιστη απόδοση στη μηχανή. Στον τετράχρονο κινητήρα τέσσερις (4) διαδρομές του εμβόλου απαιτούν δύο (2) περιστροφές του στροφάλου και αντιστοιχεί ένας (1) κύκλος ανάφλεξης. Οι τέσσερις χρόνοι που χαρακτηρίζουν τους τετράχρονους κινητήρες (Otto), είναι ο χρόνος της αναρρόφησης κατά τον οποίο ο κύλινδρος πληρώνεται με νέο καύσιμο μείγμα, ο χρόνος της συμπίεσης κατά τον οποίο το μίγμα συμπιέζεται μέχρι το (ΑΝΣ), ο χρόνος της καύσης και αποτόνωσης κατά τον οποίο το μίγμα αναφλέγεται από την ηλεκτρική εκκένωση του σπινθηριστή και εκτονώνεται προσδίδοντας στο έμβολο γραμμική ταχύτητα, η οποία μετατρέπεται σε γωνιακή στην στροφαλοφόρο άτρακτο, και τέλος ο χρόνος της εξαγωγής κατά τον οποίο ο κύλινδρος εκκενώνεται από τα προϊόντα της καύσης. Η θερμική απόδοση αυτών των βενζινοκινητήρων θα ποικίλλει ανάλογα με το μοντέλο και τη σχεδίαση του οχήματος. Ωστόσο, γενικά, οι βενζινοκινητήρες μετατρέπουν το (20) (%) του καυσίμου (χημική ενέργεια) σε μηχανική ενέργεια, στην οποία μόνο το (15) (%) θα χρησιμοποιηθεί για την κίνηση των τροχών (το υπόλοιπο χάνεται λόγω τριβής και άλλων μηχανικών στοιχείων). Ένας τρόπος με τον οποίο μπορεί να βελτιωθεί η θερμοδυναμική απόδοση στους κινητήρες είναι μέσω ενός υψηλότερου λόγου συμπίεσης. Αυτή η αναλογία είναι η διαφορά μεταξύ του ελάχιστου και του μέγιστου όγκου στο θάλαμο του κινητήρα. Μια υψηλότερη αναλογία θα επιτρέψει σε ένα μεγαλύτερο μίγμα καυσίμου-αέρα να εισέλθει, προκαλώντας υψηλότερη πίεση, οδηγώντας σε θερμότερο θάλαμο, γεγονός που αυξάνει τη θερμική απόδοση.

Οι τετράχρονοι κινητήρες αποτελούν πρωτοπόρα επιλογή παγκοσμίως, χάρις στην καλή ισορροπία ισχύος που προσφέρουν, την αξιοπιστία και τον υψηλό βαθμό απόδοσης.[29]

Παρακάτω απεικονίζεται σχηματικά ο θεωρητικός κύκλος λειτουργίας ενός τετράχρονου κινητήρα.



Εικόνα 1: Ο θεωρητικός κύκλος λειτουργίας ενός τετράχρονου κινητήρα

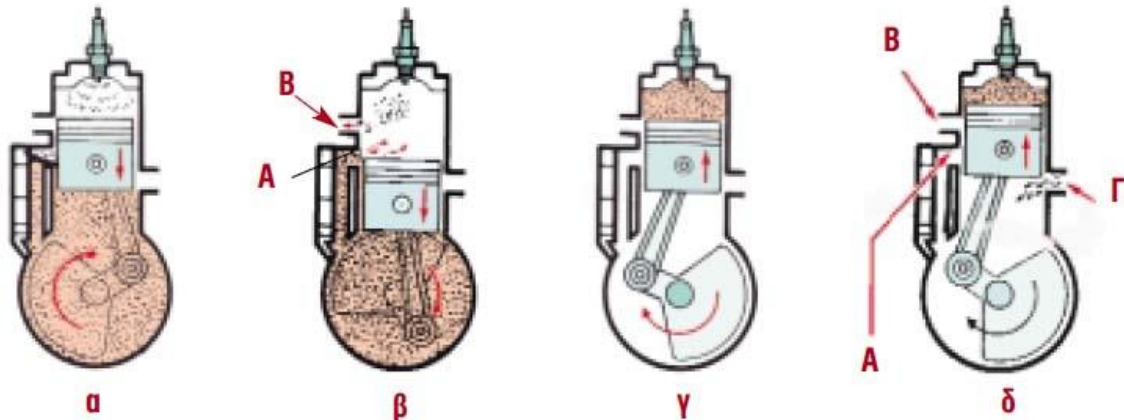
### 1.3 Δίχρονος κινητήρας (2T)

Δίχρονοι κινητήρες χαρακτηρίζονται εκείνοι που ο κύκλος λειτουργίας τους πραγματοποιείται σε δύο (2) χρόνους, δηλαδή σε δύο(2) διαδρομές του εμβόλου ή σε μία πλήρη περιστροφή του στροφαλοφόρου. Στην περίπτωση του δίχρονου κινητήρα, αντί για βαλβίδες όπως στον τετράχρονο, έχουμε θυρίδες, η εισαγωγή του μίγματος στον κύλινδρο γίνεται από την θυρίδα σάρωσης και όχι από την βαλβίδα εισαγωγής. Η θυρίδα σάρωσης αποκαλύπτεται καθώς το έμβολο μετακινείται. Το καύσιμο μίγμα μετά την εισαγωγή του από την θυρίδα εισαγωγής οδηγείται πρώτα στον στροφαλοθάλαμο και μετά διαμέσου της θυρίδας σάρωσης στον κύλινδρο. Οι χρόνοι της αναρρόφησης και της εξαγωγής δεν εξοικονομούνται, αλλά αντικαθίστανται από την λειτουργία ενός άλλου μηχανισμού, του συμπιεστή σάρωσης.

Συνήθως, η πλήρωση και η εκκένωση του κυλίνδρου ρυθμίζεται από την άνω ακμή του εμβόλου, η οποία κατά την παλινδρομική κίνησή της αποκαλύπτει ή καλύπτει διαδοχικά σχετικές θυρίδες τοποθετημένες στην παράπλευρη επιφάνεια του κυλίνδρου. Έτσι η εναλλαγή των αερίων διεξάγεται πάντοτε υπό δυσμενής συνθήκες που καθιστούν απαραίτητη τη βίαιη πλήρωση του κυλίνδρου με τη βοήθεια ειδικής αντλίας αποπλύσεως ή σαρώσεως που απορροφά πολύτιμο έργο από τη στροφαλοφόρο άτρακτο. Στην περίπτωση του δίχρονου κινητήρα, που οι βαλβίδες

εισαγωγής και εξαγωγής απουσιάζουν, ο εκκεντροφόρος άξονας εξυπηρετεί μόνο τον χρονισμό και την έναυση του ψεκασμού και της καύσης, ενώ περιστρέφεται με την ίδια γωνιακή ταχύτητα με την στροφαλοφόρο άτρακτο. Οι δίχρονοι κινητήρες χρησιμοποιούνται για πολλά χρόνια σε μοτοσυκλέτες και μοτοποδήλατα, κουρευτικές μηχανές γκαζόν, εξωλέμβιες μηχανές και μικρές βιομηχανικές εφαρμογές, καθώς συνδυάζουν την απλότητα του μηχανισμού λειτουργίας, την ευκολία κατασκευής, τη μεγάλη απόδοση, το μικρό βάρος και την οικονομικά συμφέρουσα μαζική παραγωγή. Εντούτοις, είναι σχετικά θορυβώδεις με υψηλή κατανάλωση καυσίμου και αντίστοιχα υψηλές εκπομπές καυσαερίων ενώ η ανάμιξη του ελαίου λίπανσης με το καύσιμο προσδίδει μία δυσάρεστη οσμή στα καυσαέρια του κινητήρα. Επιπλέον, παρουσιάζουν μειωμένη αξιοπιστία και διάρκεια ζωής σε σχέση με τους τετράχρονους κινητήρες. Η υψηλότερη κατανάλωση και οι υψηλότερες εκπομπές ρύπων έχουν τη ρίζα τους στις αρχές λειτουργίας του δίχρονου κινητήρα, στον οποίο ο χρόνος της εξαγωγής, με τον χρόνο της εισαγωγής επικαλύπτονται χρονικά με συνέπεια μέρος του εισαγόμενου άκαυστου μίγματος να ελευθερώνεται στην εξαγωγή μαζί με τα καυσαέρια.[29]

Παρακάτω απεικονίζεται ο θεωρητικός κύκλος λειτουργίας δίχρονου κινητήρα.



Σχήμα 4.5: Ο κύκλος λειτουργίας του δίχρονου κινητήρα.

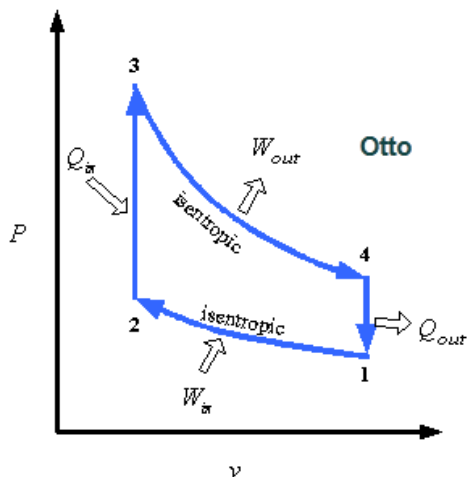
(Α) - Θυρίδα εισαγωγής καυσίμου στον κύλινδρο. (Β) - Θυρίδα εξαγωγής κρυσαερίων.  
(Γ) - Θυρίδα εισαγωγής καυσίμου στο στροφαλοθάλαμο.

Εικόνα 2: Ο κύκλος λειτουργίας ενός δίχρονου κινητήρα

#### 1.4 Κινητήρας Otto (βενζίνης)

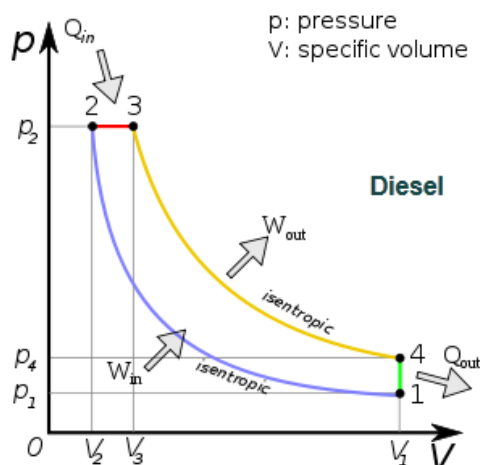
Το όνομά του το οφείλει στον Γερμανό σχεδιαστή (**Nicolaus Otto**). Οι κινητήρες (**Otto**) με ανάφλεξη από σπινθήρα (spark-ignition) διακρίνονται σε δύο κατηγορίες, σε αεριομηχανές και βενζινομηχανές. Οι αεριομηχανές λειτουργούν με καύσιμα φυσικής προέλευσης ή τεχνητά αέρια, όπως είναι το φυσικό αέριο, το υγραέριο και το φωταέριο. Ενώ οι βενζινομηχανές χρησιμοποιούν κατά κύριο λόγο βενζίνη και ποιο συγκεκριμένα υγρά καύσιμα που προέρχονται από μεθανόλη, αιθανόλη κ.λπ.

Οι μέθοδοι δημιουργίας μίγματος αέρα – καυσίμου είναι δύο. Η πρώτη και παλαιότερη μέθοδος είναι η άμεση έγχυση, στην οποία διοχετεύει συνεχώς βενζίνη στον θάλαμο καύσης με αποτέλεσμα να έχουμε παραπάνω βενζίνη από όσο χρειάζεται το μίγμα αέρα- καυσίμου με αποτέλεσμα να μην γίνεται σωστή καύση. Η δεύτερη και πιο σύγχρονη μέθοδος είναι της έμμεσης έγχυσης. Η δεύτερη συμπεριλαμβάνει δύο τρόπους έγχυσης , την ηλεκτρονική έγχυση μονού σημείου ή την έγχυση πολλαπλών σημείων. Αυτά τα συστήματα ονομάζονται συστήματα διακοπτόμενης λειτουργίας και διοχετεύουν καύσιμο μέσα στους κυλίνδρους από την στραγγαλιστική δικλείδα που γίνεται η καύση όταν αυτό χρειάζεται για να έχουμε όσο γίνεται σωστή και μη ατελής καύση. Ο ρυθμιστής για την ποσότητα που θα αφήσει να μπει στο θάλαμο καύσης είναι η στραγγαλιστική βαλβίδα (πεταλούδα) όπως αναφέραμε και εκτός από αυτό ρυθμίζει την υποπίεση κατά την αναρρόφηση του κυλίνδρου. Στο θάλαμο καύσης η στοιχειομετρική αναλογία καύσιμου είναι περίπου είναι (14,7:1), με λίγα λόγια σε (14,7) μέρη αέρα αντιστοιχεί (1) μέρος καυσίμου για την στοιχειομετρική καύση. Σε μία άλλη περίπτωση που έχουμε καύση πτωχών μιγμάτων, και είναι η καύση όπου ο αέρας έχει μεγαλύτερο ποσοστό από την προηγούμενη περίπτωση, μεγαλώνει ο βαθμός απόδοσης και ελαττώνεται το ποσοστό απελευθέρωσης εκπομπών αέριων ρύπων. Οι κινητήρες (**Otto**) πτωχού μείγματος ο κινητήρας του (**May**) θέλουν την καύση πολύ πτωχών μιγμάτων, με λόγο αέρα-καυσίμου έως και (50:1). Αυτό επιτυγχάνεται με την άνοδο του επιπέδου της τύρβης (**swirl**) της γομώσεως και ιδιαίτερα στον θάλαμο γύρω από τη βαλβίδα εξαγωγής. Με αυτό τον τρόπο, ανάλογα πάντα με τις δύο σχεδιαστικές παραμέτρους ελαττώνουμε τον κίνδυνο εμφάνισης κρουστικής καύσης και έτσι μπορεί να γίνει χρήση υψηλών βαθμών συμπίεσης. Όλα αυτά βέβαια γίνονται για την αύξηση της απόδοσης και την οικονομία του καυσίμου της μηχανής.[29]



Οι μεταβολές που αποτελούν τον κύκλο Otto είναι:

- 1->2 ισητροπική (αδιαβατική) συμπίεση
- 2->3 ισόογκη πρόσδωση θερμότητας
- 3->4 ισητροπική (αδιαβατική) εκτόνωση
- 4->1 ισόογκη αποβολή θερμότητας



Οι μεταβολές που αποτελούν τον κύκλο Diesel είναι:

- 1->2 ισητροπική (αδιαβατική) συμπίεση
- 2->3 ισόθλιπτη πρόσδωση θερμότητας
- 3->4 ισητροπική (αδιαβατική) εκτόνωση
- 4->1 ισόογκη αποβολή θερμότητας

Εικόνα 3: Διαφορά κύκλων Otto/Diesel

## 1.5 Κινητήρας Πετρελαίου (Diesel)

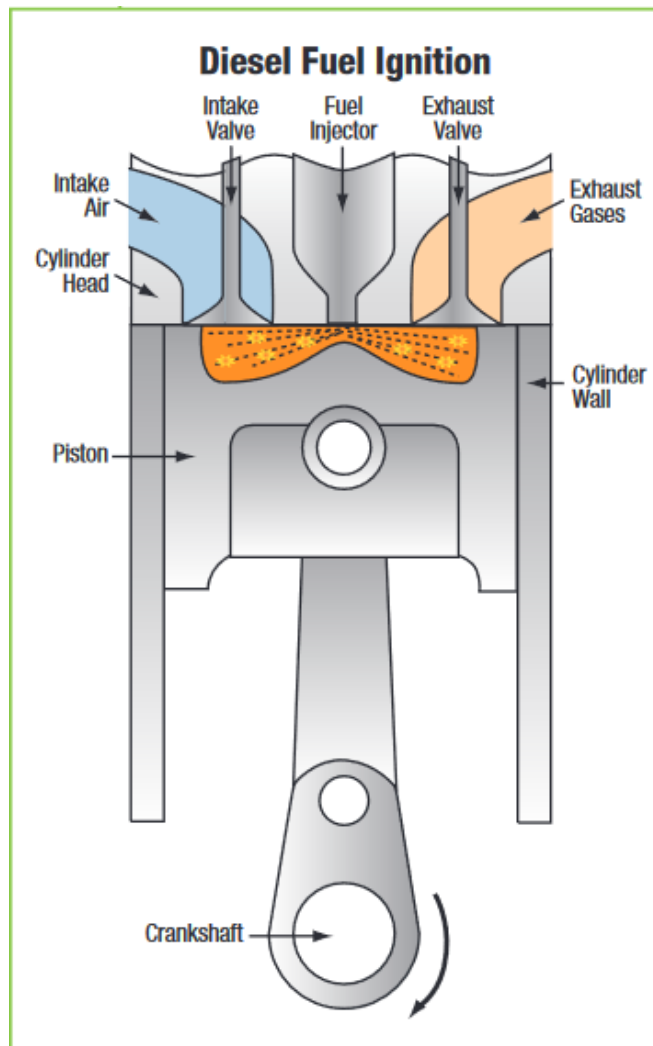
Ο σύγχρονος κινητήρας πετρελαίου (Diesel) προέκυψε ως αποτέλεσμα των αρχών εσωτερικής καύσης που προτάθηκαν για πρώτη φορά από τον **(Sadi Carnot)** στις αρχές του 19ου αιώνα. Ο Δρ. **(Rudolf Diesel)** εφάρμοσε τις αρχές του **(Sadi Carnot)** σε έναν κατοχυρωμένο με δίπλωμα ευρεσιτεχνίας κύκλο ή μέθοδο καύσης που έχει γίνει γνωστός ως κύκλος "ντίζελ". Ο πατενταρισμένος κινητήρας του λειτούργησε όταν η θερμότητα που παράχθηκε κατά τη συμπίεση της φόρτισης καυσίμου αέρα προκάλεσε ανάφλεξη του μείγματος, το οποίο στη συνέχεια επεκτάθηκε με σταθερή πίεση κατά τη διάρκεια της πλήρους διαδρομής ισχύος του κινητήρα. Ο πρώτος κινητήρας του Δρ. **(Diesel)** λειτουργούσε με σκόνη άνθρακα και χρησιμοποίησε πίεση συμπίεσης (1500) psi για να αυξήσει τη θεωρητική του απόδοση. Επίσης, ο πρώτος κινητήρας του δεν είχε προβλέψεις για κανένα είδος συστήματος ψύξης. Κατά συνέπεια, μεταξύ της υπερβολικής πίεσης και της έλλειψης ψύξης, ο κινητήρας εξερράγη και παραλίγο να σκοτώσει τον εφευρέτη του. Μετά την ανάρρωση από τα τραύματά του, ο Ντίζελ προσπάθησε ξανά, χρησιμοποιώντας λάδι

ως καύσιμο, προσθέτοντας ένα χιτώνιο νερού ψύξης γύρω από τον κύλινδρο και μειώνοντας την πίεση συμπίεσης στα **(55)** psi περίπου. Αυτός ο συνδυασμός τελικά αποδείχθηκε επιτυχημένος. Τα δικαιώματα παραγωγής του κινητήρα πωλήθηκαν στον **(Adolphus Bush)**, ο οποίος κατασκεύασε τους πρώτους κινητήρες ντίζελ για εμπορική χρήση, εγκαθιστώντας τους στο ζυθοποιείο του **(St. Louis)** για να κινεί διάφορες αντλίες.

Ένας κινητήρας ντίζελ είναι παρόμοιος με τον βενζινοκινητήρα που χρησιμοποιείται στα περισσότερα αυτοκίνητα. Και οι δύο κινητήρες είναι κινητήρες εσωτερικής καύσης, που σημαίνει ότι καίνε το μείγμα καυσίμου-αέρα μέσα στους κυλίνδρους. Και οι δύο είναι παλινδρομικοί κινητήρες, που κινούνται από έμβολα που κινούνται πλευρικά σε δύο κατευθύνσεις. Τα περισσότερα μέρη τους είναι παρόμοια. Αν και ένας κινητήρας ντίζελ και ένας βενζινοκινητήρας λειτουργούν με παρόμοια εξαρτήματα, ένας κινητήρας ντίζελ, σε σύγκριση με έναν βενζινοκινητήρα ίσης ιπποδύναμης, είναι βαρύτερος λόγω ισχυρότερων, βαρύτερων υλικών που χρησιμοποιούνται για να αντέχουν τις μεγαλύτερες δυναμικές δυνάμεις από τις υψηλότερες πιέσεις καύσης που υπάρχουν στην ντιζελομηχανή. Όλοι οι κινητήρες ντίζελ εμπίπτουν σε μία από τις δύο κατηγορίες, τους δίχρονους ή τους τετράχρονους κινητήρες κύκλου. Η λέξη κύκλος αναφέρεται σε οποιαδήποτε λειτουργία ή σειρά γεγονότων που επαναλαμβάνεται.

Η διαφορά μεταξύ των βενζινοκινητήρων και των πετρελαιοκινητήρων είναι κυρίως στον τρόπο με τον οποίο συμβαίνουν οι εκρήξεις. Οι βενζινοκινητήρες ξεκινούν τις εκρήξεις με σπινθήρες από μπουζί, ενώ στους πετρελαιοκινητήρες το καύσιμο αναφλέγεται από μόνο του. Αν και οι κινητήρες ντίζελ έχουν δει τεράστιες βελτιώσεις, η βασική ιδέα του τετράχρονου κινητήρα ντίζελ έχει παραμείνει σχεδόν αμετάβλητη εδώ και 100 χρόνια. Η πρώτη διαδρομή περιλαμβάνει την έλξη αέρα μέσω του σωλήνα εισαγωγής με το άνοιγμα της βαλβίδας εισαγωγής (Intake Air/Intake Valve) σε έναν κύλινδρο (cylinder walls) καθώς το έμβολο δημιουργεί χώρο για αυτόν απομακρύνοντας από τη βαλβίδα εισαγωγής. Η επακόλουθη ανοδική αιώρηση του εμβόλου (piston) στη συνέχεια συμπιέζει τον αέρα, θερμαίνοντας τον ταυτόχρονα. Στη συνέχεια, το καύσιμο εγχέεται υπό υψηλή πίεση από το μπεκ ψεκασμού καυσίμου (fuel injector) καθώς το έμβολο πλησιάζει στην κορυφή της διαδρομής συμπίεσής του, αναφλέγοντας το αυθόρμητα καθώς έρχεται σε επαφή με τον θερμαινόμενο αέρα. Τα καυτά αέρια καύσης διαστέλλονται, οδηγώντας το έμβολο προς τα κάτω σε αυτό που ονομάζεται χτύπημα ισχύος (κροτάλισμα). Κατά την αιώρηση επιστροφής, το έμβολο σπρώχνει τα αναλωμένα αέρια από τον κύλινδρο (exhaust gases) και ο κύκλος ξεκινά ξανά με εισαγωγή φρέσκου αέρα.





Εικόνα 4: Θάλαμος καύσης κινητήρα ντίζελ

Μια άλλη διαφορά μεταξύ ενός βενζινοκινητήρα και ενός κινητήρα ντίζελ είναι ο τρόπος με τον οποίο ελέγχονται οι στροφές του κινητήρα. Σε κάθε κινητήρα, η ταχύτητα (ή η ισχύς) είναι άμεση συνάρτηση της ποσότητας καυσίμου που καίγεται στους κυλίνδρους. Οι βενζινοκινητήρες είναι αυτοπεριορισμένοι στην ταχύτητα, λόγω της μεθόδου που χρησιμοποιεί ο κινητήρας για τον έλεγχο της ποσότητας αέρα που εισέρχεται στον κινητήρα. Η ταχύτητα του κινητήρα ελέγχεται έμμεσα από τη βαλβίδα πεταλούδας στο καρμπυρατέρ. Η βαλβίδα πεταλούδας σε ένα καρμπυρατέρ περιορίζει την ποσότητα αέρα που εισέρχεται στον κινητήρα. Σε ένα καρμπυρατέρ, ο ρυθμός ροής αέρα υπαγορεύει την ποσότητα βενζίνης που θα αναμιχθεί με τον αέρα. Ο περιορισμός της ποσότητας αέρα που εισέρχεται στον κινητήρα περιορίζει την ποσότητα καυσίμου που εισέρχεται στον κινητήρα και, επομένως, περιορίζει την ταχύτητα του κινητήρα. Περιορίζοντας την ποσότητα αέρα που εισέρχεται στον κινητήρα, η προσθήκη περισσότερων καυσίμων δεν αυξάνει τις στροφές του κινητήρα πέρα από το σημείο όπου το καύσιμο καίει το (100%) του διαθέσιμου αέρα (οξυγόνο). Οι κινητήρες ντίζελ δεν είναι αυτοπεριορισμένοι στην ταχύτητα, επειδή ο αέρας (οξυγόνο) που εισέρχεται στον κινητήρα είναι πάντα η μέγιστη ποσότητα.

Επομένως, οι στροφές του κινητήρα περιορίζονται αποκλειστικά από την ποσότητα καυσίμου που εγχέεται στους κυλίνδρους του κινητήρα. Επομένως, ο κινητήρας έχει πάντα αρκετό οξυγόνο για καύση και ο κινητήρας θα προσπαθήσει να επιταχύνει για να ανταποκριθεί στον νέο ρυθμό έγχυσης καυσίμου. Εξαιτίας αυτού, ο χειροκίνητος έλεγχος καυσίμου δεν είναι δυνατός επειδή αυτοί οι κινητήρες, σε κατάσταση χωρίς φορτίο, μπορούν να επιταχύνουν με ρυθμό άνω των (2000) στροφών ανά δευτερόλεπτο. Οι κινητήρες ντίζελ απαιτούν έναν περιοριστή ταχύτητας, που συνήθως ονομάζεται ρυθμιστής, για τον έλεγχο της ποσότητας καυσίμου που εγχέεται στον κινητήρα. Σε αντίθεση με έναν βενζινοκινητήρα, ένας κινητήρας ντίζελ δεν απαιτεί σύστημα ανάφλεξης επειδή σε έναν κινητήρα ντίζελ το καύσιμο εγχέεται στον κύλινδρο καθώς το έμβολο φτάνει στην κορυφή της διαδρομής συμπίεσής του. Όταν το καύσιμο εγχέεται, εξατμίζεται και αναφλέγεται λόγω της θερμότητας που δημιουργείται από τη συμπίεση του αέρα στον κύλινδρο.

Αυτό το γεγονός οδήγησε ότι η υψηλή συμπίεση θα πρέπει να οδηγεί σε υψηλή απόδοση του κινητήρα. Η μεγαλύτερη πίεση καύσης είναι αποτέλεσμα της υψηλότερης σχέσης συμπίεσης που χρησιμοποιούν οι κινητήρες ντίζελ. Ο λόγος συμπίεσης είναι ένα μέτρο του πόσο συμπιέζει ο κινητήρας τα αέρια στον κύλινδρο του κινητήρα. Σε έναν βενζινοκινητήρα ο λόγος συμπίεσης (που ελέγχει τη θερμοκρασία συμπίεσης) περιορίζεται από το μείγμα αέρα-καυσίμου που εισέρχεται στους κυλίνδρους. Η χαμηλότερη θερμοκρασία ανάφλεξης της βενζίνης θα προκαλέσει την ανάφλεξή της (κάψιμο) σε αναλογία συμπίεσης μικρότερη από (10:1). Το μέσο αυτοκίνητο έχει αναλογία συμπίεσης (7:1).

Σε έναν κινητήρα ντίζελ, χρησιμοποιούνται συνήθως αναλογίες συμπίεσης που κυμαίνονται από (14:1) έως και (24:1). Οι υψηλότερες αναλογίες συμπίεσης είναι δυνατές επειδή συμπιέζεται μόνο ο αέρας και στη συνέχεια γίνεται έγχυση του καυσίμου. Αυτός είναι ένας από τους παράγοντες που επιτρέπει στον κινητήρα ντίζελ να είναι τόσο αποδοτικός.

Οι κλασικοί κινητήρες ντίζελ αναμειγνύουν καύσιμο και αέρα σε έναν θάλαμο προ καύσης πριν τον εγχύσουν σε έναν κύλινδρο. Τα βήματα ανάμιξης και έγχυσης ελέγχονται μηχανικά, γεγονός που καθιστά πολύ δύσκολη την προσαρμογή του μείγματος καυσίμου-αέρα στις μεταβαλλόμενες συνθήκες του κινητήρα. Αυτό οδήγησε στην ατελή καύση καυσίμου, ιδιαίτερα σε χαμηλές ταχύτητες. Ως αποτέλεσμα, σπαταλάτε καύσιμο και οι εκπομπές καυσαερίων είναι σχετικά υψηλές.

Τα σημερινά αυτοκίνητα με ντίζελ εγχέουν καύσιμο απευθείας στους κυλίνδρους του κινητήρα χρησιμοποιώντας μικροσκοπικούς υπολογιστές για να παρέχουν ακριβώς τη σωστή ποσότητα καυσίμου τη στιγμή που χρειάζεται. Όλες οι λειτουργίες σε έναν σύγχρονο κινητήρα ντίζελ ελέγχονται από μια ηλεκτρονική μονάδα ελέγχου που επικοινωνεί με μια περίπλοκη σειρά αισθητήρων τοποθετημένων σε στρατηγικές θέσεις σε όλο τον κινητήρα για να παρακολουθεί τα πάντα, από τις στροφές του κινητήρα μέχρι τις θερμοκρασίες ψυκτικού και λαδιού,

ακόμη και τη θέση του εμβόλου. Ο αυστηρός ηλεκτρονικός έλεγχος σημαίνει ότι το καύσιμο καίγεται πιο διεξοδικά, παρέχοντας περισσότερη ισχύ, μεγαλύτερη οικονομία καυσίμου και λιγότερες εκπομπές ρύπων από ό,τι μπορούσαν να επιτύχουν οι παλαιότεροι κινητήρες ντίζελ.[1], [2]

## 1.6 Κινητήρες με χρήση υγραερίου (LPG)

Το προπάνιο, γνωστό ως και υγραέριο (LPG)ή αέριο κίνησης, είναι ένα εναλλακτικό καύσιμο καθαρής καύσης που χρησιμοποιείται εδώ και δεκαετίες για την τροφοδοσία οχημάτων προπανίου ελαφρού, μεσαίου και βαρέως τύπου. Το προπάνιο είναι ένα αέριο αλκανίου τριών ανθράκων ( $C_3H_8$ ). Αποθηκεύεται υπό πίεση μέσα σε μια δεξαμενή ως άχρωμο, άοσμο υγρό. Καθώς απελευθερώνεται η πίεση, το υγρό προπάνιο εξατμίζεται και μετατρέπεται σε αέριο που χρησιμοποιείται στην καύση. Επιπλέον, για την ανίχνευση διαρροών, προστίθεται ένα αρωματικό στοιχείο, η αιθυλική μεκραπτάνη.

Το προπάνιο έχει υψηλή βαθμολογία οκτανίων, γεγονός που το καθιστά εξαιρετική επιλογή για κινητήρες εσωτερικής καύσης που αναφλέγονται με σπινθήρα. Εάν χυθεί ή απελευθερωθεί από ένα όχημα, δεν αποτελεί απειλή για το έδαφος, τα επιφανειακά ύδατα ή τα υπόγεια ύδατα. Το προπάνιο παράγεται από υγρά συστατικά που ανακτώνται κατά την επεξεργασία του φυσικού αερίου. Αυτά τα συστατικά περιλαμβάνουν αιθάνιο, μεθάνιο, προπάνιο και βουτάνιο, καθώς και βαρύτερους υδρογονάνθρακες. Το προπάνιο και το βουτάνιο, μαζί με άλλα αέρια, παράγονται επίσης κατά τη διύλιση του αργού πετρελαίου. Χημικά πανομοιότυπο με το συμβατικό προπάνιο, το ανανεώσιμο προπάνιο παράγεται από πρώτες ύλες με βάση τη βιομάζα, συμπεριλαμβανομένων χρησιμοποιημένου μαγειρικού λαδιού, ζωικών λιπών ή 20% διμεθυλαιθέρα. Αν και ο αριθμός των παραγωγών είναι μικρός, το ανανεώσιμο προπάνιο παράγεται επί του παρόντος σε διυλιστήρια βιοντίζελ.

Τα οχήματα προπανίου λειτουργούν όπως τα οχήματα βενζίνης με κινητήρες που αναφλέγονται με σπινθήρα. Υπάρχουν δύο τύποι συστημάτων έγχυσης καυσίμου προπανίου: έγχυση ατμού και υγρού. Και στους δύο τύπους, το προπάνιο αποθηκεύεται ως υγρό σε δεξαμενή σχετικά χαμηλής πίεσης. Η τεχνολογία ψεκασμού υγρού επιτρέπει πιο ακριβή έλεγχο της παροχής καυσίμου, με αποτέλεσμα βελτιωμένη απόδοση του κινητήρα.

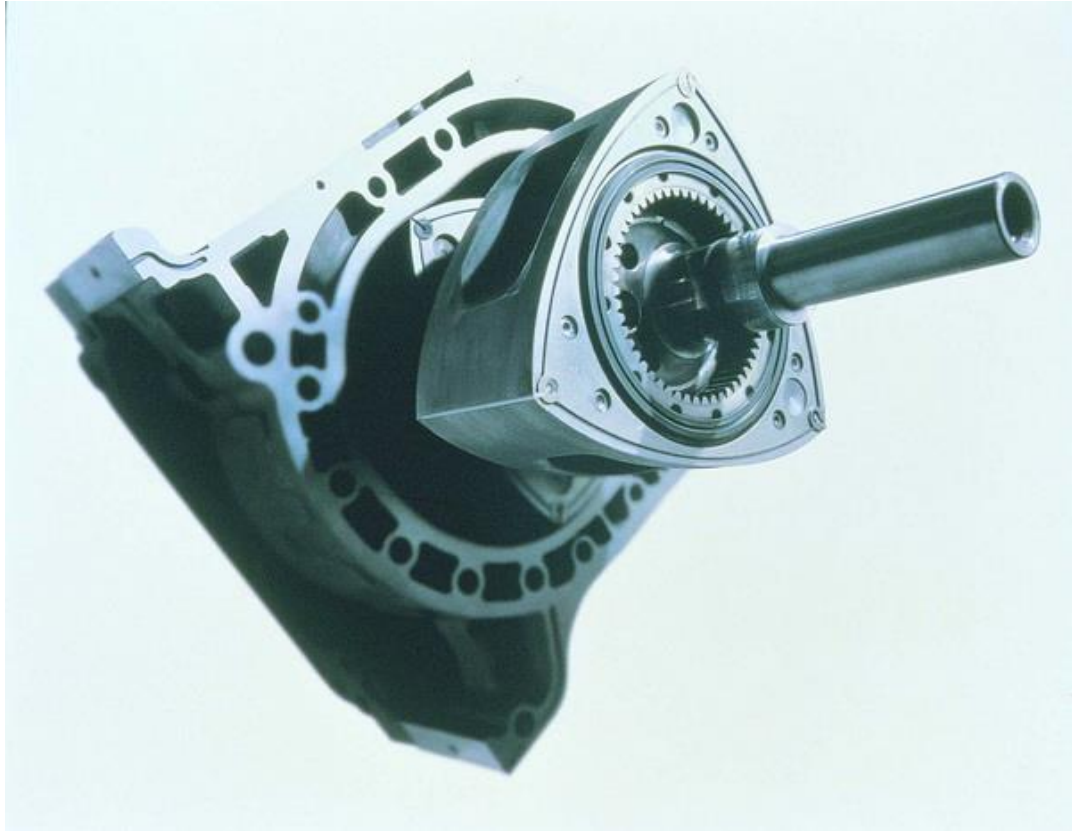
Η ισχύς, η επιτάχυνση και η ταχύτητα οδήγησης ενός οχήματος προπανίου είναι παρόμοιες με εκείνες των συμβατικών καυσίμων. Τα οχήματα διπλού καυσίμου διαθέτουν δύο ξεχωριστά συστήματα τροφοδοσίας καυσίμου, που επιτρέπουν στο όχημα να λειτουργεί είτε με προπάνιο είτε με βενζίνη. Αυτό παρέχει την ευελιξία στη χρήση καυσίμου, το οποίο συνήθως παρέχει στα οχήματα δύο καυσίμων μεγαλύτερη εμβέλεια από τα οχήματα αποκλειστικού προπανίου ή βενζίνης. Οι επιπλέον δεξαμενές αποθήκευσης μπορούν να αυξήσουν την εμβέλεια, αλλά το μέγεθος της δεξαμενής και το πρόσθετο βάρος επηρεάζουν τη χωρητικότητα του ωφέλιμου

φορτίου. Επειδή ένα γαλόνι προπανίου έχει 27% λιγότερη ενέργεια από ένα γαλόνι βενζίνης, η οικονομία καυσίμου των οχημάτων προπανίου είναι ελαφρώς χαμηλότερη. Ωστόσο, το προπάνιο έχει υψηλότερο αριθμό οκτανίων αντλίας από τη βενζίνη (104–112 σε σύγκριση με 87–92 για τη βενζίνη) και ορισμένοι κατασκευαστές πρωτότυπου εξοπλισμού (OEM) προσφέρουν βελτιστοποιημένους αποκλειστικούς κινητήρες για να επωφεληθούν από αυτήν την υψηλότερη βαθμολογία. Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε βελτιωμένη απόδοση και οικονομία καυσίμου σε σχέση με μη βελτιστοποιημένους κινητήρες.

Οι εκπομπές καυσαερίων από οχήματα προπανίου είναι συχνά συγκρίσιμες ή ακόμη και χαμηλότερες από εκείνες των οχημάτων με συμβατικά καύσιμα με σύγχρονους ελέγχους εκπομπών, ανάλογα με τον τύπο του οχήματος, τον κύκλο οδήγησης και τη βαθμονόμηση του κινητήρα. Με βάση υπολογισμούς από το εργαλείο AFLEET του Εθνικού Εργαστηρίου Argonne, για παράδειγμα, τα σχολικά λεωφορεία που κινούνται με προπάνιο μπορούν να μειώσουν τις εκπομπές οξειδίων του αζώτου (NOx) σχεδόν στο μισό σε σύγκριση με τα οχήματα ντίζελ. Οχήματα με κινητήρες σχεδόν μηδενικών NOx μπορούν να επιτρέψουν ακόμη μεγαλύτερες μειώσεις. Κατά την εξέταση μιας ανάλυσης εκπομπών από φρεάτια σε τροχούς, η χρήση προπανίου μειώνει τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου κατά σχεδόν 13% σε σύγκριση με τα βενζινοκίνητα οχήματα. Για το ανανεώσιμο προπάνιο, οι εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου στον κύκλο ζωής είναι περίπου οι μισές από το συμβατικό προπάνιο, σύμφωνα με εκτιμήσεις του Συμβουλίου Εκπαίδευσης & Έρευνας για το Προπάνιο (PERC). [3]

## 1.7 Περιστροφικός κινητήρας (Wankel)

Είναι και αυτός ένας κινητήρας εσωτερικής καύσης με περιστροφικό έμβολο που αναπτύχθηκε στη Γερμανία. Η κατασκευαστική του δομή διαφέρει από τους συμβατικούς κινητήρες με παλινδρομικά έμβολα. Ο κινητήρας επινοήθηκε από τον **(Felix Wankel)** και η κατασκευή του άρχισε το (1956). Αντί για έμβολο ο κινητήρας **(Wankel)** έχει έναν τροχιακό ρότορα. Τα κυριότερα πλεονεκτήματα του κινητήρα είναι ο μικρός χώρος και το μικρό βάρος ανά μονάδα ισχύος, η στρωτή, χωρίς κραδασμούς αθόρυβη λειτουργία του καθώς και το χαμηλό κόστος κατασκευής του, αποτέλεσμα της μηχανικής του απλότητας. Η εισαγωγή νωπού μείγματος καυσίμων και η εξαγωγή των καυσαερίων είναι δύσκολη λόγω φυγόκεντρων δυνάμεων και γεωμετρίας. Η κατανάλωση σε καύσιμο είναι λίγο μεγαλύτερη με εκείνη στις συμβατικές μηχανές. Η μικρότερη μάζα και η χαμηλότερη θέση του κέντρου βάρους καθιστούν τον κινητήρα αυτόν ασφαλέστερο για αυτοκίνητα. Τα κινούμενα μέρη ενός κινητήρα **(Wankel)** ανέρχονται στο ένα τρίτο περίπου από ότι σε τυπικό εξακύλινδρο κινητήρα.[29]



**Εικόνα 5: Τμήμα του περιστροφικού κινητήρα (Wankel), στο κέντρο διακρίνεται ο ρότορας**

## 2. Το υδρογόνο ως στοιχείο

### 2.1 Γενικά με το υδρογόνο

Το υδρογόνο είναι το μικρότερο και απλούστερο χημικό στοιχείο γιατί αποτελείται από ένα μόνο πρωτόνιο στον πυρήνα του. Είναι το πιο κοινό από τα υπόλοιπα χημικά στοιχεία, τα οποία είναι τα δομικά στοιχεία όλης της ύλης. Συμβολίζεται με το ελληνικό γράμμα(H) και ο ατομικός του αριθμός είναι ίσος με(1). Έχει μέσο ατομικό βάρος (1,0079)(amu), καθιστώντας το ελαφρύτερο στοιχείο. Το υδρογόνο είναι η πιο άφθονη χημική ουσία στο σύμπαν, περίπου τα τρία τέταρτα της ύλης, ειδικά στα αστέρια και στους αέριους γίγαντες πλανήτες. Ωστόσο, το μονοατομικό υδρογόνο είναι σπάνιο στη Γη λόγω της τάσης του να σχηματίζει ομοιοπολικούς δεσμούς με τα περισσότερα στοιχεία. Σε τυπική θερμοκρασία και πίεση, το υδρογόνο είναι ένα μη τοξικό, μη μεταλλικό, άοσμο, άγευστο, άχρωμο και εξαιρετικά εύφλεκτο διατομικό αέριο με μοριακό τύπο ( $H_2$ ). Το υδρογόνο είναι επίσης διαδεδομένο στη Γη με τη μορφή χημικών ενώσεων όπως οι υδρογονάνθρακες και το νερό.



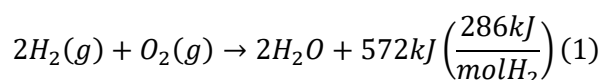
Εικόνα 6: Υδρογόνο

καεί σε «αποφλογιστικοποιημένο αέρα» (οξυγόνο) παράγει νερό. Αυτή η ανακάλυψη ενέπνευσε τον Λαβοισιέρ (Lavoisier) να ονομάσει την ουσία «υδρογόνο», που σημαίνει σχηματιστής νερού, το (1783). Αντίθετα, το (1800) οι (Nicholson) και (Carlisle) (σε λίγο μετά από τον Ritter) κατάφεραν να αποσυνθέσουν το νερό στα στοιχειώδη συστατικά του χρησιμοποιώντας την μέθοδο της ηλεκτρόλυσης. Είναι αυτή η διαδικασία που προσπαθούμε να επιτύχουμε σήμερα, αν και με πολύ μικρότερο κόστος ηλεκτρικού ρεύματος, μέσω μιας φωτοχημικής διαδικασίας. Το εξελιγμένο αέριο ( $H_2$ ) είναι ένας εξαιρετικός, εξαιρετικά ελαφρύς φορέας ενέργειας και πολλά υποσχόμενος ως καύσιμο — άφθονο και φιλικό προς το περιβάλλον καθώς η οξείδωση του παράγει νερό. Το μοριακό ( $H_2$ ) γέμισε ένα από τα πρώτα μπαλόνια που χρησιμοποιήθηκαν για να μεταφερθούν άνθρωποι το (1783) και τις δεξαμενές καυσίμου των πυραύλων δύο αιώνες αργότερα, επιτρέποντας στον περίεργο άνθρωπο να εξερευνησει όλο και περισσότερο το άγνωστο. [4], [5]

Ο Βαν Χελμόντ (Van Helmont) ήταν ο πρώτος που ανακάλυψε ότι αν και το υδρογόνο ήταν εύφλεκτο στον αέρα, δεν μπορούσε να υποστηρίξει την καύση από μόνο του. Το (1671), ο Βρετανός επιστήμονας Ρόμπερτ Μπόιλ (Robert Boyle) περιέγραψε τον σχηματισμό φυσαλίδων αερίου από την αντίδραση ρινισμάτων σιδήρου με οξύ, αλλά ήταν ο Χένρι Κάβεντις (Henry Cavendish) που αναγνώρισε το ( $H_2$ ) (το οποίο ανέφερε ως «εύφλεκτος αέρας») ως μια ουσία διαφορετική από άλλα αέρια, το οποίο, όταν

## 2.2 Χημικά

Το αέριο υδρογόνο ( $H_2$ ) είναι πολύ εύφλεκτο και καίγεται στον αέρα σε πολύ μεγάλο εύρος συγκεντρώσεων μεταξύ (4) τοις εκατό και (75) τοις εκατό κατ' όγκο. Η ενθαλπία της καύσης για το υδρογόνο είναι (-286) kJ/mol και περιγράφεται από την εξίσωση:



Το αέριο υδρογόνο μπορεί επίσης να εκραγεί σε ένα μείγμα χλωρίου (από 5 έως 95 τοις εκατό). Αυτά τα μείγματα μπορούν να εκραγούν ως απόκριση σε σπινθήρα, θερμότητα ή ακόμα και ηλιακό φως. Η θερμοκρασία αυτανάφλεξης υδρογόνου (η θερμοκρασία στην οποία θα συμβεί αυθόρμητη καύση) είναι οι (500) °C. Οι καθαρές φλόγες υδρογόνου-οξυγόνου εκπέμπουν υπεριώδες φως και είναι αόρατες με γυμνό μάτι. Ως εκ τούτου, η ανίχνευση μιας ενεργής διαρροής υδρογόνου είναι επικίνδυνη και απαιτεί ανιχνευτή φλόγας. Επειδή το υδρογόνο είναι πλεούμενο στον αέρα, οι φλόγες του υδρογόνου ανεβαίνουν γρήγορα και προκαλούν λιγότερες ζημιές από τις πυρκαγιές υδρογονανθράκων. Το  $H_2$  αντιδρά με οξειδωτικά στοιχεία, τα οποία με τη σειρά τους αντιδρούν αυθόρμητα και βίαια με χλώριο και φθόριο για να σχηματίσουν τα αντίστοιχα υδραλογονίδια.

Επιπλέον, το  $H_2$  σχηματίζει ενώσεις με τα περισσότερα στοιχεία παρά τη αστάθεια του. Όταν συμμετέχει σε αντιδράσεις, το υδρογόνο μπορεί να έχει μερικό θετικό φορτίο όταν αντιδρά με περισσότερα ηλεκτροαρνητικά στοιχεία όπως τα αλογόνα ή το οξυγόνο, αλλά μπορεί να έχει μερικό αρνητικό φορτίο όταν αντιδρά με πιο ηλεκτροθετικά στοιχεία, όπως τα αλκαλικά μέταλλα. Όταν το υδρογόνο συνδέεται με φθόριο, οξυγόνο ή άζωτο, μπορεί να συμμετέχει σε μια μορφή μη ομοιοπολικού (διαμοριακού) δεσμού μέσης ισχύος που ονομάζεται δεσμός υδρογόνου, ο οποίος είναι κρίσιμος για τη σταθερότητα πολλών βιολογικών μορίων. Οι ενώσεις που έχουν δεσμούς υδρογόνου με μέταλλα και μεταλλοειδή είναι γνωστές ως υδρίδια. Με την οξείδωση του υδρογόνου αφαιρείται το ηλεκτρόνιο του και αποδίδεται το ιόν ( $H^+$ ). Συνήθως, το ( $H^+$ ) σε υδατικά διαλύματα αναφέρεται ως ιόν υδρονίου ( $H_3O^+$ ). Αυτό το είδος είναι απαραίτητο στη χημεία οξέος-βάσης. [4]

## 2.3 Φυσικά

Το υδρογόνο έχει ένα πρωτόνιο και ένα ηλεκτρόνιο. Το πιο κοινό ισότοπο, το πρώτιο ( $^1H$ ), δεν έχει νετρόνια. Το υδρογόνο έχει σημείο τήξης (-259,14) °C και σημείο βρασμού (-252,87) °C. Ακόμη, το υδρογόνο έχει πυκνότητα (0,08988) g/L, καθιστώντας το αραιότερο από τον αέρα. Έχει δύο διακριτές καταστάσεις οξείδωσης, (+1, -1), που το καθιστούν ικανό να δρα τόσο ως οξειδωτικό όσο και ως αναγωγικό παράγοντα. Η ομοιοπολική ακτίνα του είναι (31,5) pm.

Το υδρογόνο υπάρχει φυσικά ως τρία ισότοπα, που δηλώνονται ( $^1\text{H}$ ), ( $^2\text{H}$ ) και ( $^3\text{H}$ ). Άλλοι εξαιρετικά ασταθείς πυρήνες ( $^4\text{H}$  έως  $^7\text{H}$ ) έχουν παραχθεί σε εργαστηριακές συνθήκες, αλλά δεν υπάρχουν στη φύση. Το ( $^1\text{H}$ ) είναι το πιο κοινό ισότοπο υδρογόνου με αφθονία μεγαλύτερη από (99,98) % και ονομάζεται πρώτιο. Ο πυρήνας αυτού του ισότοπου αποτελείται από ένα μόνο πρωτόνιο (ατομικός αριθμός = αριθμός μάζας = 1) και η μάζα του είναι (1,007825) amu. Το ( $^2\text{H}$ ) (D) είναι γνωστό ως δευτέριο ή βαρύ υδρογόνο και περιέχει ένα ηλεκτρόνιο, ένα πρωτόνιο και ένα νετρόνιο (αριθμός μάζας = 2) και αντιπροσωπεύει περίπου το (0,0156) % του συνόλου του υδρογόνου που βρίσκεται στη γη. Το δευτέριο και οι ενώσεις του χρησιμοποιούνται ως μη ραδιενεργές ετικέτες σε χημικά πειράματα και σε διαλύτες για φασματοσκοπία ( $^1\text{H-NMR}$ ). Το ( $^3\text{H}$ ) είναι γνωστό ως τρίτιο και περιέχει ένα πρωτόνιο, δύο νετρόνια και ένα ηλεκτρόνιο (αριθμός μάζας = 3). Το φυσικά παραγόμενο τρίτιο είναι εξαιρετικά σπάνιο στη Γη, με τον σχηματισμό ιχνών να συμβαίνει λόγω της αλληλεπίδρασης της ατμόσφαιρας με τις κοσμικές ακτίνες. Είναι ραδιενεργό και διασπάται σε ήλιο-3 μέσω της διάσπασης βήτα με χρόνο ημιζωής (12,32) χρόνια. [6]

Παρακάτω βλέπουμε μια σύγκριση των τριών ισωτόπων που εμφανίζονται στην φύση: [7]

Ιδιότητα	Πρώτιο	Δευτέριο	Τρίτιο
<b>Ατομικό Υδρογόνο</b>			
Σύμβολο	H	D	T
Ατομική Μάζα (amu)	1.008	2.014	3.016
Ποσότητα από ηλεκτρόνια / πρωτόνια / νετρόνια	1 / 1 / 0	01/01/01	01/01/02
Πυρηνική Σταθερότητα	Σταθερό	Σταθερό	Ραδιενεργό
Μοριακό Υδρογόνο	H <sub>2</sub>	D <sub>2</sub>	T <sub>2</sub>
Αφθονία (%)	99.985	0.015	Ίχνη (~10 <sup>-16</sup> )
Μοριακό Βάρος (amu)	2.016	4.028	6.032
Σημείο Τήξης (°C)	-259.19	-254.42	-252.53
Σημείο Βρασμού (°C)	-252.85	-249.48	-248.11
Διαπυρηνική απόσταση (pm)	74.14	74.14	74.14
Κρίσιμη Θερμοκρασία (°C)	-239.96	-234.80	-232.55
Ενέργεια διάστασης δεσμού (kJ/mol)	435.9	443.40	446.9

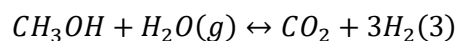
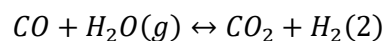
## 2.4 Μέθοδοι παραγωγής υδρογόνου

Το υδρογόνο μπορεί να παραχθεί από διάφορες πηγές. Μπορεί να παραχθεί τόσο από μη ανανεώσιμες πηγές ενέργειας όπως το φυσικό αέριο, ο άνθρακας, το πετρέλαιο και πυρηνική ενέργεια καθώς και από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας όπως αιολική, ηλιακή, υδροηλεκτρική, γεωθερμική, φύκια και αλκοόλες βιομάζας.



### 2.4.1 Παραγωγή υδρογόνου από αναμόρφωση ατμών (Steam Reforming)

Η αναμόρφωση με ατμό (steam reforming) είναι σήμερα μια από τις πιο διαδεδομένες και ταυτόχρονα φθηνότερες διαδικασίες για την παραγωγή υδρογόνου. Το πλεονέκτημά του προκύπτει από την υψηλή απόδοση της λειτουργίας του και το χαμηλό κόστος λειτουργίας και παραγωγής. Οι πιο συχνά χρησιμοποιούμενες πρώτες ύλες είναι το φυσικό αέριο και οι ελαφρύτεροι υδρογονάνθρακες, η μεθανόλη και άλλοι οξυγονωμένοι υδρογονάνθρακες. Το δίκτυο αντιδράσεων αναμόρφωσης για υδρογονάνθρακες και μεθανόλη που χρησιμοποιούνται ως πρώτη ύλη είναι το ακόλουθο:



Όλη η διαδικασία αποτελείται από δύο στάδια. Στο πρώτο στάδιο, η πρώτη ύλη υδρογονανθράκων αναμιγνύεται με ατμό και τροφοδοτείται σε έναν σωληνωτό καταλυτικό αντιδραστήρα. Κατά τη διάρκεια αυτής της διαδικασίας, παράγεται αέριο σύνθεσης (αέριο μείγμα  $H_2/CO$ ) με χαμηλότερη περιεκτικότητα σε ( $CO_2$ ). Η απαιτούμενη θερμοκρασία αντίδρασης επιτυγχάνεται με την προσθήκη οξυγόνου ή αέρα για την καύση μέρους της πρώτης ύλης (αέριο θέρμανσης)



Εικόνα 7: Αντιδραστήρας αναμόρφωσης ατμών

μέσα στον αντιδραστήρα. Στο δεύτερο στάδιο, το ψυχθέν αέριο προϊόν τροφοδοτείται στον καταλυτικό μετατροπέα ( $CO$ ), όπου το μονοξείδιο του άνθρακα μετατρέπεται σε μεγάλο βαθμό μέσω ατμού σε διοξείδιο του άνθρακα και υδρογόνο. Η καταλυτική διαδικασία αναμόρφωσης με ατμό απαιτεί μια πρώτη ύλη απαλλαγμένη από ενώσεις που περιέχουν θείο προκειμένου να αποφευχθεί η απενεργοποίηση του χρησιμοποιούμενου καταλύτη.

Η διαδικασία αυτή απαιτεί μέτριες θερμοκρασίες, για παράδειγμα, ( $180$ ) $^{\circ}C$  για την μεθανόλη και οξυγονωμένους υδρογονάνθρακες και περισσότερους από ( $500$ ) $^{\circ}C$  για το μεγαλύτερο ποσοστό των συμβατικών υδρογονανθράκων. Οι καταλύτες που χρησιμοποιούνται μπορούν να χωριστούν σε δύο τύπους:

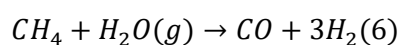
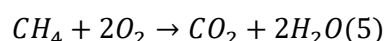
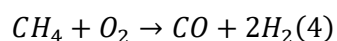
- Μη πολύτιμα μέταλλα (συνήθως νικέλιο)
- Πολύτιμα μέταλλα από στοιχεία της Ομάδας (VIII) (συνήθως πλατίνα ή ρόδιο).

Λόγω των σοβαρών περιορισμών μεταφοράς μάζας και θερμότητας, οι συμβατικοί αναμορφωτές ατμού περιορίζονται από τον παράγοντα αποτελεσματικότητας των σφαιροποιημένων καταλυτών, ο οποίος είναι συνήθως μικρότερος από (5)% . Ως εκ τούτου, η κινητική είναι σπάνια ο περιοριστικός παράγοντας με τους συμβατικούς αντιδραστήρες αναμόρφωσης ατμού με αποτέλεσμα να χρησιμοποιούνται φθηνότεροι καταλύτες νικελίου στις βιομηχανίες.

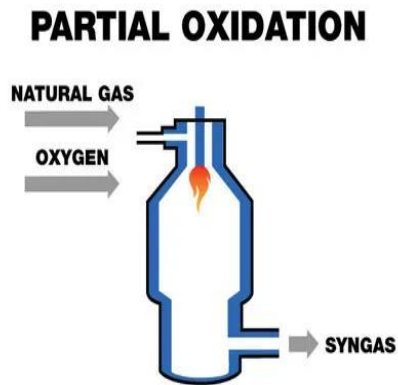
Ένας σημαντικός παράγοντας που χαρακτηρίζει τη διαδικασία της αναμόρφωσης ατμών είναι η αναλογία ατόμων (H : C) στο υλικό πρώτης ύλης. Όσο υψηλότερη είναι αυτή η αναλογία τόσο μικρότερη είναι η εκπομπή διοξειδίου του άνθρακα. Ένας αντιδραστήρας μεμβράνης μπορεί να αντικαταστήσει και τους δύο αντιδραστήρες σε μια συμβατική διαδικασία για την επίτευξη της συνολικής αντίδρασης. Η θερμική απόδοση της παραγωγής υδρογόνου από την διεργασία μεθανίου σε βιομηχανική κλίμακα είναι περίπου (70-85) %. Μια σειρά άλλων πρώτων υλών είναι επίσης δυνατή για να επιτευχθεί αυτή η αποτελεσματικότητα στο εγγύς μέλλον, όπως στερεά κοινόχρηστα απόβλητα, απόβλητα από τη βιομηχανία τροφίμων, έλαια, σκόπιμα καλλιεργούμενη ή απόβλητη γεωργική βιομάζα και καύσιμα ορυκτής προέλευσης όπως ο άνθρακας. Το μειονέκτημα αυτής της μεθόδου ωστόσο είναι η υψηλή παραγωγή διοξειδίου του άνθρακα (CO<sub>2</sub>), που κυμαίνεται περίπου στα (7,05) kg CO<sub>2</sub>/kg H<sub>2</sub>. [8]

#### **2.4.2 Παραγωγή υδρογόνου από μερική οξείδωση υδρογονανθράκων (Partial Oxidation)**

Η μερική οξείδωση (POX) και η καταλυτική μερική οξείδωση (CPOX) των υδρογονανθράκων έχουν προταθεί στην παραγωγή υδρογόνου για κυψέλες καυσίμου αυτοκινήτων και σε ορισμένες άλλες εμπορικές εφαρμογές. Η αεριοποιημένη πρώτη ύλη μπορεί να είναι μεθάνιο και βιοαέριο, αλλά κυρίως κλάσματα βαρέως πετρελαίου (π.χ. υπολείμματα κενού, πετρέλαιο θέρμανσης), των οποίων η περαιτέρω επεξεργασία και χρήση είναι δύσκολη. Η μερική οξείδωση είναι μια μη καταλυτική διαδικασία, κατά την οποία η πρώτη ύλη αεριοποιείται, με την παρουσία οξυγόνου και πιθανώς ατμού (ATR) σε θερμοκρασίες στην περιοχή (1300–1500)°C και πιέσεις στο εύρος (3 έως 8) MPa. Σε σύγκριση με την αναμόρφωση με ατμό (H<sub>2</sub> : CO = 3 : 1), παράγεται περισσότερο (CO) (H<sub>2</sub> : CO = 1 : 1 ή 2 : 1). Η διαδικασία επομένως συμπληρώνεται από τη μετατροπή του (CO) με ατμό σε (H<sub>2</sub>) και (CO<sub>2</sub>). Αυτή η αντίδραση συμβάλλει στη διατήρηση της ισορροπίας μεταξύ των μεμονωμένων προϊόντων αντίδρασης.



Το αέριο μίγμα που σχηματίζεται μέσω της διαδικασίας της μερικής οξειδωσης περιέχει μονοξείδιο του άνθρακα (CO), διοξείδιο του άνθρακα (CO<sub>2</sub>), νερό (H<sub>2</sub>O), μοριακό υδρογόνο (H<sub>2</sub>), μεθάνιο (CH<sub>4</sub>), υδρόθειο (H<sub>2</sub>S) και οξυσουλφίδιο του άνθρακα (COS). Ένα μέρος του αερίου καίγεται για να παρέχει την απαραίτητη θερμότητα για τις ενδόθερμες διεργασίες. Η αιθάλη που δημιουργείται από την αποσύνθεση του ακετυλενίου ως ενδιάμεσου προϊόντος είναι ένα ανεπιθύμητο προϊόν. Η ποσότητα του εξαρτάται από την αναλογία υδρογόνου/άνθρακα (H : C) στην αρχική πρώτη ύλη καυσίμου. Υπήρξε επομένως, όπως και με την αναμόρφωση ατμών, μια προσπάθεια αλλαγής σε πρώτες ύλες που περιέχουν υψηλότερη αναλογία (H : C), για παράδειγμα, προς το φυσικό αέριο. Ενώ η λειτουργία του αντιδραστήρα είναι λιγότερο δαπανηρή σε σύγκριση με την αναμόρφωση με ατμό, η επακόλουθη μετατροπή καθιστά αυτή την τεχνολογία πιο ακριβότερη. Δεδομένου ότι η διαδικασία δεν απαιτεί τη χρήση καταλύτη, δεν είναι απαραίτητο να αφαιρεθούν τα θειούχα στοιχεία από το φυσικό αέριο, γεγονός που μειώνει την απόδοση του καταλύτη. Οι θειούχες ενώσεις που περιέχονται στην αεριοποιημένη πρώτη ύλη μετατρέπονται σε υδρόθειο (περίπου 95%) και σε οξυσουλφίδιο του άνθρακα (περίπου 5%).

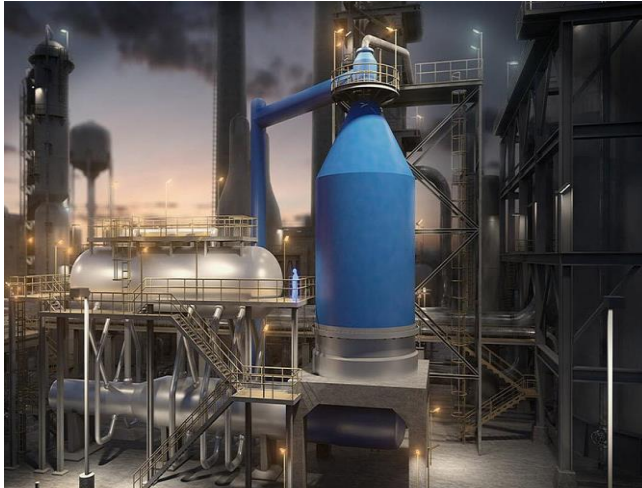


Εικόνα 8: Διαδικασία παραγωγής στον αντιδραστήρα μερικής οξειδωσης

Στο σύστημα μερικής οξειδωσης, μπορούν να προστεθούν καταλύτες (CPOX) προκειμένου να μειωθεί η θερμοκρασία λειτουργίας στους περίπου (700–1000)°C. Ωστόσο, ο έλεγχος της θερμοκρασίας αποδεικνύεται δύσκολος λόγω του σχηματισμού θερμών κηλίδων, λόγω της εξώθερμης φύσης των αντιδράσεων. Για τη μετατροπή φυσικού αερίου, οι καταλύτες βασίζονται τυπικά σε νικέλιο (Ni) ή ρόδιο (Rh). Ωστόσο, το νικέλιο έχει ισχυρή τάση για σχηματισμό θερμικών κηλίδων και το κόστος του ρόδιου (Rh) έχει αυξηθεί σημαντικά. Όμως, οι υψηλές θερμοκρασίες λειτουργίας (>800°C) και τα ζητήματα για την ασφάλεια ενδέχεται να κάνουν δύσκολη τη χρήση τους για πρακτικές και συμπαγείς φορητές συσκευές λόγω της θερμικής διαχείρισης. Συνήθως, η θερμική απόδοση των αντιδραστήρων (POX) με μεθάνιο ως καύσιμο κυμαίνεται από (60-75)%. [8]

#### 2.4.3 Παραγωγή υδρογόνου από αυτοθερμική αναμόρφωση

Στην αυτοθερμική αναμόρφωση (ATR), προστίθεται ατμός στη διαδικασία καταλυτικής μερικής οξειδωσης. Το (ATR) είναι ένας συνδυασμός αντιδράσεων αναμόρφωσης ατμού (ενδόθερμη) και μερικής οξειδωσης (εξώθερμη). Το (ATR) έχει τα πλεονεκτήματα ότι δεν απαιτεί εξωτερική θερμότητα και είναι απλούστερο και



**Εικόνα 9: Αυτοθερμικός αντιδραστήρας**

ενδόθερμη διαδικασία και επομένως απαιτητική ενέργεια. Αυτή η ενέργεια πρέπει να μεταφερθεί στο σύστημα από το εξωτερικό.

Ένα άλλο σημαντικό πλεονέκτημα του (ATR) έναντι της διαδικασίας (SR) είναι, ότι μπορεί να τερματιστεί και να ξεκινήσει πολύ γρήγορα, ενώ παράγει μεγαλύτερη ποσότητα υδρογόνου από το (POX) μόνο του. Υπάρχουν κάποιες προσδοκίες ότι αυτή η διαδικασία θα γίνει ελκυστική για τη βιομηχανία καυσίμων «Gas to Liquid» λόγω της ευνοϊκής σύνθεσης αερίου για τη σύνθεση (Fischer-Tropsch), της σχετικής συμπαγούς (ATR), του χαμηλότερου κόστους κεφαλαίου και των δυνατοτήτων για οικονομίες κλίμακας. Για την αναμόρφωση μεθανίου, η θερμική απόδοση είναι συγκρίσιμη με αυτή του (POX) (περίπου 60–75%) και ελαφρώς μικρότερη από εκείνη της αναμόρφωσης με ατμό. Η βενζίνη και άλλοι ανώτεροι υδρογονάνθρακες μπορούν να μετατραπούν σε υδρογόνο επί του αυτοκινήτου για χρήση σε αυτό με την αυτοθερμική διαδικασία, χρησιμοποιώντας κατάλληλους καταλύτες. [8]

#### **2.4.4 Παραγωγή υδρογόνου από αποθείωση καυσίμων**

Όπως αναλύθηκε προηγουμένως, η τρέχουσα παραγωγή υδρογόνου προέρχεται κυρίως από την επεξεργασία φυσικού αερίου, αν και με τις σημαντικές προόδους στις κυψέλες καυσίμου, δίνεται αυξημένη προσοχή σε άλλα καύσιμα, όπως η μεθανόλη, το προπάνιο, η βενζίνη και καύσιμα εφοδιαστικής, όπως π.χ. (jet-A, ντίζελ και JP8). Με την εξαίρεση τη μεθανόλη, όλα αυτά τα καύσιμα περιέχουν κάποια ποσότητα θείου, με τις συγκεκριμένες ενώσεις που περιέχουν θείο να εξαρτώνται από τον τύπο και την πηγή του καυσίμου. Για το λόγο αυτό, η αποθείωση θεωρείται ως ένα πολύ σημαντικό βήμα στις τεχνολογίες επεξεργασίας καυσίμων.

Οι διαδικασίες αποθείωσης μπορούν να ταξινομηθούν με βάση τη φύση της βασικής φυσικοχημικής διεργασίας που χρησιμοποιείται για την απομάκρυνση του θείου (Εικόνα 3). Οι πιο ανεπτυγμένες και εμπορευματοποιημένες τεχνολογίες είναι αυτές που μετατρέπουν καταλυτικά οργανοθειϊκές ενώσεις με αποβολή θείου. Τέτοιες τεχνολογίες καταλυτικής μετατροπής περιλαμβάνουν συμβατική υδροαποθείωση (HDS), υδρογονοκατεργασία με προηγμένους καταλύτες και/ή σχέδια αντιδραστήρων

και συνδυασμό υδροκατεργασίας με ορισμένες πρόσθετες χημικές διεργασίες για τη διατήρηση των προδιαγραφών καυσίμου. Το κύριο χαρακτηριστικό των τεχνολογιών του δεύτερου τύπου είναι η εφαρμογή φυσικοχημικών διεργασιών διαφορετικής φύσης από το καταλυτικό (HDS) για τον διαχωρισμό και/ή τον μετασχηματισμό οργανοθειικών ενώσεων από ρεύματα διυλιστηρίου. Τέτοιες τεχνολογίες περιλαμβάνουν, ως βασικό βήμα, την απόσταξη, την αλκυλίωση, την οξειδωση, την εκχύλιση, την προσρόφηση ή συνδυασμό αυτών. [8]

#### 2.4.5 Παραγωγή υδρογόνου από αναμόρφωση πλάσματος (plasma)

Στην περίπτωση της αναμόρφωσης πλάσματος, το δίκτυο των αντιδράσεων αναμόρφωσης είναι το ίδιο με αυτό στη συμβατική αναμόρφωση. Ωστόσο, η ενέργεια και οι ελεύθερες ρίζες που χρησιμοποιούνται για την αντίδραση αναμόρφωσης παρέχονται από το πλάσμα που παράγεται συνήθως με ηλεκτρισμό ή θερμότητα. Όταν εγγέεται νερό ή ατμός με το καύσιμο, σχηματίζονται ρίζες (H•), (OH•) και (O•) εκτός από τα ηλεκτρόνια, δημιουργώντας έτσι συνθήκες για να συμβούν αναγωγικές και οξειδωτικές αντιδράσεις. Οι τεχνολογίες αναμόρφωσης πλάσματος έχουν αναπτυχθεί για να διευκολύνουν την αναμόρφωση (POX), (ATR) και ατμού, με την πλειοψηφία των αντιδραστήρων να είναι (POX) και (ATR). Υπάρχουν ουσιαστικά δύο κύριες κατηγορίες αναμόρφωσης του πλάσματος, δηλαδή η θερμική και η μη θερμική.

Οι συσκευές πλάσματος που αναφέρονται ως (**plasmotrons**) μπορούν να δημιουργήσουν πολύ υψηλές θερμοκρασίες (περίπου >2000°C) με υψηλό βαθμό ελέγχου χρησιμοποιώντας ηλεκτρική ενέργεια. Η θερμότητα που παράγεται είναι ανεξάρτητη από τη χημεία της αντίδρασης και οι βέλτιστες συνθήκες λειτουργίας μπορούν να διατηρηθούν σε ένα ευρύ φάσμα ρυθμών τροφοδοσίας και συνθέσεων αερίου. Η πυκνότητα του αναμορφωτή πλάσματος διασφαλίζεται από την υψηλή ενεργειακή πυκνότητα που σχετίζεται με το ίδιο το πλάσμα και από τους μειωμένους χρόνους αντίδρασης, με αποτέλεσμα σύντομους χρόνους παραμονής. Ρεύματα αερίων πλούσια σε υδρογόνο μπορούν να παραχθούν αποτελεσματικά σε αναμορφωτές πλάσματος από μια ποικιλία καυσίμων υδρογονανθράκων (π.χ. Η τεχνολογία αναμόρφωσης πλάσματος έχει πιθανά πλεονεκτήματα σε σχέση με τις συμβατικές τεχνολογίες παραγωγής υδρογόνου. Οι συνθήκες πλάσματος (π.χ. υψηλές θερμοκρασίες, υψηλός βαθμός διάστασης και ουσιαστικός βαθμός ιοντισμού) μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την επιτάχυνση θερμοδυναμικά ευνοϊκών χημικών αντιδράσεων χωρίς καταλύτη ή για την παροχή της ενέργειας που απαιτείται για την πραγματοποίηση διεργασιών ενδόθερμης αναμόρφωσης. Οι αναμορφωτές πλάσματος μπορούν να προσφέρουν μια σειρά από πλεονεκτήματα, συγκεκριμένα:

- Είναι συμπαγή και έχουν χαμηλό βάρος
- Υψηλή πυκνότητα ισχύος
- Υψηλή απόδοση μετατροπής
- Ελάχιστο κόστος
- Χρήση απλών μεταλλικών ηλεκτροδίων ή άνθρακα και απλά τροφοδοτικά
- Γρήγορο χρόνο απόκρισης (κλάσματα του δευτερολέπτου)
- Λειτουργία με ένα ευρύ φάσμα καυσίμων, συμπεριλαμβανομένων των βαρέων υδρογονανθράκων (ακατέργαστο) και των «βρώμικων» υδρογονανθράκων (ντίζελ υψηλής περιεκτικότητας σε θείο).

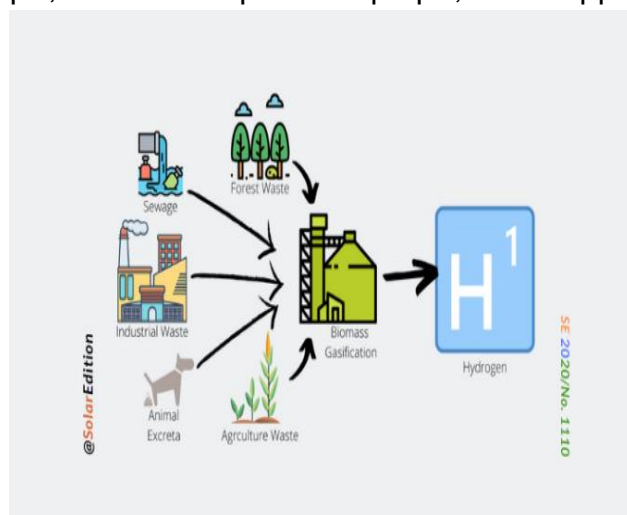
Αυτή η τεχνολογία θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή υδρογόνου για μια ποικιλία σταθερών εφαρμογών, όπως η καταμεμημένη και χαμηλής ρύπανσης παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας για κυψέλες καυσίμου. Θα μπορούσε επίσης να χρησιμοποιηθεί για κινητές εφαρμογές (π.χ. ενσωματωμένη παραγωγή υδρογόνου για οχήματα με κυψέλες καυσίμου) και για εφαρμογές ανεφοδιασμού (π.χ. σταθερές πηγές υδρογόνου για οχήματα).

Τα μόνα μειονεκτήματα της αναμόρφωσης πλάσματος είναι η εξάρτηση από την ηλεκτρική ενέργεια και η δυσκολία λειτουργίας της σε υψηλή πίεση (απαιτείται για διαδικασίες υψηλής πίεσης, όπως η παραγωγή αμμωνίας). Η υψηλή πίεση, αν και είναι εφικτή, αυξάνει τη διάβρωση των ηλεκτροδίων λόγω της μειωμένης κινητικότητας του ηλεκτρικού τόξου και ως εκ τούτου, μειώνει τη διάρκεια ζωής του ηλεκτροδίου. [8]

#### 2.4.6 Παραγωγή υδρογόνου από την αεριοποίηση βιομάζας

Βραχυπρόθεσμα, η βιομάζα αναμένεται να γίνει το πιο πιθανό ανανεώσιμο οργανικό υποκατάστατο του πετρελαίου. Η βιομάζα είναι διαθέσιμη από ένα ευρύ φάσμα πηγών, όπως ζωικά απόβλητα, αστικά στερεά απόβλητα, υπολείμματα καλλιεργειών, ξυλώδεις καλλιέργειες βραχείας αμειψισποράς, γεωργικά απόβλητα, πριονίδια, υδρόβια φυτά, ποώδη είδη βραχείας αμειψισποράς (π.χ. χλόη αλλαγής), απορρίμματα χαρτιού, καλαμπόκι και πολλά άλλα.

Η τεχνολογία αεριοποίησης που χρησιμοποιείται συνήθως με τη βιομάζα και τον άνθρακα ως πρώτη ύλη καυσίμου είναι πολύ ώριμη και χρησιμοποιείται εμπορικά σε πολλές διεργασίες. Είναι μια παραλλαγή της πυρόλυσης και, ως εκ τούτου, βασίζεται στη μερική οξειδωση του υλικού πρώτης ύλης σε ένα μείγμα υδρογόνου, μεθανίου, ανώτερων υδρογονανθράκων, μονοξειδίου του άνθρακα, διοξειδίου του άνθρακα και αζώτου, γνωστό ως «αέριο παραγωγής». Η διαδικασία αεριοποίησης



Εικόνα 10: Τρόποι παραγωγής από βιομάζα

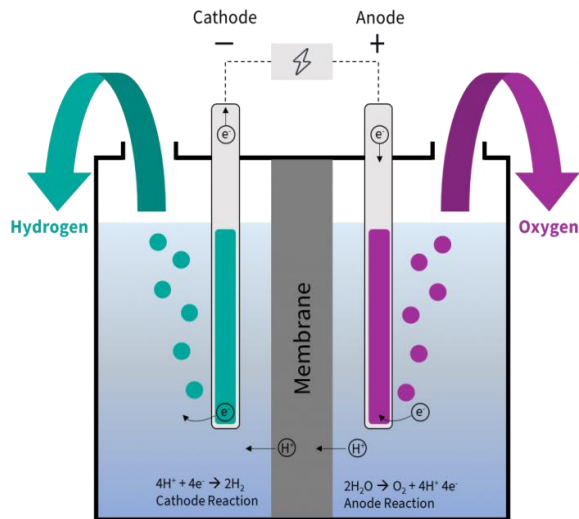
τυπικά πάσχει από χαμηλή θερμική απόδοση αφού η υγρασία που περιέχεται στη βιομάζα πρέπει επίσης να εξατμιστεί. Μπορεί να εκτελεστεί με ή χωρίς καταλύτη και σε αντιδραστήρα σταθερής ή ρευστοποιημένης κλίνης, με τον τελευταίο αντιδραστήρα να έχει συνήθως καλύτερη απόδοση. Η προσθήκη ατμού ή/και οξυγόνου στη διαδικασία αεριοποίησης έχει ως αποτέλεσμα την παραγωγή «αερίου σύνθεσης» με αναλογία  $H_2/CO$  2/1, όπου το συνθετικό αέριο χρησιμοποιείται ως πρώτη ύλη σε έναν αντιδραστήρα Fischer-Tropsch για την παραγωγή υψηλότερων υδρογονανθράκων (συνθετική βενζίνη και ντίζελ) ή σε αντιδραστήρα WGS για παραγωγή υδρογόνου. Για την αναμόρφωση της ξηρής βιομάζας χρησιμοποιείται υπέρθερμος ατμός σε θερμοκρασία  $900^\circ C$  για να επιτευχθεί μεγαλύτερη απόδοση υδρογόνου.

Ωστόσο, η διαδικασία αεριοποίησης παρέχει σημαντικές ποσότητες «πίσσας» (ένα πολύπλοκο μείγμα ανώτερων αρωματικών υδρογονανθράκων) στο αέριο προϊόν που λειτουργεί ακόμη και στην περιοχή  $800-1000^\circ C$ . Ένας δευτερεύων αντιδραστήρας, ο οποίος χρησιμοποιεί πυρωμένο καταλύτη, δολομίτη ή/και νικέλιο, χρησιμοποιείται για τον καταλυτικό καθαρισμό και την αναβάθμιση του αερίου προϊόντος. Στην ιδανική περίπτωση, θα πρέπει να χρησιμοποιείται οξυγόνο σε αυτές τις εγκαταστάσεις αεριοποίησης. Όμως, η μονάδα διαχωρισμού οξυγόνου απαγορεύεται σε εγκαταστάσεις μικρής κλίμακας. Αυτό περιορίζει τους αεριοποιητές στη χρήση αέρα με αποτέλεσμα τη σημαντική αραίωση του προϊόντος καθώς και την παραγωγή  $NO_x$ . Για αυτήν την τεχνολογία απαιτούνται χαμηλού κόστους, αποδοτικοί διαχωριστές οξυγόνου. Μια διαδικασία μετατροπής μονοξειδίου του άνθρακα ( $CO$ ) και εξατμισμένου νερού σε διοξείδιο του άνθρακα ( $CO_2$ ) και υδρογόνο (Water-Gas Shift, WGS) μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την αύξηση της συγκέντρωσης του υδρογόνου που ακολουθείται από μια διαδικασία διαχωρισμού για την παραγωγή καθαρού υδρογόνου. Συνήθως, οι αντιδραστήρες αεριοποίησης κατασκευάζονται σε μεγάλη κλίμακα και απαιτούν τεράστιες ποσότητες υλικού για συνεχή τροφοδοσία. Μπορούν να επιτύχουν αποδόσεις της τάξης του 35-50% με βάση τη χαμηλότερη τιμή θέρμανσης.

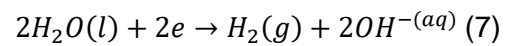
Ένα από τα προβλήματα αυτής της τεχνολογίας είναι ότι πρέπει να χρησιμοποιηθεί ένας τεράστιος όγκος πόρων για τη συγκέντρωση των μεγάλων ποσοτήτων βιομάζας στην κεντρική μονάδα επεξεργασίας. Επί του παρόντος, το υψηλό κόστος εφοδιασμού των μονάδων αεριοποίησης και η αφαίρεση της πίσσας σε αποδεκτά επίπεδα για την παραγωγή καθαρού υδρογόνου περιορίζουν την εμπορευματοποίηση της παραγωγής υδρογόνου με βάση τη βιομάζα. Μπορεί να απαιτηθεί μελλοντική ανάπτυξη μικρότερων αποδοτικών σταθμών διανομής αεριοποίησης για αυτήν την τεχνολογία για οικονομικότερη και αποδοτική παραγωγή υδρογόνου. [8]

## 2.4.7 Παραγωγή υδρογόνου με ηλεκτρόλυση

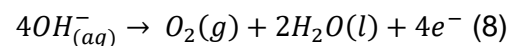
Μια πολλά υποσχόμενη μέθοδος για την παραγωγή υδρογόνου στο κοντινό μέλλον θα μπορούσε να είναι η ηλεκτρόλυση νερού με την χρήση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Η ηλεκτρόλυση του νερού ή η διάσπασή του σε υδρογόνο και οξυγόνο είναι μια πολύ γνωστή μέθοδος που άρχισε να χρησιμοποιείται εμπορικά ήδη από το 1890. Η ηλεκτρόλυση είναι μια διαδικασία κατά την οποία ένα συνεχές ρεύμα που διέρχεται από δύο ηλεκτρόδια σε ένα υδατινό διάλυμα έχει ως αποτέλεσμα τη διάσπαση των χημικών δεσμών που υπάρχουν στο μόριο του νερού σε υδρογόνο και οξυγόνο, όπως φαίνεται στις παρακάτω εξισώσεις:



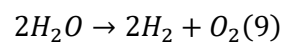
Αντίδραση καθόδου:



Αντίδραση ανόδου:



Συνολικά:



**Εικόνα 11: Κυψέλη ηλεκτρόλυσης με μεμβράνη ανταλλαγής πρωτονίων (PEM)**

Η διαδικασία της ηλεκτρόλυσης πραγματοποιείται σε θερμοκρασία δωματίου. Ένας κοινώς χρησιμοποιούμενος ηλεκτρολύτης στην ηλεκτρόλυση του νερού είναι το θειϊκό οξύ και τα ηλεκτρόδια είναι από πλατίνα (Pt), το οποίο δεν αντιδρά με το θειϊκό οξύ. Η διαδικασία είναι οικολογικά καθαρή επειδή δεν σχηματίζονται αέρια θερμοκηπίου και το παραγόμενο οξυγόνο έχει περαιτέρω βιομηχανικές εφαρμογές. Ωστόσο, σε σύγκριση με τις μεθόδους που περιγράφηκαν προηγουμένως, η ηλεκτρόλυση είναι μια τεχνολογία εξαιρετικά απαιτητικής ενέργειας.

Η ενεργειακή απόδοση της ηλεκτρόλυσης του νερού (χημική ενέργεια που αποκτάται ανά παρεχόμενη ηλεκτρική ενέργεια) στην πράξη φτάνει το 50-70%. Είναι ουσιαστικά η μετατροπή της ηλεκτρικής ενέργειας σε χημική ενέργεια με τη μορφή υδρογόνου, με χρήσιμο υποπροϊόν το οξυγόνο. [μαζί με τα άλλα από πάνω]

Η πιο κοινή τεχνολογία ηλεκτρόλυσης είναι η αλκαλική βάση (AEL), αλλά έχουν αναπτυχθεί και άλλες μέθοδοι, με μεμβράνες ανταλλαγής πρωτονίων (PEM) και κύτταρα ηλεκτρόλυσης στερεού οξειδίου (SOEC).

Η πιο ανεπτυγμένη και ευρέως χρησιμοποιούμενη τεχνολογία είναι η μέθοδος της ηλεκτρόλυσης με αλκαλική βάση (AEL). Αυτή η μέθοδος λειτουργεί με την



μεταφορά του ηλεκτρικού ρεύματος μέσω μιας καθόδου, η οποία διασπά το  $2\text{H}_2\text{O}$  σε  $\text{H}_2$  και  $2\text{OH}^-$ . Τα ανιόντα υδροξειδίου ( $2\text{OH}^-$ ) ταξιδεύουν στη συνέχεια μέσω του ηλεκτρολύτη στην άνοδο, όπου χάνει τα ηλεκτρόνια του και γίνεται  $1/2 \text{O}_2$  και  $\text{H}_2\text{O}$ . Τα ηλεκτρόνια επιστρέφουν στο θετικό τερματικό της πηγής συνεχούς ρεύματος. Τα  $\text{H}_2$  και  $\text{O}_2$  διαχωρίζονται στη συνέχεια χρησιμοποιώντας ένα διάφραγμα και αποθηκεύονται χωριστά. Το σχήμα 2.3 δείχνει μια γραφική απεικόνιση της διαδικασίας αλκαλικής ηλεκτρόλυσης.

Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιεί μια ισχυρή βάση ως ηλεκτρολύτη. Η χρήση μιας βάσης ως ηλεκτρολύτη, σε αντίθεση με ένα οξύ, επιτρέπει στα ηλεκτρόδια να υπάρχουν μη πολύτιμα μέταλλα, συχνά νικέλιο (Ni), γεγονός που μειώνει την κεφαλαιουχική δαπάνη του ηλεκτρολύτη. Η χρήση μη πολύτιμων μετάλλων συνεισφέρει περισσότερο στο φθηνότερο επενδυτικό κόστος στην τεχνολογία AEL σήμερα από άλλες τεχνολογίες ηλεκτρόλυσης. Η βάση επιτρέπει τη χρήση λιγότερο πολύτιμων μετάλλων επειδή αποφεύγει τη διάβρωση που θα προέκυπτε όταν χρησιμοποιούνται οξέα ως ηλεκτρολύτες. Εάν το σύστημα χρησιμοποιεί οξέα, θα πρέπει επίσης να χρησιμοποιηθούν πολύτιμα μέταλλα για την αποφυγή της διάβρωσης. Επίσης, η χρήση ενώσεων βάσεων μειώνει επίσης τις λειτουργικές δαπάνες, καθώς ο εξοπλισμός είναι λιγότερο εκτεθειμένος σε φθορά, επιτρέποντάς του να διαρκέσει περισσότερο.

Η διάβρωση του διαφράγματος που χρησιμοποιείται για τον διαχωρισμό  $\text{H}_2$  και  $\text{O}_2$  εξαρτάται από τη θερμοκρασία. Επομένως, η αύξηση της απόδοσης του ηλεκτρολύτη μέσω της αύξησης της θερμοκρασίας οδηγεί σε μεγαλύτερη διάβρωση, η οποία οδηγεί σε μικρότερη διάρκεια ζωής του ηλεκτρολύτη. Εξαιτίας αυτών των θεμάτων, έχει γίνει μεγάλη προσπάθεια για την έρευνα αγωγίμων πολυμερών υδροξειδίου κατάλληλων για την AEL. Πρόσφατη έρευνα διαπίστωσε ότι μια πολυμερική μεμβράνη με βάση τους υδρογονάνθρακες μπορεί να μειώσει τη φθορά. Συνολικά, τόσο τα κόστη έναρξης όσο και το λειτουργικό κόστος της μεθόδου αυτής είναι χαμηλά σε σχέση με τις ανταγωνιστικές τεχνολογίες ηλεκτρόλυσης.

Η ηλεκτρόλυση με την μεμβράνη ανταλλαγής πρωτονίων ή αλλιώς μεμβράνη πολυμερούς ηλεκτρολύτη (PEM), χρησιμοποιεί στερεές πολυσουλφονωμένες μεμβράνες ως ηλεκτρολύτες, σε σύγκριση με το υγρό διάλυμα KOH που χρησιμοποιείται στην AEL. Η τεχνολογία PEM έχει πολλά πλεονεκτήματα σε σχέση με την τεχνολογία AEL. Μερικά από αυτά τα πλεονεκτήματα είναι ο συμπαγής σχεδιασμός των συστημάτων, οι γρήγορες αλλαγές κατά την αύξηση ή μείωση του ρυθμού παραγωγής, καθαρότερο υδρογόνο, αυξημένη πίεση της εξόδου  $\text{H}_2$  και υψηλότερη ενεργειακή απόδοση, που σημαίνει ότι περισσότερο από την εισροή ενέργειας αποθηκεύεται όταν χρησιμοποιείται η PEM. Το γεγονός ότι οι ηλεκτρολύτες PEM μπορούν να αντιδράσουν γρηγορότερα στην ποσότητα ηλεκτρικής ενέργειας που εισέρχεται το καθιστά πιο εφαρμόσιμο στη βιομηχανική χρήση και μια προτιμώμενη τεχνολογία όταν η παραγωγή υδρογόνου συνδυάζεται με ανανεώσιμες πηγές ενέργειας για αποθήκευση ενέργειας σε περιόδους υψηλής παραγωγής.

Ωστόσο, η επιτυχία των ηλεκτρολυτών PEM είναι και η ρίζα των μειονεκτημάτων τους. Η αυξημένη απόδοση, η πίεση και η καθαρότητα του υδρογόνου απαιτεί πολύτιμα μέταλλα στην άνοδο και την κάθοδο, αυξάνοντας σημαντικά την κεφαλαιουχική δαπάνη της τεχνολογίας, καθιστώντας ακριβότερη την επένδυση σε PEM από την τεχνολογία AEL. Ωστόσο, έχει γίνει εκτενής έρευνα σχετικά με τη χρήση άλλων λιγότερο πολύτιμων μετάλλων που θα μπορούσαν να αντικαταστήσουν αυτά που χρησιμοποιούνται έως και σήμερα. Κάτι τέτοιο θα μπορούσε να μειώσει τις κεφαλαιουχικές δαπάνες της τεχνολογίας, διατηρώντας παράλληλα τα πλεονεκτήματα που παρουσιάζονται παραπάνω.

Η πλεονάζουσα ενέργεια από τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας μπορεί να αποθηκευτεί αποτελεσματικά με τη μορφή χημικής ενέργειας χρησιμοποιώντας τις κυψέλες ηλεκτρολύτη στερεού οξέος (SOECs). Τα SOEC είναι αναστρέψιμες κυψέλες καυσίμου στερεού οξειδίου που χρησιμοποιούν κεραμικούς ηλεκτρολύτες και αναφέρονται επίσης ως αναγεννητικές κυψέλες καυσίμου στερεού οξειδίου (R-SOFCs)

Τα SOECs μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παραγωγή υδρογόνου ( $H_2$ ), καυσίμου σύνθεσης ( $CO+H_2$ ) από το μείγμα νερού και διοξειδίου του άνθρακα και οξυγόνου από διοξείδιο του άνθρακα. Λειτουργούν σε υψηλή θερμοκρασία, συνήθως  $600^{\circ}C$  έως  $1000^{\circ}C$  για να επιτρέπουν την ηλεκτρόλυση του νερού. Η λειτουργία σε υψηλή θερμοκρασία μειώνει την ανάγκη ηλεκτρικής ενέργειας που απαιτείται για την ηλεκτρόλυση και αντ' αυτού χρησιμοποιεί θερμική ενέργεια για τη διάσπαση του νερού και του διοξειδίου του άνθρακα.

Επομένως, οι ηλεκτρολύτες SOEC είναι οι πιο αποδοτικοί ηλεκτρικά σε σχέση με τις υπόλοιπες μεθόδους που δουλεύουν κάτω από  $150^{\circ}C$ , αλλά και οι λιγότερο αναπτυγμένοι. Η τεχνολογία SOEC/SOFC έχει προκλήσεις με τη διάβρωση, την στεγανοποίηση, τον θερμικό κύκλο και τη μετανάστευση χρωμίου. Οι ηλεκτρολύτες PEM είναι πιο αποδοτικοί από τους αλκαλικούς και δεν έχουν προβλήματα όπως οι SOEC. Ωστόσο, κοστίζουν περισσότερο από τα αλκαλικά συστήματα. Έτσι, η μέθοδος με αλκαλική βάση είναι η πιο ανεπτυγμένη με χαμηλότερο κόστος κεφαλαίου και την χαμηλότερη απόδοση με αποτέλεσμα το υψηλότερο κόστος ηλεκτρικής ενέργειας που παράγει. [8], [9], [10]

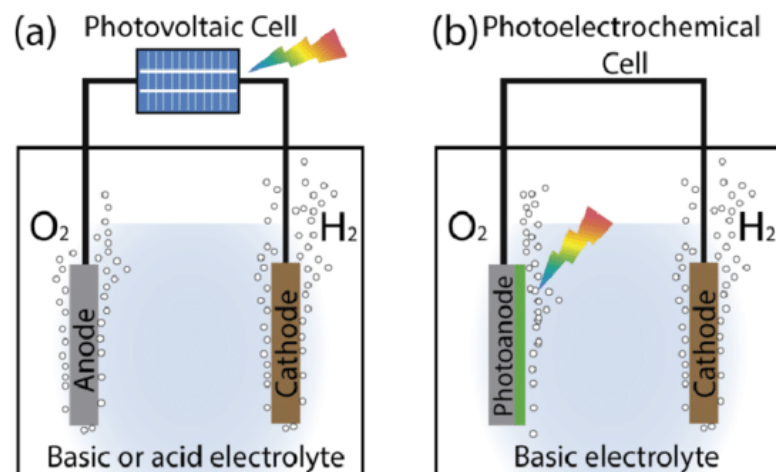
#### **2.4.8 Παραγωγή υδρογόνου με φωτοηλεκτροχημικό διαχωρισμό νερού**

Η φωτοηλεκτρόλυση είναι ένας από τους ανανεώσιμους τρόπους παραγωγής υδρογόνου, ο οποίος παρουσιάζει πολλά υποσχόμενη απόδοση και κόστος, αν και βρίσκεται ακόμη στη φάση της πειραματικής ανάπτυξης. Επί του παρόντος, είναι η λιγότερο δαπανηρή και η πιο αποτελεσματική μέθοδος παραγωγής υδρογόνου από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Το φωτοηλεκτρόδιο είναι μια ημιαγώγιμη συσκευή που απορροφά την ηλιακή ενέργεια και δημιουργεί ταυτόχρονα την απαραίτητη τάση για την άμεση αποσύνθεση του μορίου του νερού σε οξυγόνο και υδρογόνο. Η φωτοηλεκτρόλυση χρησιμοποιεί ένα φωτοηλεκτροχημικό (PEC) σύστημα συλλογής φωτός για την οδήγηση της ηλεκτρόλυσης του νερού. Εάν το φωτοηλεκτρόδιο

ημιαγωγού βυθιστεί σε έναν υδατικό ηλεκτρολύτη που εκτίθεται στην ηλιακή ακτινοβολία, θα παράγει αρκετή ηλεκτρική ενέργεια για να υποστηρίξει τις παραγόμενες αντιδράσεις υδρογόνου και οξυγόνου. Κατά την παραγωγή υδρογόνου, τα ηλεκτρόνια απελευθερώνονται στον ηλεκτρολύτη, ενώ η παραγωγή οξυγόνου απαιτεί ελεύθερα ηλεκτρόνια. Η αντίδραση εξαρτάται από τον τύπο του υλικού ημιαγωγού και από την ηλιακή ένταση, η οποία παράγει πυκνότητα ρεύματος 10–30 mA/cm<sup>2</sup>. Σε αυτές τις πυκνότητες ρεύματος, η τάση που απαιτείται για την ηλεκτρόλυση είναι περίπου 1,35 V.

Το φωτοηλεκτρόδιο αποτελείται από φωτοβολταϊκά (ημιαγωγικά), καταλυτικά και προστατευτικά στρώματα, τα οποία μπορούν να μοντελοποιηθούν ως ανεξάρτητα στοιχεία. Κάθε στρώμα επηρεάζει τη συνολική απόδοση του φωτοηλεκτροχημικού συστήματος. Το φωτοβολταϊκό στρώμα παράγεται από υλικά ημιαγωγών που απορροφούν το φως. Η απορρόφηση φωτός του υλικού ημιαγωγού είναι ευθέως ανάλογη με την απόδοση του φωτοηλεκτροδίου. Οι ημιαγωγοί με ευρείες ζώνες παρέχουν το απαραίτητο δυναμικό για τη διάσπαση του νερού.

Τα καταλυτικά στρώματα του φωτοηλεκτροχημικού στοιχείου επηρεάζουν επίσης την απόδοση της ηλεκτρόλυσης και απαιτούν κατάλληλους καταλύτες για τη διάσπαση του νερού. Το έγκλειστο στρώμα είναι ένα άλλο σημαντικό συστατικό του φωτοηλεκτροδίου που εμποδίζει τον ημιαγωγό να διαβρωθεί μέσα στον υδατικό ηλεκτρολύτη. Αυτό το στρώμα πρέπει να είναι εξαιρετικά διαφανές για να μπορεί να παρέχει τη μέγιστη ηλιακή ενέργεια, ώστε να μπορεί να φτάσει στο στρώμα ημιαγωγών φωτοβολταϊκών. [8]



Εικόνα 12: Ηλιακές κυψέλες ηλεκτροχημικής διάσπασης νερού α) φωτοβολταϊκή κυψέλη ηλεκτρόλυσης β) φωτοηλεκτροχημική κυψέλη διάσπασης νερού

## 2.5 Τρόποι αποθήκευσης υδρογόνου

Η αποθήκευση υδρογόνου παραμένει ένα από τα πιο απαιτητικά τεχνολογικά εμπόδια για την πρόοδο των τεχνολογιών κυψελών καυσίμου υδρογόνου για εφαρμογή στην κίνηση οχημάτων. Δεδομένου ότι το υδρογόνο είναι αέριο σε κανονικές συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας (SPT), έχει χαμηλή ογκομετρική πυκνότητα. Αν και ένα κιλό  $H_2$  μπορεί να αντικαταστήσει περίπου 3 κιλά ή ένα γαλόνι (3,79 λίτρα) βενζίνης, σε ογκομετρική κλίμακα, περισσότερα από 3.500 γαλόνια ( $1,3 \times 10^4$  λίτρα  $\approx$  όγκος αυτοκινήτου μεσαίου μεγέθους) αερίου  $H_2$  είναι απαραίτητα για την αντικατάσταση μόνο ενός γαλονιού(3,79 L) βενζίνης στις SPT.

Μετά την παραγωγή υδρογόνου, πρέπει είτε να χρησιμοποιηθεί στιγμιαία είτε να αποθηκευτεί με κάποιο τρόπο, είτε για λόγους μεταφοράς είτε επί τόπου για μελλοντική χρήση. Ο τρόπος αποθήκευσης του υδρογόνου εξαρτάται από τον τρόπο με τον οποίο ο παραγωγός επιλέγει να το χειριστεί μετά την παραγωγή. Ενώ το υδρογόνο έχει την υψηλότερη βαρομετρική πυκνότητα από όλα τα καύσιμα, που σημαίνει ότι έχει την περισσότερη ενέργεια ανά (kg), αλλά όμως έχει και τη χαμηλότερη ογκομετρική πυκνότητα, που σημαίνει ότι περιέχει χαμηλή ποσότητα ενέργειας ανά ( $m^3$ .)

Επομένως, το υδρογόνο μπορεί να αποθηκευτεί σε ένα αυτοκίνητο ως:

- Συμπιεσμένο αέριο σε δεξαμενή με υψηλές πιέσεις.
- Κρυογονικό υγρό σε χαμηλές θερμοκρασίες.
- Στερεό σε μεταλλικό υδρίδιο με χημικές ενώσεις.
- Απορροφούμενο σε σύνθετα μόρια

### 2.5.1 Συμπύεση υδρογόνου σε αέρια μορφή

Αυτή σήμερα είναι η πιο απλή και ώριμη τεχνολογία αποθήκευσης υδρογόνου, με την πιο κοινή μέθοδος αποθήκευσης υδρογόνου σε αέρια μορφή να είναι σε χαλύβδινες δεξαμενές. Παρόλα αυτά, μελετάται η ανάπτυξη ελαφριών σύνθετων δεξαμενών για αντοχή σε υψηλότερες πιέσεις και ανθεκτικότητα στην ευθραυστότητα του υδρογόνου. Αυτή η τεχνολογία είναι καλά κατανοητή και έχουν επιτευχθεί πιέσεις λειτουργίας έως και 825 bar και μέγιστες πιέσεις πλήρωσης 1094 bar. Τα πιο κοινά συστήματα που χρησιμοποιούνται για εφαρμογές κίνησης οχημάτων είναι δεξαμενές στα 350 και στα 700 bar. Μια άλλη οδός αποθήκευσης υδρογόνου ως υγρό, δηλαδή το κρυογονικό υδρογόνο, κερδίζει δημοτικότητα. Το αέριο υδρογόνο ψύχεται σε σχεδόν κρυογονικές θερμοκρασίες που βελτιώνουν την ενεργειακή πυκνότητα του αερίου.

Το υδρογόνο συμπιέζεται σε υψηλές πιέσεις, αεριοποιείται και αποθηκεύεται σε δεξαμενές με παχύ τοίχωμα (κυρίως κυλινδρικού ή σχεδόν συμμορφούμενου σχήματος) κατασκευασμένες από υλικά υψηλής αντοχής για την διατήρηση της ανθεκτικότητας και της ασφάλειας. Η πυκνότητα που επιτυγχάνεται στο πεπιεσμένο

αέριο απέχει ακόμα πολύ από τον τελικό στόχο των προτύπων DOE που κυμαίνεται στα  $70 \text{ kg/m}^3$ . Η πυκνότητα του αερίου στα 350 bar είναι περίπου  $20 \text{ kg/m}^3$  και περίπου  $35\text{-}40 \text{ kg/m}^3$  στα 700 bar. Όπως φαίνεται από μετρήσεις, απαιτείται πίεση σχεδόν 20.000 bar για να επιτευχθεί πυκνότητα περίπου  $70 \text{ kg/m}^3$ . Η επίτευξη τέτοιων υψηλών πιέσεων δεν είναι ρεαλιστική και ως εκ τούτου είναι σαφές ότι το αέριο υδρογόνο δεν θα μπορέσει ποτέ να φτάσει σε πυκνότητες τόσο υψηλές όσο το υγρό αντίστοιχό του. Παρ' όλα αυτά, η αποθήκευση σε αέρια μορφή είναι η κυρίαρχη μορφή που χρησιμοποιείται σήμερα στον κόσμο. Ωστόσο, για μια πλήρη μετάβαση στην οικονομία με βάση το υδρογόνο και τη χρήση του υδρογόνου στην κίνηση οχημάτων, θα πρέπει να αναπτυχθούν και άλλες μορφές αποθήκευσης.

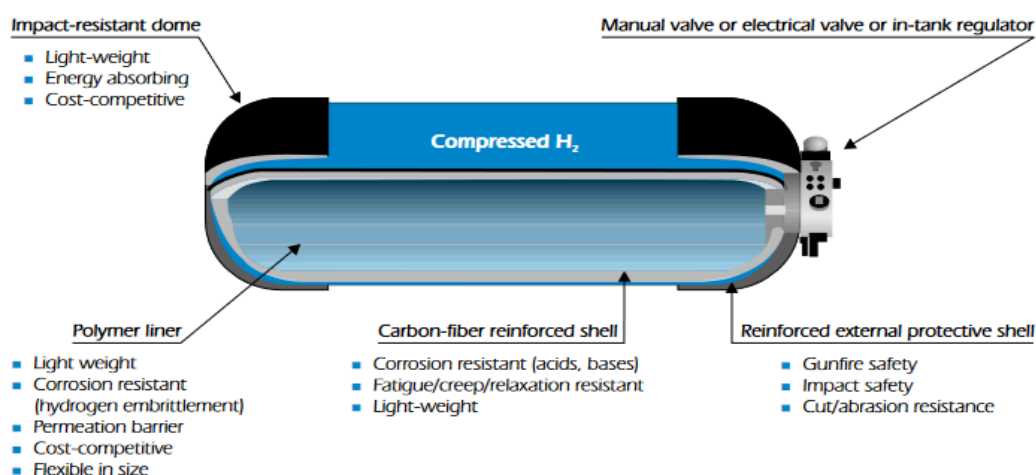
Οι δεξαμενές αποθήκευσης υδρογόνου υπό πίεση μπορούν να ταξινομηθούν σε τέσσερις τύπους:

1. Τύπος – I: εξολοκλήρου μεταλλικός κύλινδρος
2. Τύπος – II: φέρουσα μεταλλική στεφάνι επένδυσης τυλιγμένη με συνεχές νήμα εμποτισμένο με ρητίνη.
3. Τύπος – III: μη φέρουσα μεταλλική επένδυση αξονική και στεφάνι τυλιγμένο με συνεχές νήμα εμποτισμένο με ρητίνη.
4. Τύπος – IV: μη φέρουσα μη μεταλλική επένδυση αξονική και στεφάνι τυλιγμένο με συνεχές νήμα εμποτισμένο με ρητίνη.

Η υψηλή αντοχή και η αποφυγή διαρροών υδρογόνου είναι δύο κρίσιμες πτυχές μιας δεξαμενής αποθήκευσης. Έχουν επίσης τη δυνατότητα αποθήκευσης κρυοαερίου. Οι σύνθετες δεξαμενές που χρησιμοποιούνται για αποθήκευση σε υψηλές πιέσεις 700 bar είναι προηγμένες σύνθετες δεξαμενές τύπου III (μεταλλικές) ή τύπου IV (πλαστικές). Η δομή αυτών των δεξαμενών αποτελείται από δύο θεμελιώδη στοιχεία:

- i. Γραμμικά – λειτουργεί σαν φράγμα για τη διείσδυση του υδρογόνου.
- ii. Σύνθετη δομή – βελτιωμένη μηχανική ακεραιότητα της δεξαμενής.

Παρακάτω εμφανίζεται μια τυπική δομή δεξαμενής συμπιεσμένου υδρογόνου: [11]



Εικόνα 13: Δομή και χαρακτηριστικά δεξαμενής συμπιεσμένου αέριου υδρογόνου

## 2.5.2 Μετατροπή υδρογόνου σε κρυογονική μορφή

Μια άλλη μέθοδος για την αποθήκευση του υδρογόνου είναι σε υγρή μορφή. Ο πιο συνηθισμένος τρόπος αποθήκευσης του υδρογόνου σε υγρή μορφή είναι η ψύξη του σε κρυογονικές θερμοκρασίες ( $-253\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). Άλλες επιλογές περιλαμβάνουν την αποθήκευση υδρογόνου ως συστατικού σε άλλα υγρά, όπως διαλύματα  $\text{NaBH}_4$ , επαναφορτιζόμενα οργανικά υγρά ή άνυδρη αμμωνία  $\text{NH}_3$ .

Το κρυογονικό υδρογόνο, που συνήθως αναφέρεται απλώς ως υγρό υδρογόνο ( $\text{LH}_2$ ), έχει πυκνότητα  $70,8\text{ kg/m}^3$  σε κανονικό σημείο βρασμού ( $-253\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). Η κρίσιμη πίεση είναι  $13\text{ bar}$  και η κρίσιμη θερμοκρασία του είναι  $-240\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Η θεωρητική βαρομετρική πυκνότητα του  $\text{LH}_2$  είναι  $100\%$ , αλλά μόνο το  $20\%$  κατ' μάζα του  $\text{H}_2$  μπορεί να επιτευχθεί σε πρακτικά συστήματα υδρογόνου. Σε ογκομετρική βάση, οι αντίστοιχες τιμές είναι  $80\text{ kg/m}^3$  και  $30\text{ kg/m}^3$ . Αυτό σημαίνει ότι το υγρό υδρογόνο έχει πολύ καλύτερη ενεργειακή πυκνότητα από τα διαλύματα αερίου υπό πίεση που αναφέρθηκαν παραπάνω.

Ωστόσο, είναι σημαντικό να υπενθυμίσουμε ότι περίπου το  $30\text{-}40\%$  της ενέργειας χάνεται όταν παράγεται  $\text{LH}_2$ . Επιπλέον, η συνολική απόδοση μειώνεται στη συνέχεια περαιτέρω από το λεγόμενο φαινόμενο βρασμού. Το αποθηκευμένο κρυογονικό υγρό αρχίζει να εξατμίζεται μετά από ένα ορισμένο χρονικό διάστημα, λόγω της αναπόφευκτης εισροής θερμότητας στο δοχείο αποθήκευσης, οδηγώντας σε απώλεια  $2\%\text{-}3\%$  του εξατμιζόμενου υδρογόνου την ημέρα. Αυτό δεν μπορεί να αποφευχθεί, ακόμη και με μια πολύ αποτελεσματική μόνωση κενού και ασπίδα θερμικής ακτινοβολίας στη θέση τους. Για να αποφευχθεί η συσσώρευση υψηλής πίεσης, η υπερπίεση πρέπει να απελευθερωθεί από τη δεξαμενή, μέσω ενός καταλυτικού μετατροπέα.

Το κύριο πλεονέκτημα του  $\text{LH}_2$  είναι η υψηλή πυκνότητα αποθήκευσης που μπορεί να επιτευχθεί σε σχετικά χαμηλές πιέσεις. Το υγρό υδρογόνο έχει αποδειχθεί

σε επαγγελματικά οχήματα (ιδιαίτερα από τη BMW) και στο μέλλον θα μπορούσε επίσης να χρησιμοποιηθεί από κοινού ως καύσιμο αεροσκαφών, καθώς παρέχει το καλύτερο πλεονέκτημα βάρους από οποιοδήποτε τρόπο αποθήκευσης H<sub>2</sub>. [12], [13]

### 2.5.3 Αποθήκευση σε μεταλλικό υδρίδιο

Η αποθήκευση υδρογόνου σε στερεή κατάσταση πιστεύεται ότι είναι μια από τις πιο υποσχόμενες μορφές αποθήκευσης στο μέλλον, αν και βρίσκεται ακόμη σε πολύ πρόωρο στάδιο. Η αποθήκευση στερεάς κατάστασης υποδιαιρείται περαιτέρω ανάλογα με τον μηχανισμό αποθήκευσης σε:

1. Χημειορόφηση – χημικές αντιδράσεις που οδηγούν σε προσρόφηση υδρογόνου (όπως σε υδρίδια μετάλλων). Ισχυρός δεσμός και υψηλή ενέργεια που απαιτείται για την απελευθέρωση του αποθηκευμένου υδρογόνου.
2. Φυσική προσρόφηση – δυνάμεις Van der Waals που οδηγούν σε προσρόφηση υδρογόνου σε πορώδη υλικά άνθρακα, ζεόλιθοι κ.λπ. Αδύναμος δεσμός και σχετικά χαμηλές ενεργειακές απαιτήσεις για την απελευθέρωση υδρογόνου.

Τα υδρίδια μετάλλων βασίζονται στην αρχή ότι τα μεταλλικά κράματα μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως σφουγγάρια που απορροφούν υδρογόνο. Η υδρογονοποίηση ενός μετάλλου ή ενός μεταλλικού κράματος βασίζεται στα φαινόμενα της χημικής απορρόφησης. Μέσω μιας χημικής αντίδρασης, ένα μεταλλικό πλέγμα ξενιστή μπορεί να υδρογονωθεί. Οι αντιδράσεις αυτές είναι αναστρέψιμες και εξώθερμες, που σημαίνει ότι συνοδεύονται από σημαντική ποσότητα απελευθέρωσης θερμότητας. Ως εκ τούτου, η θερμότητα που εκλύεται πρέπει να απομακρύνεται συνεχώς καθώς η αντίδραση υδρογόνωσης επαναδιαμορφώνεται. Για την απελευθέρωση του υδρογόνου από το υδρίδιο μετάλλου, χρειάζεται να παρέχεται επαρκής θερμότητα για να σπάσει ο δεσμός μετάλλου-υδρογόνου (M-H).

Αρκετά μέταλλα και μεταλλικά κράματα είναι προσιτές επιλογές για το σχηματισμό υδριδίων κυρίως λόγω του μικρού τους βάρους και του αριθμού των ατόμων υδρογόνου ανά άτομο μετάλλου που μπορούν να αποθηκεύσουν. Μέταλλα όπως το λίθιο (Li), το βηρύλλιο (Be), το νάτριο (Na), το βόριο (B), το αλουμίνιο (Al), το μαγνήσιο (Mg) κ.λπ. έχουν αποτελέσει το επίκεντρο ερευνών τις τελευταίες δεκαετίες. Η αποθήκευση σε πορώδη μέσα, όπως νανοσωλήνες άνθρακα ή δείγματα άνθρακα, αν και έχουν ορισμένα πλεονεκτήματα όπως η αποθήκευση χαμηλής πίεσης, η ασφάλεια και η ευελιξία σχεδιασμού, σε σύγκριση με άλλες μορφές αποθήκευσης, έχουν σχετικά χαμηλές βαρυμετρικές ικανότητες (1-3%), με αποτέλεσμα να εμποδίζονται οι εφαρμογές τους μέχρι να βρεθούν σημαντικές βελτιώσεις. Επιπλέον, τα βαρύτερα μέταλλα χρησιμοποιούνται γενικά σε μικρές ποσότητες ως καταλύτες ή προσμίκτες για να τροποποιούν την ιδιότητα του υδριδίου μετάλλου.

Η αποθήκευση υδρογόνου σε υδρίδια μετάλλων προσφέρει διάφορα πλεονεκτήματα όπως υψηλές ογκομετρικές πυκνότητες, μέτριες βαρυμετρικές ικανότητες, χαμηλές πιέσεις λειτουργίας και το πιο σημαντικό από όλα, ασφάλεια. Σε αντίθεση με την αποθήκευση σε αέρια ή υγρή μορφή, δεν υπάρχει κίνδυνος διαρροής υδρογόνου. Η υψηλή ασφάλεια μιας τέτοιας μορφής αποθήκευσης οφείλεται κατά κύριο λόγο στο γεγονός ότι πρέπει να παρέχεται σταθερή θερμότητα για να εξασφαλιστεί μια σταθερή ροή υδρογόνου, η οποία, σε περίπτωση ατυχήματος μπορεί εύκολα να διακοπεί.

Επομένως, ένα ιδανικό υδρίδιο μετάλλου εκτός από την υψηλή πυκνότητα αποθήκευσης, θα πρέπει να έχει και άλλες ιδιότητες που το καθιστούν βιώσιμο σε εφαρμογές κίνησης αυτοκινήτων. Μερικές από τις κρίσιμες ιδιότητες για ένα ιδανικό υλικό υδριδίου μετάλλου είναι:

- Χαμηλή θερμοκρασία διάσπασης (για απελευθέρωση υδρογόνου)
- Μέτρια πίεση διάσπασης
- Χαμηλή θερμότητα σχηματισμού ένωσης (ενέργεια που απαιτείται για την απελευθέρωση υδρογόνου)
- Χαμηλή έκλυση θερμότητας κατά τη φόρτιση
- Υψηλή ανάκτηση υδρογόνου κατά την εκφόρτιση
- Αποτελεσματική και εύκολη αναστρεψιμότητα
- Γρήγορη κινητική ενέργεια
- Αντοχή στο  $O_2$  και άλλα δηλητήρια ( $CO$ ,  $CO_2$ ,  $N_2$ )
- Μεγάλη διάρκεια ζωής (μεγάλος αριθμός κύκλων φόρτισης/εκφόρτισης)
- Υψηλή ασφάλεια

Μια από τις πιο σημαντικές πτυχές της αποθήκευσης ενός υδριδίου μετάλλου επί του οχήματος είναι η δυνατότητα γρήγορης απορρόφησης/εκρόφησης υδρογόνου. Η παροχή υδρογόνου στην κυψέλη καυσίμου θα πρέπει να είναι γρήγορη και σταθερή, και οι χρόνοι ανεφοδιασμού για το υδρίδιο μετάλλου θα πρέπει επίσης να είναι γρήγοροι (εντός 5 λεπτών για γεμάτο ρεζερβουάρ). Για να διασφαλιστεί αυτό, πρέπει να εξεταστεί ότι είναι διαθέσιμες οι κατάλληλες τεχνολογίες αφαίρεσης θερμότητας και παροχής θερμότητας.

Κατά τον ανεφοδιασμό, το μεταλλικό πλέγμα απελευθερώνει θερμότητα, η οποία πρέπει να αφαιρείται συνεχόμενα για να καταστεί δυνατή η γρήγορη απορρόφηση του υδρογόνου και επομένως και ταχύτερο ανεφοδιασμό. Για την εκρόφηση του υδρογόνου, η θερμότητα πρέπει να παρέχεται σε σύντομο χρονικό διάστημα για να διασφαλιστεί η γρήγορη ροή του υδρογόνου στην κυψέλη καυσίμου και επομένως και η ομαλή λειτουργία του οχήματος. Η ενθαλπία σχηματισμού του υδριδίου μετάλλου επηρεάζει την θερμότητα που απαιτείται για την εκρόφηση του υδρογόνου. Οι κυψέλες καυσίμου λειτουργούν με διαφορετικές αποδόσεις, αλλά κατά μέσο όρο, περίπου το 50 % της ενέργειας του καυσίμου απελευθερώνεται ως θερμότητα που αντιστοιχεί σε περίπου 120,9 kJ/mol  $H_2$ . Οι περισσότερες από τις κυψέλες καυσίμου που χρησιμοποιούνται επί του παρόντος είναι τύπου πολυμερούς



ηλεκτρολύτη μεμβράνης (PEM) και λειτουργούν σε θερμοκρασία περίπου 80 °C. Ως εκ τούτου, είναι δυνατές δύο διαμορφώσεις:

- Χρησιμοποιώντας ένα μεταλλικό υδρίδιο ικανό να αφαιρέσει το υδρογόνο εξ ολοκλήρου με τη χρήση της χαμμένης θερμότητας του κυττάρου καυσίμου (χαμηλή ενθαλπία σχηματισμού).
- Χρησιμοποιώντας ένα μεταλλικό υδρίδιο που χρειάζεται εξωτερική πηγή θερμότητας εκτός από τη χαμμένη θερμότητα του κυττάρου καυσίμου (υψηλή ενθαλπία σχηματισμού). [14]

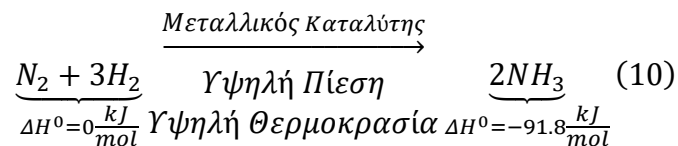
#### 2.5.4 Χημική αποθήκευση υδρογόνου

Είναι προφανές ότι το καθαρό υδρογόνο είναι δύσκολο να μεταφερθεί λόγω των φυσικοχημικών ιδιοτήτων του, όπως η χαμηλή ενεργειακή πυκνότητα. Ως εκ τούτου, αξίζει να διερευνηθούν τρόποι για τη χημική αποθήκευσή του. Ο όρος χημικό υδρογόνο χρησιμοποιείται για να περιγράψει τη στρατηγική αποθήκευσης υδρογόνου με τη σύνθεση μορίων που περιέχουν υδρογόνο. Το μεθάνιο, ο απλούστερος υδρογονάνθρακας, μπορεί να συντεθεί με μια διαδικασία γνωστή ως μεθανίωση. Η παγκόσμια τάση απαλλαγής από τις ανθρακούχες εκπομπές προκάλεσε ξανά ενδιαφέρον για αυτή τη διαδικασία. Η μεθανοποίηση μπορεί να πραγματοποιηθεί βιολογικά ή καταλυτικά, από μονοξείδιο του άνθρακα ή διοξείδιο του άνθρακα παράγοντας υδρογόνο από την ηλεκτρόλυση του νερού. Μετά από αυτό, η καταλυτική μεθανίωση υδρογόνου-διοξειδίου του άνθρακα μετατρέπει αποτελεσματικά την ηλεκτρική ενέργεια σε μεθάνιο.

Ενώ υπάρχει βιομηχανική υποδομή για το φυσικό αέριο, δεν μπορούμε να πούμε το ίδιο για το μεθάνιο. Ωστόσο, επειδή το φυσικό αέριο αποτελείται κυρίως από μεθάνιο, οι τρέχουσες τεχνολογίες φυσικού αερίου παρέχουν μια αποδεκτή εκτίμηση του δυναμικού του μεθανίου. Οι ογκομετρικές ενεργειακές πυκνότητες του υδρογόνου που συμπιέζεται στα 700 bar και του φυσικού αερίου που συμπιέζεται στα 250 bar είναι περίπου ίδιες. Η ογκομετρική ενεργειακή πυκνότητα του υγροποιημένου φυσικού αερίου είναι διπλάσια από αυτή του υδρογόνου που συμπιέζεται στα 700 bar. Ωστόσο, παρόμοια με τις δεξαμενές υγρού υδρογόνου, οι δεξαμενές υγρού φυσικού αερίου υπόκεινται, όπως ειπώθηκε προηγουμένως, στο φαινόμενο του βρασμού και το μεθάνιο είναι ένα από τα βασικά αέρια που προκαλούν το φαινόμενο του θερμοκηπίου. Οι χημικοί δεσμοί μεταξύ των ατόμων άνθρακα και υδρογόνου είναι πολύ σταθεροί, επομένως το υδρογόνο δεν εξάγεται εύκολα από το μεθάνιο. Επομένως, το μεθάνιο πρέπει να χρησιμοποιείται διαφορετικά από το καθαρό υδρογόνο.

Ένας συνηθισμένος τρόπος παραγωγής υδρογόνου από μεθάνιο είναι η αναμόρφωση με ατμό, αλλά αυτή η αντίδραση είναι εξαιρετικά ενδόθερμη, δηλαδή απαιτεί πολλή ενέργεια. Κατά συνέπεια, δεν είναι κατάλληλο για κινητές εφαρμογές. Ο **Joglekar et al.** ανέπτυξε μια άμεση κυψέλη καυσίμου μεθανίου για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας απευθείας από μεθάνιο. Ωστόσο, χρησιμοποιεί καταλύτη από πλατίνα και απέχει πολύ από την εμπορική εφαρμογή. Οι κυψέλες καυσίμου στερεού οξειδίου (SOFCs) είναι ίσως ο πιο ενδιαφέρον υποψήφιος για μετατροπή του μεθανίου. Ένα από τα πολλά υποσχόμενα χαρακτηριστικά των (SOFC) είναι η ευελιξία τους σαν καύσιμο. Δεδομένης της μέτριας ενεργειακής πυκνότητας του μεθανίου, θα πρέπει να εξεταστούν και άλλοι υποψήφιοι για αποθήκευση χημικού υδρογόνου.

Η αμμωνία είναι ένας άλλος πιθανός υποψήφιος που μελετάται ευρέως για την χημική αποθήκευση του υδρογόνου. Το υδρογόνο μπορεί να παραχθεί χωρίς διοξείδιο του άνθρακα με τη διαδικασία Haber–Bosch όπως απεικονίζεται στην παρακάτω εξίσωση:



Η ενεργειακή πυκνότητα της υγρής αμμωνίας (17,6 wt %, 11,5 MJ/L) είναι οριακά καλύτερη από αυτή του υγρού υδρογόνου, αλλά η τάση των ατμών της είναι πολύ χαμηλότερη. Η τάση των ατμών της αμμωνίας είναι 10 bar στους 25 °C με αποτέλεσμα αυτής της χαμηλής πίεσης να απλοποιεί σημαντικά τον σχεδιασμό της δεξαμενής. Ως απόδειξη αυτού, υπάρχει μια ευρεία υποδομή διανομής και παραγωγής αμμωνίας για την επεξεργασία των εκατομμυρίων τόνων που παράγονται ετησίως σε όλο τον κόσμο. Παρόμοια με το μεθάνιο, η χρήση της αμμωνίας είναι πιο δύσκολη από το καθαρό υδρογόνο. Οι κυψέλες καυσίμου στερεού οξειδίου (SOFCs) είναι η πιο πιθανή οδός για τη χρήση αμμωνίας στις κυψέλες καυσίμου, αλλά αυτές εξακολουθούν να αντιμετωπίζουν προβλήματα ανθεκτικότητας. Ορισμένοι ειδικοί πιστεύουν ότι οι SOFC θα καθιερωθούν τελικά ως η κυρίαρχη τεχνολογία. Εν τω μεταξύ, η ενέργεια μπορεί να εξαχθεί από την αμμωνία με καύση. Υπάρχει ένας σημαντικός αριθμός μελετών σχετικά με τη χρήση της αμμωνίας ως καυσίμου. Ωστόσο, η αμμωνία μπορεί να είναι πολύ επιβλαβής όταν εισπνέεται σε μεγάλες ποσότητες. Όμως, η αμμωνία έχει μια χαρακτηριστική οσμή, η οποία μπορεί να θεωρηθεί χαρακτηριστικό ασφαλείας και ακόμη, δεν συσσωρεύεται στο ανθρώπινο σώμα. [15]



### 3. Το Υδρογόνο ως καύσιμο στις κυψέλες καυσίμου

#### 3.1 Εισαγωγή

Η ιστορία των κυψελών καυσίμου ξεκινάει από πολύ παλιά, όταν Sir William Robert Grove ένας δικαστής στο επάγγελμα και φυσικός επιστήμονας από την Ουαλία κατασκεύασε το (1839) μια μορφή ηλεκτρικής κυψέλης, την κυψέλη Grove, όπου χρησιμοποιούσε ηλεκτρόδια ψευδαργύρου και πλατίνας. Οι κυψέλες αυτές χρησιμοποιήθηκαν για πρώτη φορά για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας σε διαστημικά προγράμματα της NASA την δεκαετία του (1960), τροφοδοτώντας με ηλεκτρική ενέργεια και καθαρό νερό διαστημικά οχήματα.

Οι κυψέλες καυσίμου θεωρούνται ως η βέλτιστη τεχνολογία μετατροπής ενέργειας για την μεγιστοποίηση της απόδοσης σε παραγόμενη ισχύ, με χρήση του υδρογόνου ως καύσιμο. Οι σημερινές κυψέλες καυσίμου επιτυγχάνουν αποδόσεις της τάξης των (40-55%) ως προς την κατώτερη θερμογόνο δύναμη LHV ανεξάρτητα από το μέγεθός τους, ενώ οι υβριδικοί κύκλοι αεριοστροβίλων - κυψελών καυσίμου είναι δυνατό να υπερβούν το (70%) ως προς το LHV.

Οι κυψέλες καυσίμου είναι ηλεκτροχημικές διατάξεις που μετατρέπουν τη χημική ενέργεια των καυσίμων άμεσα σε ηλεκτρική, παρακάμπτοντας τους θερμοδυναμικούς περιορισμούς που διέπουν τις συμβατικές θερμικές μηχανές. Αποτελούνται από τον ηλεκτρολύτη, ο οποίος βρίσκεται σε άμεση επαφή με δύο πορώδη ηλεκτρόδια.

Οι κυψέλες καυσίμου αποτελούνται από δυο ηλεκτρόδια (την άνοδο και την κάθοδο), τα οποία διαχωρίζονται από έναν ηλεκτρολύτη. Ο ηλεκτρολύτης είναι από πολυμερές ή άλλο υλικό, το οποίο επιτρέπει την διέλευση ιόντων, αλλά όχι τη διέλευση των ηλεκτρονίων. Ένα καύσιμο που περιέχει υδρογόνο (π.χ. φυσικό αέριο) εισάγεται από την πλευρά της ανόδου, όπου τα ηλεκτρόνια του υδρογόνου ελευθερώνονται και κινούνται σε ένα εξωτερικό κύκλωμα δίδοντας ηλεκτρικό ρεύμα. Τα θετικά φορτισμένα ιόντα υδρογόνου διαπερνούν τον ηλεκτρολύτη και φτάνουν στην κάθοδο, όπου ενώνονται με τα ελεύθερα ηλεκτρόνια και το οξυγόνο, παράγοντας νερό. Για να επιταχυνθεί η διαδικασία του ιονισμού του υδρογόνου χρησιμοποιείται ένας καταλύτης υψηλής αγωγιμότητας στα ηλεκτρόδια (π.χ. πλατίνα). Όταν το καύσιμο που χρησιμοποιείται είναι καθαρό υδρογόνο, τα μόνα παράγωγα της διεργασίας αυτής είναι ηλεκτρικό ρεύμα, καθαρό νερό και θερμότητα. [36], [37]

#### 3.2 Τύποι κυψελών καυσίμου

Ένας καθοριστικός παράγοντας για την επιλογή του τύπου της κυψέλης καυσίμου που θα χρησιμοποιηθεί είναι η καθαρότητα του υδρογόνου. Οι κυψέλες καυσίμου χαμηλών θερμοκρασιών απαιτούν καθαρό υδρογόνο, επειδή η απόδοση των αντίστοιχων καταλυτών/ηλεκτροδίων υποβαθμίζεται κατά την παρουσία ξένων

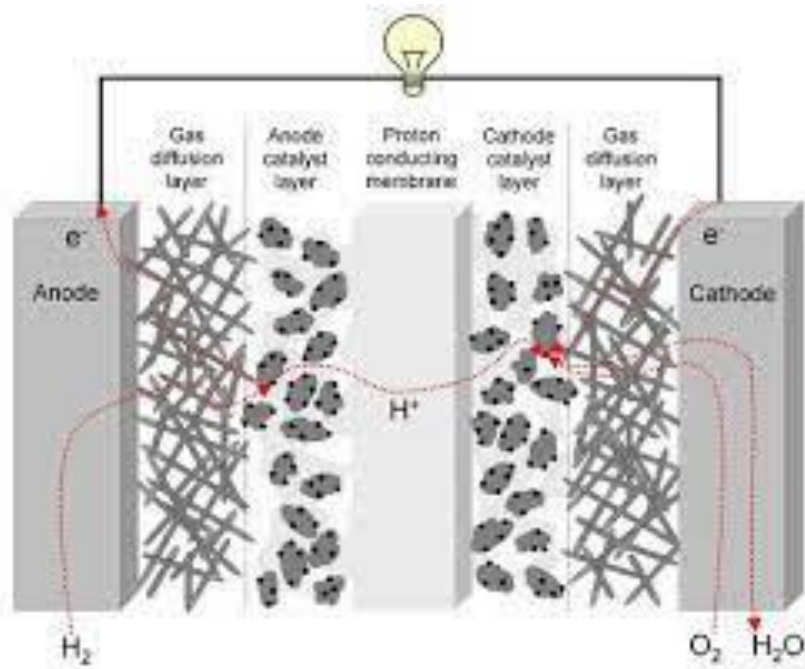
προσμίξεων/ακαθαρσιών (π.χ. θειούχων ενώσεων) καθώς και του μονοξειδίου του άνθρακα. Αντίθετα, λόγω των υψηλών θερμοκρασιών λειτουργίας στις κυψέλες καυσίμου SOFC και MCFC, οι ηλεκτροκαταλύτες είναι περισσότερο ανθεκτικοί στην παρουσία ξένων προσμίξεων/ακαθαρσιών, ενώ επιπλέον το Co μπορεί να χρησιμοποιηθεί και ως καύσιμο. Οι κυψέλες καυσίμου PEFC, SOFC και MCFC θεωρούνται ιδανικές για σταθερές εφαρμογές. Οι κυψέλες καυσίμου τύπου PEM παράγουν υψηλές πυκνότητες ισχύος σε πυκνότητες ρεύματος που προσεγγίζουν τα  $(4) \text{ A/cm}^2$ , σε αντίθεση με τους άλλους τύπους κυψελών καυσίμου όπου με δυσκολία φθάνουν το  $(1) \text{ A/cm}^2$ . Αυτό το χαρακτηριστικό, σε συνδυασμό με τα πλεονεκτήματα του βάρους, του όγκου και του κόστους, καθιστά αυτόν τον τύπο κυψελών καυσίμου τον ελκυστικότερο τόσο για κινητές όσο και για σταθερές εφαρμογές. Εντούτοις, τόσο τα SOFC όσο και τα MCFC θεωρούνται ότι στο άμεσο μέλλον έχουν τις προοπτικές να εδραιωθούν στην συγκεκριμένη αγορά.[36]

### **Αναλυτικότερα διακρίνουμε τους τύπους:**

- Κυψέλες καυσίμου μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων (PEMFC)
- Κυψέλες καυσίμου φωσφορικού οξέος (PAFC)
- Κυψέλες καυσίμου αλκαλίων (AFC)
- Κυψέλες καυσίμου ανθρακικών αλάτων (MCFC)
- Κυψέλες καυσίμου στερεοποιημένων οξειδίων (SOFC)
- Κυψέλες καυσίμου μεθανόλης (DMFC)

#### **3.2.1 Κυψέλες καυσίμου μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων (PEMFC)**

Οι κυψέλες αυτές φέρουν υψηλή πυκνότητα ισχύος, μικρό χρόνο έναρξης λειτουργίας και υψηλή ηλεκτρική απόδοση που κυμαίνεται μεταξύ (40-50%). Ο μικρός χρόνος εκκίνησης οφείλεται στη χαμηλή θερμοκρασία λειτουργίας τους (συνήθως από  $(60 \text{ έως } 80^\circ\text{C})$ ), όπου βρίσκουν εφαρμογή στις μεταφορές, σε στατικούς σταθμούς παραγωγής ενέργειας αλλά και στη χρήση ως εφεδρικές γεννήτριες. Ασφαλέστερο καύσιμο για αυτό τον τύπο κυψελών είναι το υδρογόνο. Το εύρος θερμοκρασιών λειτουργίας είναι αρκετά χαμηλό εξαιτίας των περιορισμών που εισάγει η χρήση του πολυμερούς ηλεκτρολύτη. Πέρα από τη χρήση τους σε στατικές, εφεδρικές εφαρμογές και εφαρμογές μεταφορών, οι PEMFC κρίνονται κατάλληλες για τροφοδοσία συστημάτων χαμηλής ισχύος αλλά και για κινητές εφαρμογές όπως οι φορητές ηλεκτρονικές συσκευές.[27], [36]

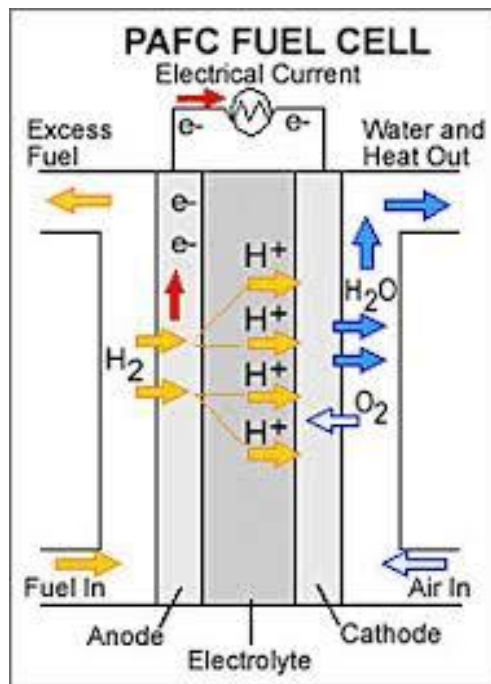


Εικόνα 14: Κυψέλη (PEMFC)

### 3.2.2 Κυψέλες καυσίμου φωσφορικού οξέος (PAFC)

Οι κυψέλες καυσίμου φωσφορικού οξέος PAFC αποτελούν την πρώτη ουσιαστικά τεχνολογία κυψελών καυσίμου που εμπορευματοποιήθηκε.

Οι κυψέλες φωσφορικού οξέος λειτουργούν σε αρκετά καλή απόδοση, της τάξης του (40%) και χρησιμοποιούνται ευρύτατα. Παρουσιάζονται σε σημαντικές εφαρμογές, όπως για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας σε κτίρια και εγκαταστάσεις, σε νοσοκομεία, ξενοδοχεία, σχολεία, εμπορικά κέντρα, αερολιμένες και εγκαταστάσεις διαχείρισης αποβλήτων, επίσης σε συστήματα συνδυασμένου θερμικού κύκλου ισχύος (200) kW (CHP Systems). Πλεονεκτήματα που παρουσιάζει συγκριτικά με τα άλλα είδη κυψελών είναι η αξιοπιστία και η ανοχή στο CO<sub>2</sub> που μπορεί να υπάρχει στο καύσιμο και το οξειδωτικό μέσο. Από την άλλη, η ανάγκη για αύξηση της πυκνότητας ισχύος, της απόδοσης του ηλεκτρολύτη και της μείωσης του συνολικού κόστους περιορίζει τη χρήση της. [27], [36]

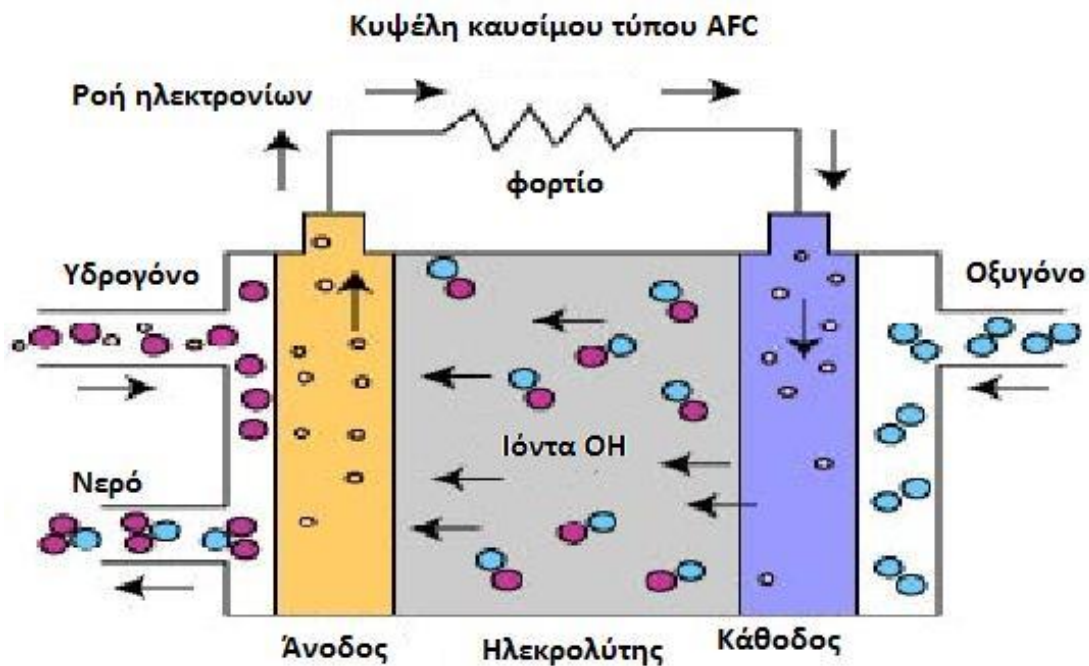


Εικόνα 15: Κυψέλη (PAFC)

### 3.2.3 Κυψέλες καυσίμου αλκαλίων (AFC)

Οι αλκαλικές κυψέλες καυσίμου AFC ήταν από τις πρώτες τεχνολογίες κυψελών που χρησιμοποιήθηκαν. Συγκεκριμένα η NASA από τις αρχές τις δεκαετίας του '60 εφάρμοσε την τεχνολογία αυτή σε διαστημικές της αποστολές. Κύριο πλεονέκτημα των κυψελών καυσίμου AFC είναι η ταχεία κινητική των αντιδράσεων, η οποία έχει ως αποτέλεσμα την επίτευξη υψηλότερων δυναμικών και κατά συνέπεια υψηλότερων αποδόσεων σε σχέση με τους υπόλοιπους τύπους κυψελών καυσίμου.

Οι θερμοκρασίες λειτουργίας των κυψελών αυτών δεν ξεπερνούν τους (100°C) ενώ οι πιέσεις μπορεί να είναι αρκετά υψηλές όπως και η απόδοσή τους (60%). Βασικό πλεονέκτημα των τύπων αυτών είναι οι εναλλακτικές που παρουσιάζουν στη χρήση των καταλυτών, οι οποίοι είναι χαμηλού κόστους και διευκολύνουν αρκετά τη διεξαγωγή των χημικών αντιδράσεων. Στις εφαρμογές τους συγκαταλέγεται η χρήση σε διάφορες διαστημικές εφαρμογές, όπως η ανάπτυξη και κατασκευή διαστημικών οχημάτων. Το μεγαλύτερο πρόβλημα που αντιμετωπίζουν οι AFC το οποίο καθιστά τη χρήση τους περιορισμένη σε σχέση με άλλα είδη κυψελών, είναι ότι η παροχή αέρα και καυσίμου δεν πρέπει να περιλαμβάνει ποσότητες CO<sub>2</sub>, διότι αυτό αντιδρά με το αλκαλικό διάλυμα του ηλεκτρολύτη οδηγώντας στη διάβρωση του ενώ παράλληλα μειώνεται η απόδοση της κυψέλης, καθιστώντας τη χρήση καθαρού υδρογόνου απαραίτητη. [27], [36]



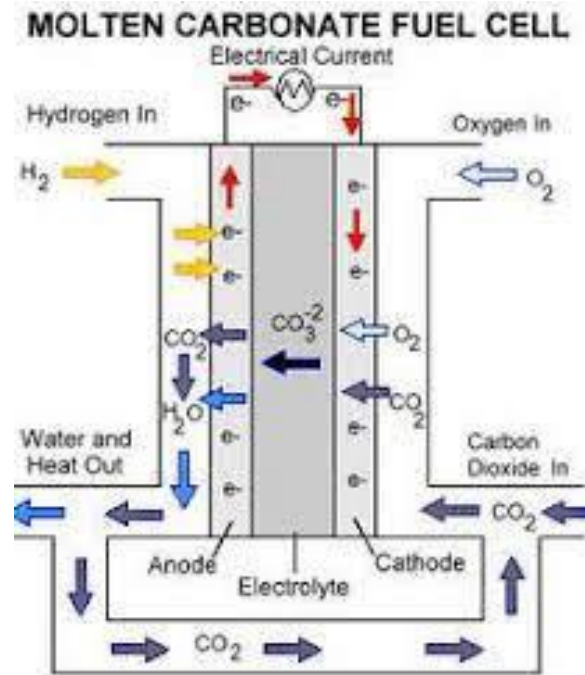
Εικόνα 16: Κυψέλη (AFC)

### 3.2.4 Κυψέλες καυσίμου ανθρακικών αλάτων (MCFC)

Οι κυψέλες ανθρακικών αλάτων έχουν μεγάλο μέγεθος, παρουσιάζουν ευελιξία ως προς το χρησιμοποιούμενο καύσιμο και διαθέτουν υψηλή απόδοση, της τάξης του (50 – 60%). Λειτουργούν σε θερμοκρασίες που ξεπερνούν τους (600°C) και χρησιμοποιούνται σε μεγάλης κλίμακας εφαρμογές παραγωγής ενέργειας.

Αποτελούν καλή λύση προς συμπαραγωγή ενέργειας σε συστήματα μέσης και μεγάλης ισχύος δεδομένου, ότι η ποσότητα της θερμότητας που εκλύουν μπορεί να εκμεταλλευθεί κατάλληλα. Για την κατασκευή της κυψέλης απαιτούνται ανθεκτικά υλικά ώστε ο ηλεκτρολύτης να μην προκαλεί διαβρώσεις και να μη παρουσιάζονται προβλήματα μηχανικής σταθερότητας που περιορίζουν τη διάρκεια ζωής της κυψέλης. Ο χρόνος εκκίνησης είναι μεγάλος εξαιτίας των υψηλών θερμοκρασιών λειτουργίας που αναπτύσσονται. Η χρήση της παραγόμενης θερμότητας σε κάποιο άλλο θερμοδυναμικό κύκλο μπορεί να αυξήσει τα ποσοστά απόδοσης της κυψέλης. Εξαιτίας των υψηλών θερμοκρασιών λειτουργίας των MCFC είναι δυνατή η χρήση διάφορων υδρογονανθράκων και του μονοξειδίου του άνθρακα (CO) ως καύσιμα, η επεξεργασία των οποίων μπορεί να πραγματοποιηθεί στο εσωτερικό της κυψέλης ως εσωτερική αναμόρφωση του καυσίμου (internal reforming). [27], [36]



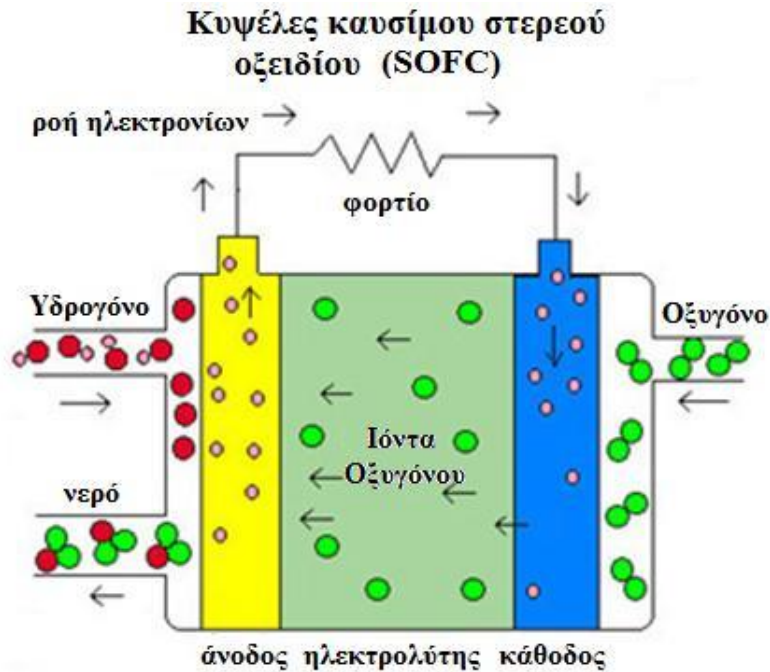


Εικόνα 17: Κυψέλη (MCFC)

### 3.2.5 Κυψέλες καυσίμου στερεοποιημένων οξειδίων (SOFC)

Οι κυψέλες σταθεροποιημένων οξειδίων λειτουργούν σε περιοχή υψηλών θερμοκρασιών (550 – 1000°C) με μια απόδοση της τάξης του (50 -60%), που οφείλεται στην υψηλής ταχύτητας κινητική των ηλεκτροδίων, υψηλές πυκνότητες ρεύματος και αργό χρόνο εκκίνησης που οφείλεται στις υψηλές θερμοκρασίες λειτουργίας, οι οποίες περιορίζουν το χρόνο ζωής της κυψέλης. Για την κατασκευή φθηνότερων και αποδοτικότερων κυψελών αναπτύχθηκαν λεπτότεροι ηλεκτρολύτες που επιτρέπουν τη λειτουργία και σε χαμηλότερες θερμοκρασίες (650-850oC). Τα κεραμικά υλικά από τα οποία κατασκευάζονται οι SOFC είναι δύσκολο να κατεργαστούν και είναι ακριβά στην επεξεργασία ενώ επίσης απαιτείται η χρήση επιπλέον εξοπλισμού συγκριτικά με άλλους τύπους κυψελών όπως προθερμαντήρες αέρα και καυσίμου που επιτρέπουν την εσωτερική αναμόρφωση του καυσίμου. Οι SOFC χρησιμοποιούνται για παραγωγή ενέργειας από σταθερές μονάδες και από βοηθητικές πηγές ενέργειας για οχήματα ενώ ταυτόχρονα αποτελούν το πρώτο είδος κυψελών που χρησιμοποιήθηκε ποτέ. Με κατάλληλες υποδομές, η θερμότητα που εκλύουν μπορεί να αξιοποιηθεί προς συμπαραγωγή ενέργειας και για το λόγο αυτό κρίνονται κατάλληλες για όλα τα μεγέθη των συστημάτων συνδυασμένου θερμικού κύκλου ισχύος (CHP Systems). Σημαντικό πλεονέκτημα των SOFC αποτελεί η χρήση στερεού ηλεκτρολύτη καθώς απλοποιείται η σχεδίαση του συστήματος, στο οποίο

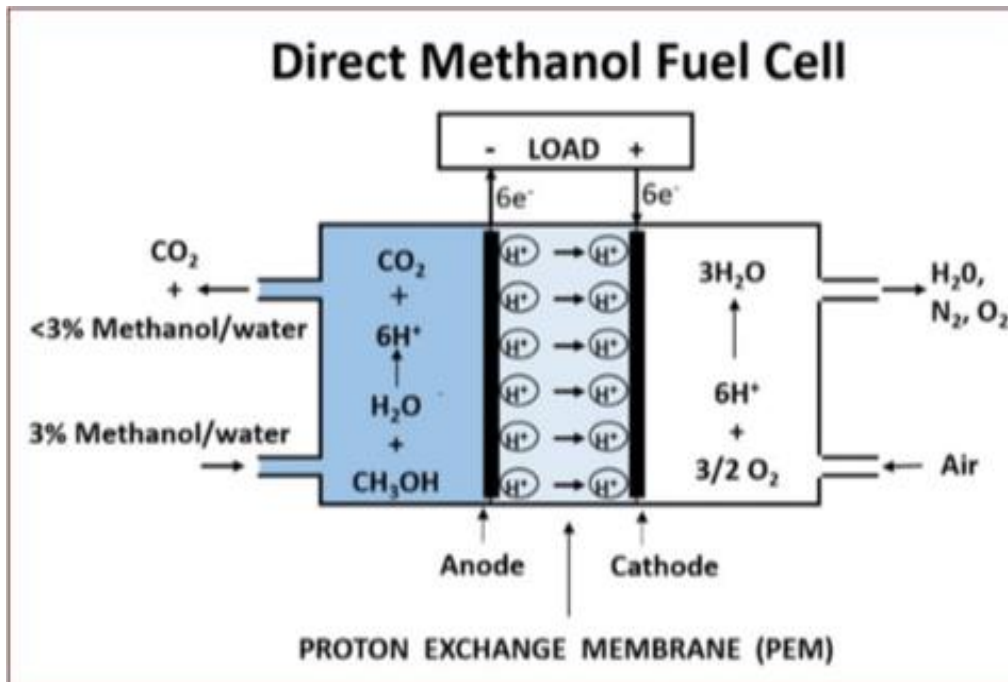
μπορούν να αποδοθούν κυλινδρικά σχήματα, ενώ τα προβλήματα διάβρωσης και διαχείρισης που σχετίζονται με υγρούς ηλεκτρολύτες εξαλείφονται. Παρόλα αυτά η αντίσταση που παρουσιάζει ο ηλεκτρολύτης θεωρείται σχετικά υψηλή. [27], [36]



Εικόνα 18: Κυψέλη (SOFC)

### 3.2.6 Κυψέλες καυσίμου μεθανόλης (DMFC)

Οι κυψέλες μεθανόλης αποτελούν υποκατηγορία των κυψελών ανταλλαγής πρωτονίων PEMFC, με τη διαφορά ότι το καύσιμο που χρησιμοποιείται είναι η μεθανόλη ( $\text{CH}_3\text{OH}$ ). Η μεθανόλη, ανεξάρτητα από τις περιβαλλοντικές συνθήκες που βρίσκεται, παρουσιάζει σταθερή δομή και καλή πυκνότητα ενέργειας, γεγονός που κάνει τη μεταφορά της εύκολη. Το εύρος θερμοκρασιών στο, οποίο λειτουργεί κυμαίνεται μεταξύ του ( $50 - 120^\circ\text{C}$ ). Χρησιμοποιούνται κυρίως σε εφαρμογές όπου δεν απαιτούνται υψηλές αποδόσεις, αλλά σε εφαρμογές που η πυκνότητα ενέργειας και ισχύος θεωρούνται σημαντικότερες. Συγκεκριμένα, η ικανότητα των κυψελών μεθανόλης να παράγουν μικρή ποσότητα ισχύος για μεγάλα χρονικά διαστήματα, χωρίς τοξικότητα, θόρυβο και σημαντικές θερμικές απώλειες τις καθιστούν κατάλληλες για μη στατικές συσκευές και εφαρμογές. [27], [36]



Εικόνα 19: Κυψέλη (DMFC)

### 3.3 ΤΟ ΥΔΡΟΓΟΝΟ ΩΣ ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΗ ΠΗΓΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΤΟΥ ΜΕΛΛΟΝΤΟΣ

Οι επιπτώσεις στο περιβάλλον από τη χρήση των ορυκτών καυσίμων ως βασική πηγή ενέργειας, επέβαλαν έρευνες σχετικά με την εξερεύνηση εναλλακτικών καυσίμων, για την όσο το δυνατόν ταχέως αντικατάσταση των ορυκτών καυσίμων, από νέα καύσιμα με λιγότερες περιβαλλοντικές επιπτώσεις, τα οποία θα πρέπει να εκπληρώνουν τους παρακάτω όρους:

- Αφθονία πόρων και δυσκολία εξάντλησης αποθεμάτων: το καύσιμο θα πρέπει να βρίσκεται σε αφθονία για την κάλυψη των διαρκώς αυξανόμενων ενεργειακών αναγκών ολόκληρου του πλανήτη και αν είναι δυνατόν να παράγεται μέσω ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (ηλιακή, αιολική, γεωθερμική, κ.λπ.). Η ραγδαία ανάπτυξη των αναπτυσσόμενων χωρών (Κίνα, Ινδία, κ.λπ.) συνοδεύεται από αντίστοιχη αύξηση των ενεργειακών αναγκών των χωρών αυτών με αποτέλεσμα την αενάως διογκούμενη παραγωγή ενέργειας από ορυκτά καύσιμα με ετήσια αυξητική τάση παγκοσμίως.
- Μεγάλο περιεχόμενο ενέργειας: το ποσό ενέργειας που παράγεται από την καύση της εναλλακτικής καύσιμης ύλης θα πρέπει να είναι τουλάχιστον συγκρίσιμο, με άλλα λόγια της ίδιας τάξης μεγέθους, με το παραγόμενο ποσό ενέργειας από την καύση της ίδιας ποσότητας ορυκτών καυσίμων.

- Ευκολία παραγωγής, διανομής και αποθήκευσης: είναι γεγονός ότι η υγρή κατάσταση των ορυκτών καυσίμων διευκολύνει τα μέγιστα στη μεταφορά και αποθήκευση τους, καθώς δεν απαιτούνται εξεζητημένα συστήματα διαχείρισης του καυσίμου μέχρι την τελική διάθεση του στους καταναλωτές. Μία νέα και εναλλακτική καύσιμη ύλη ιδανικά θα πρέπει να χρησιμοποιεί την παρούσα δικτύωση διανομής και αποθήκευσης καθώς και τις ήδη υπάρχουσες τεχνολογίες. Η επιλογή μελλοντικά, ενός αερίου ή κρυογονικώς υγροποιημένου καυσίμου σαν το υδρογόνο επιβάλλει την υιοθέτηση νέων τεχνολογιών και διαδικασιών για την παραγωγή, διανομή και αποθήκευση και κάνει τη μετάβαση στη νέα οικονομία δύσκολη και δαπανηρή, αλλά όχι ανέφικτη. Ιστορικά εξάλλου έχει παρατηρηθεί ότι η μετάβαση της παγκόσμιας ενεργειακής κοινότητας σε νέα καύσιμα έχει ακολουθήσει την διαδρομή στερεό (άνθρακας), υγρό (βενζίνη & ντίζελ), αέριο (φυσικό αέριο), με κάθε επόμενο σταθμό της λογικής αλληλουχίας ένα καύσιμο, η χημική αλυσίδα του οποίου περιείχε όλο και λιγότερα άτομα άνθρακα. Επόμενος σταθμός της λογικής αλληλουχίας λοιπόν, φαίνεται να είναι ένα αέριο καύσιμο από την χημική αλυσίδα του οποίου, θα απουσιάζουν εντελώς τα άτομα άνθρακα.
- Ελάχιστη περιβαλλοντική επιβάρυνση: η ελαχιστοποίηση της ρύπανσης είναι η κύρια και σημαντικότερη αιτία για την ανακίνηση της διαδικασίας αναζήτησης εναλλακτικών ενεργειακών λύσεων. Η άλλη αιτία, αυτή της εξάντλησης των αποθεμάτων πετρελαίου στον αιώνα που διανύουμε, όσο σημαντική και αν ακούγεται, παραμένει δευτερεύουσας σημασίας γιατί η καταστροφή του πλανήτη, εξαιτίας του φαινομένου του θερμοκηπίου και των συνεπειών αυτού, θα έχει επέλθει πολύ πριν την εξάντληση των αποθεμάτων των ορυκτών καυσίμων.
- Ασφάλεια κατά την χρήση και ευκολία διαχείρισης: πρέπει να καταστεί σαφές ότι κανένα καύσιμο από αυτά που χρησιμοποιούνται σήμερα δεν είναι απολύτως ασφαλές κατά τη διαχείρισή του και την καύση του, καθώς ακόμα και η ελάχιστη θερμική πηγή μπορεί να προκαλέσει πυρκαγιά ή έκρηξη. Η πιστή τήρηση των διαδικασιών και των κανόνων ασφαλείας είναι οι συνθήκες που έχουν καταστήσει το φυσικό αέριο, το πετρέλαιο και τα παράγωγά του ως ασφαλή καύσιμα στη συνείδηση του κόσμου.

Το υδρογόνο έχει επιλεγεί από την διεθνή επιστημονική κοινότητα ως το πλέον κατάλληλο καύσιμο για τη σταδιακή αντικατάσταση των ορυκτών καυσίμων εφόσον πληροί τα περισσότερα από τα παραπάνω κριτήρια και μάλιστα σε βαθμό ανώτερο από τη βενζίνη ή το ντίζελ. Τα κριτήρια που καθιστούν το υδρογόνο μία τόσο ελκυστική επιλογή ως μελλοντικό καύσιμο για τις ΜΕΚ είναι η καθαρότητα των προϊόντων της καύσης του, η δυνατότητα παραγωγής του από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας καθώς και η ανακυκλωσιμότητα του, εφόσον το υδρογόνο κατά την καύση του αντικαθιστά στο περιβάλλον το νερό από το οποίο παράχθηκε. Επομένως τα ενεργειακά αποθέματα υδρογόνου είναι στην ουσία ανεξάντλητα.

Όσον αφορά στο κριτήριο του ποιοτικού προσδιορισμού των προϊόντων της καύσης, το υδρογόνο κρίνεται ως το ιδανικότερο από όλα τα γνωστά μέχρι σήμερα καύσιμα, καθώς από την καύση του παράγονται μόνο υδρατμοί και κάποια ελάχιστη ποσότητα οξειδίων του αζώτου, με το διοξείδιο του άνθρακα να απουσιάζει από τα προϊόντα της καύσης του. Σ' ότι έχει να κάνει με την ασφάλεια κατά την διαχείριση του καυσίμου, το υδρογόνο δεν μπορεί να χαρακτηριστεί περισσότερο επικίνδυνο από τη βενζίνη, παρότι είναι πιο εύφλεκτο, διότι ο μεγάλος συντελεστής διάχυσης του στα ρευστά, εξασφαλίζει την ταχύτατη διαφυγή του στον αέρα. Εκτός αυτού, η μεγάλη ταχύτητα καύσης του μετά την ακούσια ανάφλεξη του, εξασφαλίζει τη σύντομη καύση του και τις, συγκριτικά με την βενζίνη, μικρότερες καταστρεπτικές συνέπειες

Στα δύο εναπομείναντα κριτήρια, αυτό του ειδικού περιεχομένου ενέργειας και του δικτύου διανομής και αποθήκευσης τα υγρά καύσιμα που χρησιμοποιούνται σήμερα (βενζίνη & ντίζελ) σαφώς υπερέχουν έναντι του υδρογόνου. Πρέπει στο σημείο αυτό να αναφερθεί ότι το ποσό της θερμογόνου δύναμης που περικλείεται κατά μάζα σε μία ποσότητα υδρογόνου ( $\text{H}_2 = 120\text{MJ/kg}$ ) είναι μεγαλύτερο από το ποσό της θερμογόνου δύναμης που περικλείεται στην ίδια κατά μάζα ποσότητα βενζίνης ( $\text{C}_6\text{H}_6 = 44,5\text{MJ/kg}$ ) ή ντίζελ ( $\text{C}_{12}\text{H}_{26} = 40\div 42,5\text{MJ/kg}$ ). Η κατά όγκο περιεκτικότητα ενέργειας του υδρογόνου όμως είναι πολύ μικρότερη σε σύγκριση με τα άλλα καύσιμα λόγω της μικρής πυκνότητάς του. Τέλος, πρέπει να σημειωθεί ότι η διαχείριση ενός υγρού, σε συνθήκες περιβάλλοντος, καυσίμου είναι πάντοτε πιο εύκολη και λιγότερο επικίνδυνη από τη διαχείριση ενός αερίου ή κρυογονικού υγρού καυσίμου όπως είναι το υδρογόνο.

## 4. ΜΗΧΑΝΕΣ ΕΣΩΤΕΡΙΚΗΣ ΚΑΥΣΗΣ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ (ΜΕΚ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ)

### 4.1 Εισαγωγή

Για την παραγωγή ενέργειας, εκτός από τις κυψέλες καυσίμου, μπορεί να χρησιμοποιηθεί και μια άλλη κατηγορία ενεργειακών διατάξεων, οι οποίες μπορούν εξίσου ικανοποιητικά να παράγουν ενέργεια μέσω του υδρογόνου, οι οποίες ονομάζονται μηχανές εσωτερικής καύσης υδρογόνου (ΜΕΚ υδρογόνου).

Η προσπάθεια χρησιμοποίησης των ΜΕΚ για την παραγωγή ενέργειας μέσω του υδρογόνου δεν είναι καινούργια. Ο εφευρέτης Nikolaus Otto (1832-1891), εφευρέτης της ομώνυμης ΜΕΚ Otto με χρήση καυσίμου βενζίνης (1864), ασχολήθηκε παράλληλα και με την μελέτη χρήσης συνθετικού αέριου, αποτελούμενου από βενζίνη και υδρογόνο σε διαφορετικές συστάσεις μεταξύ τους. Σύμφωνα με μελέτες, το συνθετικό αυτό αέριο είχε κατά τα πειράματα σύσταση μέχρι και (50% κ.β.) σε υδρογόνο. Η ιδέα αυτή του πρωτοπόρου εφευρέτη δεν έγινε τελικά πράξη, και στάθηκε κυρίως στην επιτυχημένη του μηχανή με την χρήση βενζίνης. Παρόλα αυτά το υδρογόνο χρησιμοποιούταν ευρέως σαν αέριο καύσιμο την εποχή εκείνη σε εφαρμογές, όπως ως καύσιμο άνωσης μεγάλων αερόπλοιων υδρογόνου που τότε κατασκευάζονταν εκτεταμένα, σε διαστημικά προγράμματα της NASA, με τα οποία τροφοδοτούσε με ενέργεια τα διαστημικά της οχήματα.

Για κάποια χρονική περίοδο η χρήση του υδρογόνου ως αέριο καύσιμο έβρισκε πρακτική εφαρμογή. Κατά την περίοδο της δεκαετίας του ('30) η χρήση του υδρογόνου μειώθηκε σε μεγάλο βαθμό, λόγω το προβλημάτων του κατά την καύση του και των ατυχημάτων που είχαν προκληθεί, αποτέλεσμα την εγκατάλειψή του για κάποια χρονική περίοδο περί τα μέσα της δεκαετία του ('60), και την επανένταξη του ξανά μετά από έρευνες σε διαστημικά προγράμματα της NASA.

Από τα τέλη της δεκαετίας του '60 οι έρευνες σχετικά με το υδρογόνο στις Μ.Ε.Κ., άρχισαν να επεκτείνονται σε ικανοποιητικό βαθμό, μεγάλες αυτοκινητοβιομηχανίες παγκοσμίου φήμης, όπως (π.χ. **NISSAN, MAZDA, HYUNDAI, TOYOTA, FORD, BMW** κ.λπ.), έχουν αρχίσει να σχεδιάζουν μεταφορικά οχήματα τροφοδοτούμενα από Μ.Ε.Κ. υδρογόνου και μερικές από αυτές να έχουν ήδη βγάλει στην παραγωγή οχήματα που κινούνται με ΜΕΚ υδρογόνου. Θετικό αποτελεί το γεγονός ότι οι ΜΕΚ υδρογόνου δεν παρουσιάζουν ιδιαίτερες τροποποιήσεις στον σχεδιασμό, σε σχέση με τις κοινές ΜΕΚ. βενζίνης και

πετρελαίου, πράγμα που βοηθάει στην γρήγορη εξέλιξη της τεχνολογίας αυτής και την πρακτική της εφαρμογή.

Στην παρακάτω εικόνα απεικονίζεται το μοντέλο RX-8 Renesis της αυτοκινητοβιομηχανίας Mazda, που παρουσιάστηκε το (2003) στην έκθεση αυτοκινήτου του Τόκιο.[27]



**Εικόνα 20: Το μοντέλο RX-8 Renesis της αυτοκινητοβιομηχανίας Mazda, το πρώτο και μοναδικό περιστροφικό υβριδικό αυτοκίνητο υδρογόνου-βενζίνης στον κόσμο, που παρουσιάστηκε στο Τόκιο της Ιαπωνίας το 2003**

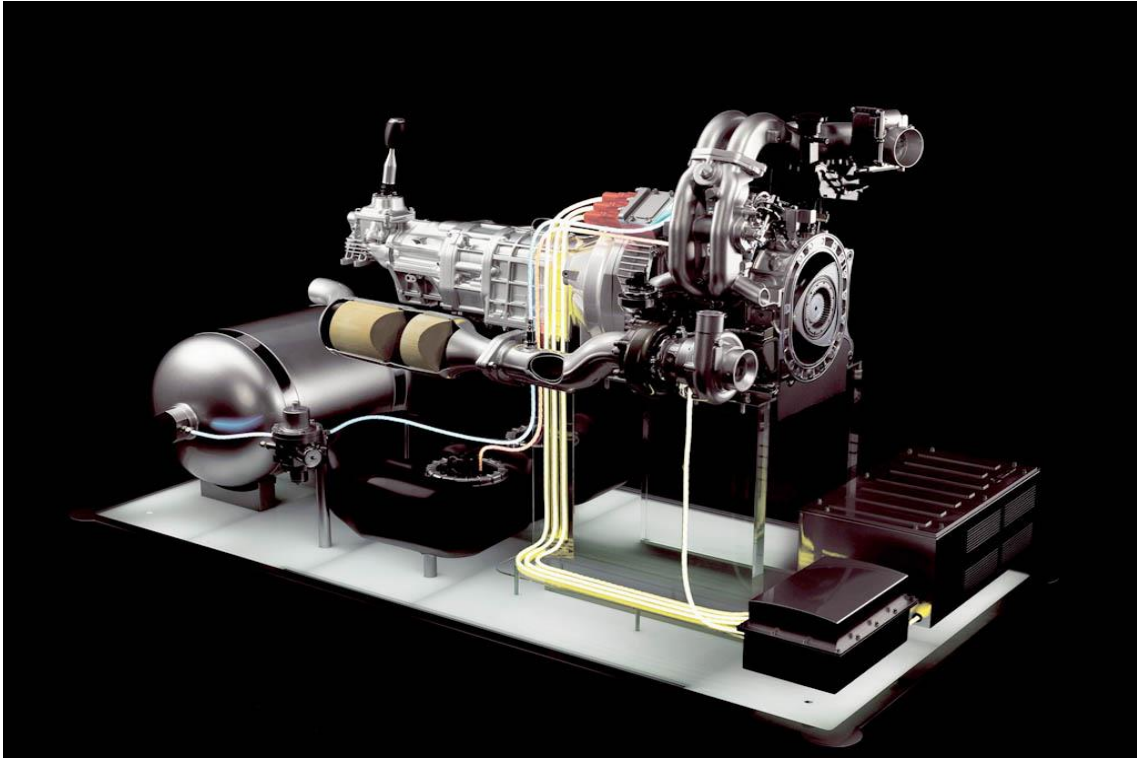


**Εικόνα 21:** Η δεξαμενή αποθήκευσης του καυσίμου υδρογόνου στον χώρο των αποσκευών

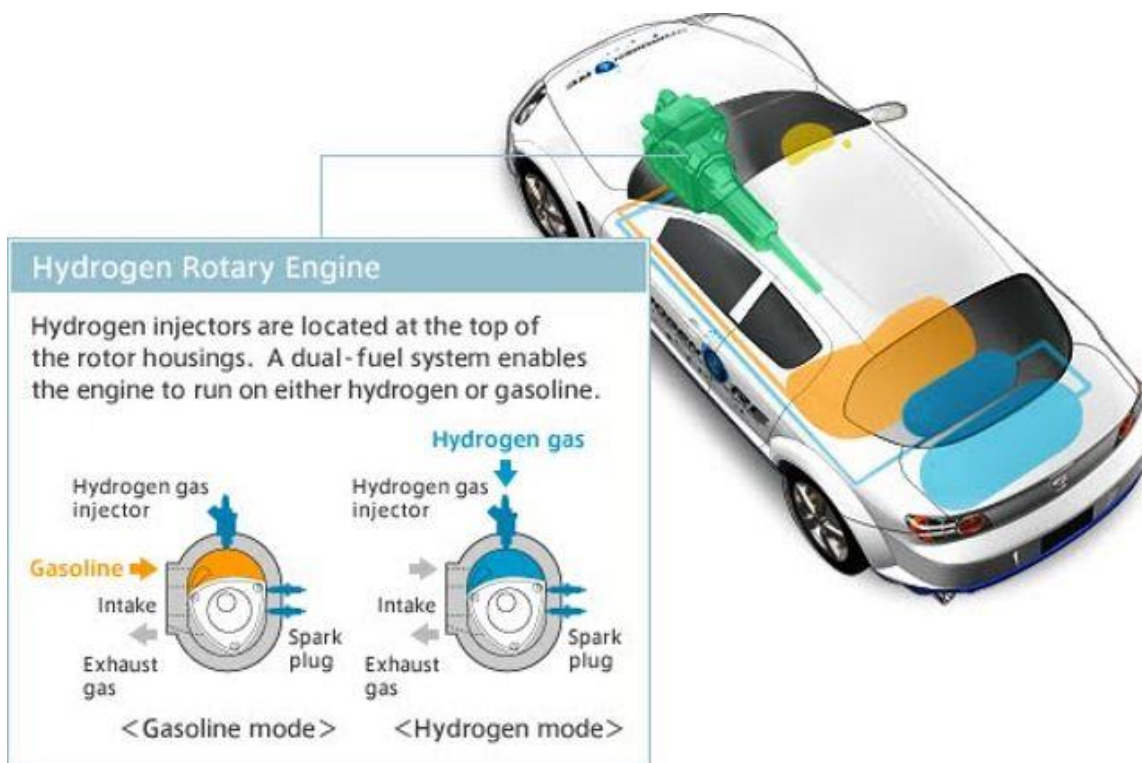


**Εικόνα 22:** Ανεφοδιασμός καυσίμου υδρογόνου, μέσω του σωλήνα πλήρωσης





**Εικόνα 23: Απεικόνιση ολόκληρου του μηχανικού συγκροτήματος του μοντέλου RX-8 Renesis, όπου διακρίνεται ο κινητήρας με μέγιστη ισχύ τα: 80 kW (107 hp, 109 PS), μέγιστη ροπή 140Nm(103 Lbft) στις 5000 U/min (με χρήση καυσίμου υδρογόνου) και μέγιστη ισχύ τα: 154 kW (206 hp, 210 PS), μέγιστη ροπή 222 Nm (164 Lbft) στις 5000 U/min (με χρήση καυσίμου βενζίνης)**



**Εικόνα 24: Το σύστημα διπλού καυσίμου που επιτρέπει στον κινητήρα να λειτουργεί είτε με υδρογόνο, είτε με βενζίνη**

#### 4.2 Ιδιότητες υδρογόνου και χρήση του στους κινητήρες εσωτερικής καύσης

Το υδρογόνο έχει μοναδικές φυσικές και χημικές ιδιότητες, σε σύγκριση με τα συμβατικά ορυκτά καύσιμα που χρησιμοποιούνται ευρέως στον τομέα των μεταφορών, δηλαδή το συμπιεσμένο φυσικό αέριο (CNG), τη βενζίνη και το ντίζελ.

Η απόδοση του κινητήρα με αυτά τα καύσιμα σε διαφορετικούς τρόπους λειτουργίας κινητήρα συγκρίνεται συνήθως με το υδρογόνο. Ένα από τα πολλά πλεονεκτήματα της χρήσης υδρογόνου στις ΜΕΚ ως καθαρό εναλλακτικό καύσιμο είναι η μηδενική περιεκτικότητά του σε άνθρακα. Αυτό σημαίνει ότι οι εκπομπές με βάση τον άνθρακα, κυρίως CO, CO<sub>2</sub> και αιθάλη, μπορούν να εξαλειφθούν, αφήνοντας τα NO<sub>x</sub> ως το μόνο επιβλαβές υποπροϊόν της καύσης. Με υψηλή ειδική ενεργειακή πυκνότητα, το υδρογόνο μπορεί να παρέχει σχεδόν τρεις φορές περισσότερη ενέργεια κατά μάζα σε σύγκριση με άλλα ορυκτά καύσιμα, που αντικατοπτρίζεται στη χαμηλότερη θερμοαντική του αξία.

Παρακάτω στον πίνακα παραθέτονται οι ιδιότητες καύσης του καυσίμου υδρογόνου, και στην συνέχεια γίνεται ανάλυση κάποιων από αυτών, σε σύγκριση με τα καύσιμα Φυσικού αερίου(CNG), βενζίνης και πετρελαίου. [17]

<b>Ιδιότητα</b>	Υδρογόνο	CNG	Βενζίνη	Πετρέλαιο
Περιεκτικότητα σε άνθρακα (% μάζας)	0	75	84	86
Ελάχιστη θερμογόνος τιμή (MJ/kg)	119.7	45.8	44.8	42.5
Πυκνότητα σε STP (kg/m <sup>3</sup> )	0.089	0.72	730-780	830
Περιεχόμενη ογκομετρικής ενέργειας (MJ/m <sup>3</sup> )	10.7	33	33 x 10 <sup>3</sup>	35 x 10 <sup>3</sup>
Μοριακό βάρος	2.016	16.043	~110	~170
Σημείο βρασμού (°C)	-253.15	-162.15	25-215	180-360
Θερμοκρασία αυτανάφλεξης (°C)	585	540	350	250
Ελάχιστη ενέργεια ανάφλεξης στον αέρα (mJ)	0.02	0.29	0.24	0.24
Στοιχειομετρική αναλογία αέρα/καυσίμου	34.5	17.2	14.7	14.5
Στοιχειομετρικό κλάσμα όγκου στον αέρα (%)	29.53	9.48	~2	-
Απόσταση σβέσης (mm)	0.64	2.1	~2	-
Ταχύτητα φλόγας στον αέρα (m/s)	1.85	0.38	0.37-0.43	0.37-0.43
Συντελεστής διάχυσης στον αέρα (m <sup>2</sup> /s)	$8.5 \times 10^{-6}$	$1.9 \times 10^{-6}$	-	-
Όρια εφλεκτικότητας στον αέρα (vol%)	4-76	5.3-15	1-7.6	0.6-5.5
Θερμοκρασία αδιαβατικής φλόγας (°C)	2206.85	1940.85	2306.85	2026.85

Πίνακας: Ιδιότητες καύσης του υδρογόνου σε σύγκριση με φυσικό αέριο(CNG), βενζίνη και πετρέλαιο.

#### 4.2.1 Ευρύ φάσμα αναφλεξιμότητας

Η ιδιότητα αυτή εκφράζει το ευρύ φάσμα αναφλέξεων που παρουσιάζει το υδρογόνο έναντι των άλλων καυσίμων, κατά την διάρκεια καύσης, για διάφορους λόγους σύστασης μίγματος- αέρα/καυσίμου. Το φάσμα αυτό περιλαμβάνει και πτωχότερα μίγματα από την στοιχειομετρική αναλογία, με πολύ θετικά αποτελέσματα στα θέματα θερμικής απόδοσης, οικονομίας καυσίμου και μείωση των επιβλαβών ρύπων. Παρόλα αυτά ο λόγος αέρα/καυσίμου, θα πρέπει να βρίσκεται σε κάποια αποδεκτά όρια, διότι πολύ πτωχά μίγματα μπορεί να μειώσουν σημαντικά την ισχύ του κινητήρα. [17]

#### **4.2.2 Χαμηλή πυκνότητα και μεγάλη ενέργεια καύσης κατά μάζα**

Το υδρογόνο διαθέτει την πιο μικρή πυκνότητα και την μεγαλύτερη κατά μάζα ενέργεια καύσης, σε σχέση με τα άλλα είδη καυσίμου που παρουσιάζονται στο πίνακα. Στο γεγονός αυτό οφείλεται και ο δύσκολος και δαπανηρός τρόπος συμπίεσης και αποθήκευσης του υδρογόνου και η μη τόσο ευρεία χρήση του γενικά ως καύσιμο στις ΜΕΚ. [17]

#### **4.2.3 Υψηλή θερμοκρασία αυτανάφλεξης**

Η ιδιότητα αυτή προσδιορίζει την υψηλή θερμοκρασία αυτανάφλεξης του καυσίμου υδρογόνου σε σχέση με τα άλλα καύσιμα. Η θερμοκρασία αυτή είναι της τάξης περίπου των (584 °C) και συμβάλει θετικά για τις ΜΕΚ υδρογόνου για τον υψηλό βαθμό συμπίεσεως που μπορεί να επιτευχθεί κατά την λειτουργία τους. Ο βαθμός συμπίεσης είναι ένα από τα πιο βασικά χαρακτηριστικά των ΜΕΚ, και για την περίπτωση του υδρογόνου όπου είναι υψηλός, παρέχει στο σύστημα υψηλό βαθμό απόδοσης και ισχύος. [17]

#### **4.2.4 Ελάχιστη ενέργεια ανάφλεξης**

Η ιδιότητα αυτή προσδιορίζει την ευκολία ανάφλεξης που παρουσιάζει το υδρογόνο σε σχέση με τα άλλα καύσιμα, με χαμηλά ποσά ενέργειας (πτωχά μίγματα) και εξίσου καλή ποιότητα καύσης ακόμα και κατά το ζέσταμα του κινητήρα. Στην ιδιότητα αυτή όμως ένα μέρος βασίζεται και το φαινόμενο της προανάφλεξης (backfire) στα θερμά τμήματα του κινητήρα με αποτέλεσμα τις πιθανότητες ανεπιθύμητων προαναφλέξεων. [17]

#### **4.2.5. Απόσταση σβέσης**

Απόσταση σβέσης είναι η απόσταση από τα τοιχώματα του κυλίνδρου στην οποία αποσβένεται το σημείο του αναφλεγέντος μίγματος λόγω θερμικών απωλειών, είναι σημαντική για την απόδοση της ΜΕΚ υδρογόνου εφόσον επιτρέπει στο μέτωπο

της καύσης να διανύσει μεγαλύτερη απόσταση πριν αυτό σβηστεί κοντά στα τοιχώματα του κυλίνδρου. Έτσι πραγματοποιείται καλύτερη και πιο ομοιογενής καύση του μείγματος υδρογόνου σε σχέση με το μείγμα βενζίνης πριν η καύση εκτονωθεί λόγω θερμικών απωλειών. Αρνητικό είναι το γεγονός ότι η κατάσταση αυτή δημιουργεί τις συνθήκες για το φαινόμενο της αυθόρμητης αυτανάφλεξης (backfire). [17]

#### **4.2.6. Υψηλός συντελεστής διάχυσης**

Η μεγάλη ταχύτητα διάχυσης που παρουσιάζει το υδρογόνο αποτελεί σημαντικό ως προς της ισορροπία που παρουσιάζει ως καύσιμο μίγμα στο θάλαμο καύσης και για την περίπτωση πολύ πτωχών μιγμάτων, αλλά και την ασφάλεια που εξασφαλίζει έναντι της βενζίνης για παράδειγμα, σε περίπτωση διαρροής καυσίμου από την δεξαμενή προς τον περιβάλλον, με το υδρογόνο να παρουσιάζει ταχύτατο διασκορπισμό προς τον ατμοσφαιρικό αέρα, όπου και λιγότερες πιθανότητες για μεγάλη έκρηξη του οχήματος. [17]

#### **4.2.7. Μεγάλη ταχύτητα καύσης**

Η ιδιότητα αυτή περιγράφει την σχετική ταχύτητα διάδοσης της φλόγας σε σχέση με το άκαυστο μίγμα αέρα/υδρογόνου. Η ταχύτητα καύσης του υδρογόνου είναι εξαιρετικά γρήγορη, ακόμη και σε μικρότερες αναλογίες πέρα από την στοιχειομετρική. Παρουσιάζει ταχύτερη καύση σε σχέση με τα άλλα καύσιμα, καλή λειτουργία του κινητήρα στις υψηλές στροφές και υψηλό βαθμό απόδοσης. Μειονέκτημα της καύσης πτωχών μιγμάτων αποτελεί η μείωση της Ιπποδύναμης του κινητήρα σε σχέση κυρίως με τους κινητήρες βενζίνης, για τον ίδιο μέγεθος κινητήρα και τον όγκο που μπορεί να εισέλθει σε αυτόν. [17]

### **4.3. Καύση του υδρογόνου σε ΜΕΚ**

Η κατασκευή των κινητήρων υδρογόνου είναι παρόμοια με αυτή των συνηθισμένων κινητήρων εσωτερικής καύσης. Κατά την καύση του στοιχείου υδρογόνου σε συνδυασμό με την ανάμιξή του με τον ατμοσφαιρικό αέρα οδηγεί στην παραγωγή νερού (έκλυση ατμού) και στην ταυτόχρονη παραγωγή ενέργειας (έκλυση θερμότητας), με αποτέλεσμα την παραγωγή ωφέλιμου μηχανικού έργου, μέσω τον μηχανικό διατάξεων και την αξιοποίηση αυτού κατάλληλα. Πολύ σημαντικό αποτελεί το γεγονός κατά την διαδικασία της καύσης ο παραγόμενος ατμός που εκλύεται προς

το περιβάλλον μετατρέπεται σε νερό, γίνεται δηλαδή μια κυκλική διαδικασία ανανέωσης του νερού, όπου αυτό σημαίνει πως η χρήση του υδρογόνου στις ΜΕΚ αποτελεί θεωρητικά μια πλήρως ανανεώσιμη πηγή ενέργειας, χωρίς ρύπους και υψηλής ενεργειακής απόδοσης. Για την πλήρη καύση του υδρογόνου, η αναλογία μάζας αέρα/καυσίμου πρέπει να είναι 1:34, δηλαδή 1 μέρος υδρογόνου πρέπει να συνδυαστεί με 34 μέρη αέρα στον κύλινδρο. Το υδρογόνο αποτελεί περίπου το 30% του θαλάμου καύσης υπό στοιχειομετρικές συνθήκες. Βέβαια σε ορισμένες περιπτώσεις, κυρίως στις ΜΕΚ, η πραγματική απόδοση δεν είναι πάντα η ιδανική. Και αποτέλεσμα αυτού είναι η δημιουργία κάποιων ανεπιθύμητα υποπροϊόντα καύσης που παράγονται, που και σε συνδυασμό με χημικές αντιδράσεις που πραγματοποιούνται προκύπτουν οξειδία του αζώτου, μονοξείδιο του άνθρακα CO, διοξείδιο του άνθρακα CO<sub>2</sub> και ορισμένες ποσότητες από άκαυστους υδρογονάνθρακες που προκύπτουν από τα προϊόντα λίπανσης του κινητήρα. Οι παραγόμενοι αυτοί ρύποι δεν θα πρέπει να αποτελούν έντονο προβληματισμό. Και ειδικότερα σε σχέση με τους συμβατικούς ΜΕΚ βενζίνης και πετρελαίου που τα υποπροϊόντα από την καύση τους ξεπερνούν σε πολύ μεγαλύτερο βαθμό τις ποσότητες ρύπων που αποβάλλουν, σε σχέση με τους ΜΕΚ υδρογόνου. [27], [18]

#### **4.4. Παράγωγα καύσης στις ΜΕΚ υδρογόνου και σύγκριση με άλλα καύσιμα**

Οι πιο επικίνδυνοι ρύποι που παράγονται από τους βενζινοκινητήρες είναι οι υδρογονάνθρακες(HC), το μονοξείδιο του άνθρακα(CO) και οξειδία του αζώτου (NOx).Το υδρογόνο έχει μια σειρά από μοναδικές ιδιότητες καύσης που βοηθούν στην πλήρη καύση της βενζίνης. Οι κινητήρες ντίζελ παράγουν πιο επικίνδυνες εκπομπές όπως οξειδία του αζώτου (NOx), άκαυστους υδρογονάνθρακες (UHC), μονοξείδιο του άνθρακα (CO) και αιθάλη. Αυτοί οι ρύποι έχουν τη δυνατότητα να επηρεάσουν την ανθρώπινη υγεία και το περιβάλλον. Οι κινητήρες ντίζελ εκπέμπουν επίσης περισσότερους ρύπους από οποιονδήποτε άλλο τύπο κινητήρα στον κόσμο, γεγονός που τους καθιστά σημαντική πηγή ατμοσφαιρικής ρύπανσης.

Το υδρογόνο χρησιμοποιείται ως καύσιμο σε κινητήρες επειδή μειώνει τους ρύπους. Στην πραγματικότητα, οι επικίνδυνες χημικές ουσίες δεν παράγονται ως αποτέλεσμα της καύσης υδρογόνου. Διάφορες μελέτες έχουν επικεντρωθεί στη χρήση του υδρογόνου ως καυσίμου στα οχήματα τα τελευταία 30 χρόνια. [18]

##### **4.4.1. Μονοξείδιο του άνθρακα (CO)**

Η εκπομπή μονοξειδίου του άνθρακα (CO) προκαλεί τρύπες στο στρώμα του όζοντος και είναι επικίνδυνη για το περιβάλλον το οποίο προκαλείται από την ατελή καύση στον κινητήρα. Η προσθήκη υδρογόνου σε κινητήρες εσωτερικής καύσης μειώνει την ποσότητα των εκπομπών μονοξειδίου του άνθρακα στους κινητήρες CI και SI.Επειδή το υδρογόνο δεν είναι καύσιμο από υδρογονάνθρακες, καθώς τα μόριά του στερούνται άνθρακα, η αύξηση του κλάσματος μάζας του υδρογόνου στο καύσιμο θα μείωνε τον ρυθμό σύνθεσης υδρογονανθράκων. Επιπλέον, η υψηλή

φλόγα υδρογόνου αυξάνει την πίεση του κυλίνδρου και βελτιώνει την απόδοση καύσης. Λόγω του υψηλού συντελεστή διάχυσης, το υδρογόνο προ-καύσης παράγει ένα πιο ομοιογενές εύφλεκτο μείγμα και βελτιώνει τη διαθεσιμότητα οξυγόνου. Ως αποτέλεσμα αυτών των παραγόντων, η ποσότητα μονοξειδίου του άνθρακα που παράγεται από κινητήρες εσωτερικής καύσης μειώνεται. [18]

#### **4.4.2. Διοξείδιο του άνθρακα (CO<sub>2</sub>)**

Η παραγωγή διοξειδίου του άνθρακα (CO<sub>2</sub>) μπορεί να προκληθεί από έλλειψη οξυγόνου και χαμηλή θερμοκρασία στο θάλαμο καύσης. Αυτό είναι επιβλαβές για το περιβάλλον λόγω της επιρροής του στην υπερθέρμανση του πλανήτη. Ο ρυθμός H/C αυξάνεται όταν χρησιμοποιείται υδρογόνο ως καύσιμο σε κινητήρες εσωτερικής καύσης, με αποτέλεσμα τη μείωση του χρόνου καύσης και αύξηση της απόδοσης καύσης. Το υδρογόνο, από την άλλη, είναι ένα καθαρό καύσιμο που δεν απελευθερώνει CO<sub>2</sub> και, ως εκ τούτου, μειώνει τις εκπομπές CO<sub>2</sub>. [18]

#### **4.4.3. Οξειδία του αζώτου (NO<sub>x</sub>)**

Τα οξειδία του αζώτου παράγονται από τις υψηλές θερμοκρασίες που επιτυγχάνονται κατά τη διαδικασία καύσης στον θάλαμο καύσης. Κάποιο άζωτο στον αέρα συνδυάζεται με οξυγόνο παρουσία θερμότητας. Η αναλογία αέρα/καυσίμου, η αναλογία συμπίεσης, οι στροφές του κινητήρα, ο χρονισμός ανάφλεξης και η θερμική αραίωση έχουν επίδραση στην ποσότητα του παραγόμενου NO<sub>x</sub>. Λόγω των χαρακτηριστικών του όπως η γρήγορη ταχύτητα φλόγας, η χαμηλή ενέργεια ανάφλεξης που απαιτείται και η υψηλή αδιαβατική θερμοκρασία, το υδρογόνο θεωρείται κατάλληλο καύσιμο για καύση. Αυτά τα χαρακτηριστικά συμβάλλουν στην αύξηση της θερμοκρασίας του ρευστού εργασίας στον κύλινδρο καθώς και στην αύξηση των NO<sub>x</sub>. [18]

#### **4.4.4. Άκαυστοι υδρογονάνθρακες (UHC)**

Οι υδρογονάνθρακες που δεν καίγονται εντελώς κατά τη διαδικασία καύσης μέσα στο θάλαμο καύσης θα εκπέμπουν άκαυστους υδρογονάνθρακες (UHC) στα καυσαέρια. Όπως αναφέρθηκε, η προσθήκη υδρογόνου στο καύσιμο θα ομογενοποιήσει το μείγμα και θα αυξήσει την ταχύτητα της φλόγας. Επιπλέον, λόγω της έλλειψης υδρογονανθράκων στο καύσιμο υδρογόνου, η προσθήκη του στα καύσιμα των κινητήρων εσωτερικής καύσης θα μειώσει τις εκπομπές των άκαυστων υδρογονανθράκων. [18]

#### **4.4.5. Αιθάλη**

Οι εκπομπές αιθάλης είναι ειδικά στους κινητήρες ντίζελ. Λόγω της ετερογενούς φύσης της καύσης ντίζελ, υπάρχει μεγάλη κατανομή των αναλογιών

καυσίμου/αέρα εντός του κυλίνδρου. Ο σχηματισμός αιθάλης λαμβάνει χώρα κυρίως στην πλούσια σε καύσιμα ζώνη σε υψηλή θερμοκρασία και υψηλή πίεση. Η αιθάλη είναι χαρακτηριστική για μείγματα καυσίμου-αέρα που είναι πολύ άπαχα για να αυτοαναφλεχθούν ή για να υποστηρίξουν μια αναπτυσσόμενη φλόγα. Μπορεί επίσης να προκληθεί από μείγματα καυσίμου-αέρα που είναι πολύ πλούσια για να αναφλεχτούν. Ο υψηλός συντελεστής εκπομπής υδρογόνου και η μεγάλη πρόσβαση του καυσίμου στο οξυγόνο θα αυξήσει την ομοιογένεια του εύφλεκτου μείγματος και την ποσότητα H/C στο συνολικό καύσιμο, γεγονός που θα μειώσει την αιθάλη στους κινητήρες ντίζελ. [18]

#### 4.5. Φαινόμενα ανώμαλης καύσης στις MEK υδρογόνου

##### 4.5.1. Φαινόμενο αυθόρμητης αυτανάφλεξης ("**backfire**")

Το φαινόμενο αυθόρμητης αυτανάφλεξης ή φαινόμενο ("**backfire**"), αποτελεί ένα πολύ σοβαρό και επικίνδυνο φαινόμενο που παρατηρείται κυρίως στις MEK υδρογόνου.

Ένας από τους λόγους που οι MEK υδρογόνου δεν χρησιμοποιούνται ευρύτατα ευθύνεται και το φαινόμενο ("**backfire**"). Το θερμοχημικό αυτό φαινόμενο λαμβάνει χώρα κατά την διαδικασία της καύσης στον θάλαμο, την στιγμή δηλαδή που το μίγμα εισέρχεται στο εσωτερικό του θαλάμου καύσης παρατηρούνται κάποιες μικροαναφλέξεις (σκασίματα) στην μάζα του μίγματος, με αποτέλεσμα την μη ομαλή καύση του μίγματος και κατ επέκταση του κινητήρα, με πιθανότητα υπό κατάλληλες συνθήκες την δημιουργία έκρηξης του κινητήρα. Το φαινόμενο αυτό θα πρέπει να λαμβάνεται σοβαρά υπόψη τόσο για τις MEK υδρογόνου όσο και για τις MEK συμβατικών καυσίμων, είτε για συστήματα με τεχνολογία ψεκασμού (injection), είτε για σύστημα με εξαερωτήρα (καρμπυρατέρ).

Κάποιες από τις αιτίες εμφάνισης του φαινομένου ("**backfire**") αποτελούν κάποια δομικά σημεία του κινητήρα που μπορεί να έχουν υπερθερμανθεί σε υψηλότερη θερμοκρασία από αυτή του μίγματος, με αποτέλεσμα την πιθανή αυτανάφλεξη του μίγματος και κατ επέκταση την ύπαρξη έκρηξης του κινητήρα. Ένας δεύτερος λόγος ύπαρξης του φαινομένου ("**backfire**") και την δημιουργία μη ομαλής καύσης του μίγματος είναι η ανάπτυξη υψηλότερης θερμοκρασίας των σπινθηριστών (μπουζί) από αυτή του μίγματος, για διάφορους λόγους, με αποτέλεσμα την ανεξέλεγκτη καύση του μίγματος. Επίσης κάποια κατάλοιπα του μίγματος που έχουν παραμείνει στο εσωτερικό του θαλάμου καύσης μετά το κύκλο λειτουργίας, θερμά σημεία των βαλβίδων εξαγωγής και κατάλοιπα από τα προϊόντα λίπανσης του κινητήρα, μπορούν να συμβάλουν στην δημιουργία της ανεπιθύμητης αυτανάφλεξης του μίγματος.



Για το φαινόμενο ("**backfire**")έχουν αναπτυχθεί διάφοροι τρόποι αντιμετώπισης του προβλήματος. Ένας από τους πιο επιτυχημένους, είναι η μείωση της στοιχειομετρικής ποσότητας του μίγματος υδρογόνου/ ατμοσφαιρικό οξυγόνο (περίπου στο μισό) με αρκετά καλά αποτελέσματα. Αυτή η μέθοδος παρουσιάζει βέβαια πιο μειωμένη ισχύς στον κινητήρα, παρόλα αυτά σε κάποιο βαθμό μπορεί να ανακτηθεί ένα ποσοστό από την χαμένη ενέργεια με κατάλληλους χειρισμούς.[27]

#### **4.5.2 Προανάφλεξη (pre-ignition)**

Ένα ακόμη επιπλέον φαινόμενο ανώμαλης καύσης που αφορά τις ΜΕΚ υδρογόνου, αλλά και άλλες, όπως τις ΜΕΚ βενζίνης, είναι το φαινόμενο της προανάφλεξης.

Η προανάφλεξη είναι το φαινόμενο, στο οποίο παρατηρείται έκρηξη του μίγματος κατά την διαδικασία συμπίεσης του μίγματος πριν γίνει η έναυση του καυσίμου από τους σπινθηριστές(μπουζί). Κύρια αιτία εμφάνισης της προανάφλεξης είναι θερμά σημεία στον θάλαμο καύσης, όπως οι ακίδες των σπινθηριστών(μπουζί), μία μη επαρκώς ψυχωμένη βαλβίδα εξαγωγής, αλλά και άλλα πύρινα μηχανικά εξαρτήματα μπορούν να συμβάλουν στην δημιουργία της προανάφλεξης. Η προανάφλεξη καθώς και το χτύπημα του κινητήρα αυξάνουν δραστικά τη θερμοκρασία εντός του θαλάμου καύσης. Αυτό ουσιαστικά διασφαλίζει ότι η εμφάνιση μιας από αυτές τις συνθήκες θα επιφέρει την άλλη. Η προανάφλεξη έχει ως αποτέλεσμα κακή απόδοση του κινητήρα και συχνά συνοδεύεται από σκληρή λειτουργία του κινητήρα. Το πρόβλημα της προανάφλεξης είναι συχνά εύκολο να διορθωθεί και μπορεί να εξαλειφθεί με ελάχιστη προσπάθεια. Η αλλαγή σε ένα ψυχρότερο σπινθηριστή(μπουζί) λειτουργίας μπορεί να συμβάλει θετικά στην εξάλειψη του φαινομένου της προανάφλεξη σε έναν κινητήρα. Επίσης ένα διορθωμένο μείγμα αέρα-καυσίμου μπορεί επίσης να διορθώσει τις περισσότερες συνθήκες προανάφλεξης. Επίσης, ο καθαρισμός των θαλάμων καύσης από εναποθέσεις περιορίζει το φαινόμενο της προαναφλέξεως.[27], [32]

#### **4.5.3 Κρουστική καύση (Knocking)**

Κρουστική καύση είναι το φαινόμενο που παρατηρείται στους κινητήρες Otto, κατά το οποίο μια αρχικά ομαλά εξελισσόμενη καύση του μίγματος, μεταβαίνει ακαριαία σε μια εκρηκτικής μορφής καύση ολόκληρου του υπόλοιπου άκαυστου μίγματος. Η δημιουργία του φαινομένου αυτού,οφείλεται στην εκτεινόμενη «εκτοπιστική» συμπίεση, κατά την οποία το άκαυστο μίγμα περιορίζεται σε συνεχώς μικρότερο χώρο από το μέτωπο της κανονικής φλόγας κι'ετσι αυξάνεται η θερμοκρασία του (μεγαλύτερη από αυτή που υπάρχει στη φάση της συμπίεσης),

οπότε το άκαυστο μίγμα αυτανάφλεγεται. Η αυτανάφλεξη του άκαυστου μίγματος προκαλεί μια τοπική ανύψωση της πίεσης και της θερμοκρασίας. Αυτή η τοπική ανύψωση της πίεσης έχει ως αποτέλεσμα η πίεση να διαδίδεται ταχύτερα από τη θερμότητα. Τα κύματα πίεσης διαδίδονται ταχύτατα και ανακλώνται στα τοιχώματα του κυλίνδρου, με συνέπεια το μεταλλικό ήχο (πειράκια).

Η αύξηση της πίεσης και της θερμοκρασίας συντελούν στην αύξηση της μεταφοράς της θερμότητας από τα τοιχώματα του κυλίνδρου, με αποτέλεσμα τη μείωση του βαθμού απόδοσης και την αύξηση της κατανάλωσης καυσίμου. Λόγω των ισχυρών δυνάμεων που αναπτύσσονται και τα βίαια ωστικά κύματα, τα μηχανικά μέρη (βαλβίδες, έμβολα, έδρανα, άξονες κλπ.) καταπονούνται και φθείρονται πάρα πολύ με αποτέλεσμα την καταστροφή του κινητήρα. Σημαντικό αποτελεί το γεγονός πως η θερμοκρασία αυτανάφλεξης του υδρογόνου (584 °C) είναι σημαντικά μεγαλύτερη από την αντίστοιχη της βενζίνης (200-250 °C) και επομένως η καύση του υδρογόνου επιτρέπει τη λειτουργία του κινητήρα σε υψηλότερους βαθμούς συμπίεσης χωρίς την εμφάνιση κρουστικής καύσης.[24], [38]

#### **4.6. Μέθοδοι έγχυσης υδρογόνου στις ΜΕΚ**

Για την επίλυση πολλών προβλημάτων, όπως η χαμηλή ισχύς εξόδου, οι υψηλές εκπομπές NOx και η ακανόνιστη καύση, απαιτούνται διάφορες αλλαγές στο σύστημα παροχής καυσίμου και στο σύστημα καύσης. Ως αποτέλεσμα, διερευνήθηκαν δύο τεχνικές έγχυσης καυσίμου προκειμένου να προσδιοριστεί η δυνατότητά τους ως κυψέλες καυσίμου, οι οποίες είναι:

- Δια θυρίδας –Port Fuel Injection (PFI)
- Άμεσης έγχυσης στον θάλαμο – Direct Injection (DI)

Οι μέθοδοι ανάφλεξης των κινητήρων υδρογόνου PFI συνήθως χρησιμοποιούν εκκένωση σπινθήρα, λειτουργία διπλού καυσίμου με πιλοτικό ντίζελ DI ή με αυτόματη ανάφλεξη με συμπίεση ομοιογενούς φορτίου (HCCI).Οι κινητήρες με DI υδρογόνου χρησιμοποιούν συνήθως ανάφλεξη με υποβοήθηση σπινθήρα ή με υποβοήθηση θερμής επιφάνειας (δηλ. μπουζί).Αυτή η μέθοδος έγχυσης καυσίμου διαθέτει επίσης τη δυνατότητα να χρησιμοποιεί διπλό καύσιμο, με το υδρογόνο να ανάφλεγεται από ένα περιβάλλον υψηλής θερμοκρασίας που δημιουργείται από την πιλοτική καύση καυσίμου ντίζελ, γνωστή ως λειτουργία H2DDI. [17]

##### **4.6.1. Έγχυση υδρογόνου δια θύρας (PFI)**

Το PFI είναι μια ευρέως διαδεδομένη στρατηγική παροχής καυσίμου για κινητήρες με ανάφλεξη μίγματος με σπινθήρα. Το καύσιμο εγχέεται κατά τη διάρκεια της διαδρομής εισαγωγής στη θύρα εισαγωγής ανάντη της βαλβίδας εισαγωγής. Η τροποποίηση του συμβατικού PFI ΜΕΚ σε υδρογόνο περιλαμβάνει μια σχετικά απλή

αντικατάσταση του συστήματος έγχυσης. Ωστόσο, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, αυτή η λειτουργία καύσης κινητήρα που λειτουργεί με καύσιμο υδρογόνου μπορεί να υποφέρει από μια σειρά προβλημάτων, όπως η προανάφλεξη, το χτύπημα και η ανάφλεξη λόγω της χαμηλής ελάχιστης ενέργειας ανάφλεξης και της απόστασης σβέσης του υδρογόνου. Από την άλλη πλευρά, το υδρογόνο εκτοπίζει τον αέρα στην εισαγωγή και επομένως περιορίζει την πυκνότητα ισχύος του κινητήρα. Το PFI αυξάνει επίσης το έργο που απαιτείται κατά τη διάρκεια της διαδρομής συμπίεσης σε σύγκριση με την αργότερη έγχυση υδρογόνου στον θάλαμο καύσης. Αυτοί οι παράγοντες συχνά οδηγούν σε μειωμένη παραγόμενη ισχύ και να επηρεάζεται αρνητικά η απόδοση των κινητήρων με αυτήν την μέθοδο. [17]

#### **4.6.2 Άμεση έγχυση υδρογόνου στον θάλαμο καύσης (DI)**

Μια πολλά υποσχόμενη προσέγγιση για τη βελτίωση της απόδοσης του κινητήρα υδρογόνου είναι η έγχυση υδρογόνου απευθείας στον κύλινδρο κατά τη διάρκεια της διαδρομής της συμπίεσης. Με αυτόν τον τρόπο μπορεί να αποφευχθεί το πρόβλημα της ανάφλεξης της διαμόρφωσης PFI, καθώς ο ψεκασμός καυσίμου συμβαίνει όταν οι βαλβίδες εισαγωγής είναι ήδη εντελώς κλειστές. Το ζήτημα της προανάφλεξης μπορεί επίσης να αποφευχθεί σε κάποιο βαθμό με τη μείωση του χρόνου έκθεσης του μείγματος υδρογόνου σε θερμά σημεία. Η απώλεια ογκομετρικής απόδοσης για το PFI λόγω της μετατόπισης του αέρα από το υδρογόνο, όπως συζητήθηκε παραπάνω, δεν αποτελεί πλέον πρόβλημα, εάν η έγχυση συμβεί αφού κλείσουν οι βαλβίδες εισαγωγής. Με την καθυστερημένη έγχυση καυσίμου κατά τη διάρκεια της διαδρομής συμπίεσης, απαιτείται υψηλή πίεση ψεκασμού (δηλαδή  $\geq 100$  bar) για να ξεπεραστεί η αυξημένη πίεση στον κύλινδρο. Ταυτόχρονα, η υψηλότερη πίεση ψεκασμού μπορεί να αυξήσει τον ρυθμό ροής μάζας καυσίμου σε σύγκριση με τον τυπικό PFI χαμηλής πίεσης, το οποίο μπορεί να παρέχει υψηλότερη ενέργεια εισόδου για την ίδια διάρκεια ψεκασμού, για να οδηγήσει σε λειτουργία υψηλού φορτίου. Ως εκ τούτου, ένας αριθμός μελετών απέδειξε ότι η άμεση έγχυση υψηλής πίεσης υδρογόνου υψηλού φορτίου (HPDI), υπό βέλτιστες συνθήκες λειτουργίας, μπορεί να επιτύχει παρόμοια απόδοση με τους παραδοσιακούς κινητήρες ντίζελ. Το HPDI επιτρέπει επίσης πολύ ευέλικτη λειτουργία του κινητήρα λόγω των πολλών παραμέτρων ρύθμισης, για παράδειγμα πίεσης ψεκασμού, διάρκειας ψεκασμού, χρονισμού ανάφλεξης και προσανατολισμού του μπεκ, που μπορούν να ρυθμιστούν για βελτιστοποίηση της απόδοσης του κινητήρα. Ωστόσο, η υψηλή θερμοκρασία αυτανάφλεξης του υδρογόνου πρέπει ακόμη να ξεπεραστεί.

Αν και η ιδέα του κινητήρα υδρογόνου άμεσης έγχυσης με σπινθήρα μετριάζει αρκετά ζητήματα της διαμόρφωσης PFI, η απόδοση εξακολουθεί να είναι κατώτερη από τους σύγχρονους κινητήρες ντίζελ με ανάφλεξη συμπίεσης (CI). Αυτό μπορεί εν μέρει να αποδοθεί στον περιορισμό της κρούσης και της προανάφλεξης, που περιορίζουν την αναλογία συμπίεσης που ισχύει για αυτόν τον τρόπο καύσης. Επίσης, η φάση της καύσης μπορεί να μην είναι βέλτιστη, καθώς ο αριθμός των πυρήνων καύσης σε αυτήν τη λειτουργία καύσης περιορίζεται συνήθως από ένα μόνο μπουζί στον κινητήρα, οδηγώντας σε πιο αργή καύση πρώιμου σταδίου.

Επομένως, οι πίδακες υδρογόνου από έναν εγχυτήρα πολλαπλών ακροφυσίων δεν μπορούν να αναφλέγουν ταυτόχρονα, περιορίζοντας την ταχύτητα καύσης. Μια πιθανή προσέγγιση για τον μετριάσμο αυτού του ζητήματος φαίνεται στην έννοια του H<sub>2</sub>DDI διπλού καυσίμου, που χρησιμοποιεί πυρήνες φλόγας από την αυτόματη ανάφλεξη καθορισμένου καυσίμου για την ανάφλεξη των πίδακες υδρογόνου. [17]

#### **4.7. Βαθμός απόδοσης των MEK υδρογόνου**

Ο βαθμός απόδοσης μιας MEK υδρογόνου και γενικά για οποιαδήποτε MEK αποτελεί σημαντική παράμετρο, ο οποίος μας δείχνει σε τι κατάσταση βρίσκεται ο κινητήρας μας, ως προς το να αποδίδει το μέγιστο δυνατό μηχανικό έργο. Σημαντικά χαρακτηριστικά για τον προσδιορισμό του αποτελούν:

**1. Η σχέση συμπίεσης ή βαθμός συμπίεσης των κινητήρων**, είναι ένα από τα βασικά χαρακτηριστικά τους, γιατί προσδιορίζει την απόδοσή τους και την ποιότητα καυσίμου που μπορούν να χρησιμοποιήσουν. Η σχέση συμπίεσης είναι ο λόγος του όγκου που καταλαμβάνει το μίγμα του καυσίμου, όταν το έμβολο βρίσκεται στο Κ.Ν.Σ., δια του όγκου στον οποίο συμπιέζεται το ίδιο μίγμα, όταν το έμβολο έρχεται στο Α.Ν.Σ

**2. Η Επί τοις εκατό βάρος κατά βάρος (% w/w ή % κ.β.) σύσταση μίγματος καυσίμου και ατμοσφαιρικού αέρα που δαπανάται στον θάλαμο καύσης**

Πρακτικά αν υπολογίσουμε τους βαθμούς απόδοσης, τόσο για τις MEK υδρογόνου, όσο και για τις MEK με συμβατικά καύσιμα (βενζίνη, πετρέλαιο), για ίδιους λόγους συμπίεσης και τις ίδιες (% w/w ή % κ.β.) συστάσεις καυσίμων θα παρατηρήσουμε ελάχιστες αποκλίσεις μεταξύ MEK υδρογόνου και συμβατικών MEK. Όμως μια απόκλιση υπάρχει, με τις MEK υδρογόνου να παρουσιάζουν λίγο μεγαλύτερο βαθμό απόδοσης. Επίσης ένα ακόμη πλεονέκτημα που δίνει προβάδισμα στις MEK υδρογόνου είναι επίτευξη υψηλής απόδοσης ακόμη και με πιο μειωμένα τα χαρακτηριστικά του λόγου συμπίεσης και τοις (% w/w ή % κ.β.) συστάσεις καυσίμων σε σχέση με τις συμβατικές MEK, με τελικό συμπέρασμα την υψηλότερη απόδοση μηχανικού έργου σε σχέση με την απόδοση των συμβατικών MEK με λιγότερη κατανάλωση καυσίμου-υδρογόνου.[27]

#### **4.8. Σύγκριση αυτοκινήτων με συμβατικά καύσιμα, επαναφορτιζόμενες μπαταρίες και κυψέλες καυσίμου με υδρογόνο**

Τα τρία οχήματα που πρόκειται να συγκριθούν σε αυτήν την ενότητα είναι: οχήματα με μηχανές εσωτερικής καύσης, ηλεκτρικά με μπαταρία και με κυψέλες καυσίμου με τροφοδότηση από υδρογόνο. Οι διαφορετικοί τύποι οχημάτων έχουν διαφορετική τεχνολογία ισχύος. Τα οχήματα με κινητήρες εσωτερικής καύσης καίνε καύσιμα (βενζίνη, πετρέλαιο, υγραέριο), τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα με μπαταρία τροφοδοτούνται από επαναφορτιζόμενες μπαταρίες και η ισχύς των ηλεκτρικών οχημάτων κυψελών καυσίμου βασίζεται σε υδρογόνο και κυψέλες καυσίμου.

Η κυψέλη καυσίμου και η επαναφορτιζόμενη μπαταρία λειτουργούν με παρόμοιο τρόπο, μετατρέποντας τη χημική ενέργεια σε ηλεκτρική ενέργεια. Αυτές οι ηλεκτροχημικές αντιδράσεις είναι ελεγχόμενες και δεν παράγουν ρύπους. Ωστόσο, η αποθήκευση του καυσίμου είναι διαφορετική. Μια μπαταρία αποθηκεύει εσωτερικά τη χημική ένωση και τη μετατρέπει σε ηλεκτρική ενέργεια. Από την άλλη πλευρά, η χημική ένωση της κυψέλης καυσίμου, το υδρογόνο, αποθηκεύεται εξωτερικά σε μια δεξαμενή επί του σκάφους.

Οι κινητήρες εσωτερικής καύσης και οι κυψέλες καυσίμου αποθηκεύουν το καύσιμο σε μια δεξαμενή επί του σκάφους. Σε αυτή την περίπτωση διαφέρουν ως προς τον έλεγχο των χημικών αντιδράσεων που λαμβάνουν χώρα. Η καύση της βενζίνης έχει κάποιες ανεξέλεγκτες χημικές αντιδράσεις με αποτέλεσμα πολλών ανεπιθύμητων ενώσεων όπως  $\text{NO}_x$ ,  $\text{SO}_x$ ,... Αυτές οι ενώσεις δεν είναι φιλικές προς το περιβάλλον. Μια άλλη διαφορά είναι η απόδοση του καθενός, μια κυψέλη καυσίμου είναι τρεις φορές πιο αποδοτική από μια παραδοσιακή καύση. Ένας συμβατικός κινητήρας καύσης έχει απόδοση 20%, από την άλλη πλευρά, μια κυψέλη καυσίμου μετατρέπει το 68% της χημικής ενέργειας. Το υδρογόνο που χρησιμοποιείται στα αυτοκίνητα κυψελών καυσίμου μειώνει τα αέρια του θερμοκηπίου κατά 55%-65% σε σύγκριση με το βενζίνης, ακόμη και όταν παράγεται από φυσικό αέριο.

Στον παρακάτω πίνακα εμφανίζονται οι ομοιότητες και οι διαφορές τους:

Χαρακτηριστικό	Είδος αυτοκινήτου		
	Βενζινοκίνητο	Ηλεκτρικό	Κυψέλες καυσίμου με υδρογόνο
Πηγή ισχύος	Κινητήρας Εσωτερικής Καύσης	Επαναφορτιζόμενη μπαταρία	Κυψέλη καυσίμου υδρογόνου
Υποδομή	✓✓	✓	✗
Αυτονομία αποστάσεων	✓	✗	✓✓
Μικρός χρόνος εφοδιασμού καυσίμων	✓	✗	✓
Διαθεσιμότητα αγοράς	✓✓	✓	✗
Οικολογικά φιλικό	✗	✓	✓
Αθόρυβη λειτουργία	✗	✓	✓
Γρήγορη και ομαλή επιτάχυνση	✗	✓	✓
Υψηλή απόδοση καυσίμου	✗	✓	✓✓
Κίνητρα αγοράς	✗	✓	✓

Επομένως, παρατηρείται ότι τα υπάρχον αυτοκίνητα με μηχανές εσωτερικής καύσης είναι ευρέως διαδεδομένα με σχετικά καλή αυτονομία χιλιομέτρων, αλλά είναι επιβλαβή για το περιβάλλον και δεν μετατρέπουν μεγάλο ποσοστό του καυσίμου σε ωφέλιμο φορτίο. Εν αντίθεση, το ηλεκτρικό δεν έχει αυτονομία και απαιτεί πολλές ώρες για να φορτίσει την μπαταρία του, αλλά έχει σχεδόν μηδενικούς ρύπους και καλύτερη απόδοση. Σε σχέση με τις κυψέλες καυσίμου με υδρογόνο, δεν υπάρχουν αρκετές υποδομές(πρατήρια εφοδιασμού υδρογόνου, χαμηλή παραγωγή αυτοκινήτων), είναι ακριβά και επιπλέον, αποκτούν όλα τα θετικά των ηλεκτρικών με περισσότερα χιλιόμετρα, πολύ πιο γρήγορο εφοδιασμό υδρογόνου(σχεδόν 5 λεπτά για 400χλμ) και έχουν σχεδόν την διπλάσια απόδοση (όσον αναφορά με τις κυψέλες καυσίμου). [16]



## 5. Πρωτότυπα μοντέλα και εξελίξεις

### 5.1. BMW Hydrogen 7 (2007)

Η γερμανική αυτοκινητοβιομηχανία BMW Group γράφει μοναδική ιστορία στον κόσμο της αυτοκίνησης, παρουσιάζοντας το BMW Hydrogen 7, το πρώτο πολυτελές σαλόνι με υδρογόνο με σχεδόν μηδενικές εκπομπές ρύπων στον κόσμο, κατάλληλο για καθημερινή χρήση. Με αυτό το νέο μοντέλο, η αυτοκινητοβιομηχανία υποστηρίζει ότι είναι το πρώτο αυτοκίνητο με χρήση υδρογόνου και έτοιμο για μαζική παραγωγή με αποτέλεσμα να αποτελεί ορόσημο για την νέα εποχή βιώσιμης κινητικότητας.



Εικόνα 25: BMW Hydrogen 7 (2007)

Το BMW Hydrogen 7 τροφοδοτείται από έναν κινητήρα εσωτερικής καύσης υδρογόνου και έχει περάσει από την πλήρη διαδικασία εξέλιξης της σειράς. Το BMW Hydrogen 7 είναι μια επαναστατική εξέλιξη στο σύνολο της Σειράς 7 της BMW. Ο κινητήρας, η ανάρτηση και το αμάξωμα αυτού του νέου μοντέλου βασίζονται στη συνολική φιλοσοφία του οχήματος που μεταφέρθηκε από τις BMW 760i και BMW 760Li Sedan. Ταυτόχρονα, το BMW Hydrogen 7 διαθέτει μια δωδεκακύλινδρη μονάδα καύσης διπλής λειτουργίας, ικανή να λειτουργεί τόσο με



Εικόνα 26: Ο δωδεκακύλινδρος κινητήρας του BMW Hydrogen 7



υδρογόνο όσο και με συμβατική βενζίνη. Η μέγιστη ισχύς είναι 191 kW/260 hp, επιταχύνοντας το Hydrogen Saloon της BMW στα 100 km/h σε 9,5 δευτερόλεπτα. Η τελική ταχύτητα της BMW Hydrogen 7, με τη σειρά της, περιορίζεται ηλεκτρονικά στα 230 km/h ή 143 mph.

Με τη φιλοσοφία διπλής λειτουργίας κίνησης, η BMW Hydrogen 7 απαιτεί όχι μόνο ένα ειδικό σύστημα διαχείρισης κινητήρα και τροφοδοσίας καυσίμου, αλλά και δύο διαφορετικές δεξαμενές καυσίμου ενσωματωμένες στο αυτοκίνητο. Το ρεζερβουάρ υδρογόνου στο BMW Hydrogen 7 καταλαμβάνει περίπου 8 κιλά (περίπου 170 λίτρα) υγρού υδρογόνου, και η συμβατική δεξαμενή βενζίνης έχει όγκο 74 λίτρα. Επειδή το υδρογόνο βρίσκεται σε κρυσταλλική μορφή, το ρεζερβουάρ έχει διπλά τοιχώματα με πολλά στρώματα αλουμινίου και ινών γυαλιού στο ενδιάμεσο διάστημα, με πάχος 30 χιλιοστών ή σχεδόν 1,2 ίντσες, προκειμένου να αποφευχθούν υψηλότερες θερμοκρασίες που εισέρχονται στο ρεζερβουάρ. Το εξαιρετικά αποδοτικό μονωτικό αποτέλεσμα που προσφέρει η δεξαμενή εξασφαλίζεται επίσης από ένα κενό στο ενδιάμεσο τμήμα μεταξύ των δύο τοιχωμάτων, αποφεύγοντας κάθε είδους μεταφορά θερμότητας από τον αέρα. Και τελευταίο αλλά εξίσου σημαντικό, οι βάσεις που συγκρατούν το εσωτερικό δοχείο στη θέση τους είναι κατασκευασμένες από πλαστικές ταινίες ενισχυμένες με ανθρακονήματα που μειώνουν τη θερμική αγωγιμότητα στο ελάχιστο. Με την χρήση του υδρογόνου ως καύσιμο στον κινητήρα, επιτυγχάνει αυτονομία 200χλμ. [23]



**Εικόνα 27: Η δεξαμενή του υγρού υδρογόνου στον χώρο αποσκευών του αυτοκινήτου**

## 5.2. Toyota Corolla Sport (2021)

Η Toyota, τον Απρίλιο του 2021, ανακοίνωσε ότι αναπτύσσει κινητήρα εσωτερικής καύσης αποκλειστικά με υδρογόνο, που όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, είναι μια τεχνολογία που θα έχει σχεδόν μηδενικούς ρύπους διοξειδίου του άνθρακα (CO<sub>2</sub>). Επιπλέον, η Toyota χρησιμοποίησε τον κινητήρα αυτόν σε ένα Toyota Corolla Sport διαμορφωμένο για τον 24-ώρο αγώνα αντοχής που διεξήλθε τον Μάιο του 2021. Αυτή η εξέλιξη οδηγήθηκε από την ιαπωνική βιομηχανία Toyota με τον υπεύθυνο της εταιρίας, Akio Toyoda, να δηλώνει ότι θέλησε να εξερευνήσει την δοκιμασία χρήσης κινητήρων εσωτερικής καύσης με υδρογόνο, που πιστεύει ότι είναι μια κρυμμένη «δύναμη» για την εξέλιξη του μηχανοκίνητου αθλητισμού. Μέσω αυτού του αγώνα, θέλησε να δείξει ότι τα αυτοκίνητα με την χρήση του υδρογόνου ως καύσιμο είναι ασφαλή και αξιόπιστα.



Εικόνα 28: Το αγωνιστικό όχημα Toyota Corolla Sport (2021) του αγώνα αντοχής

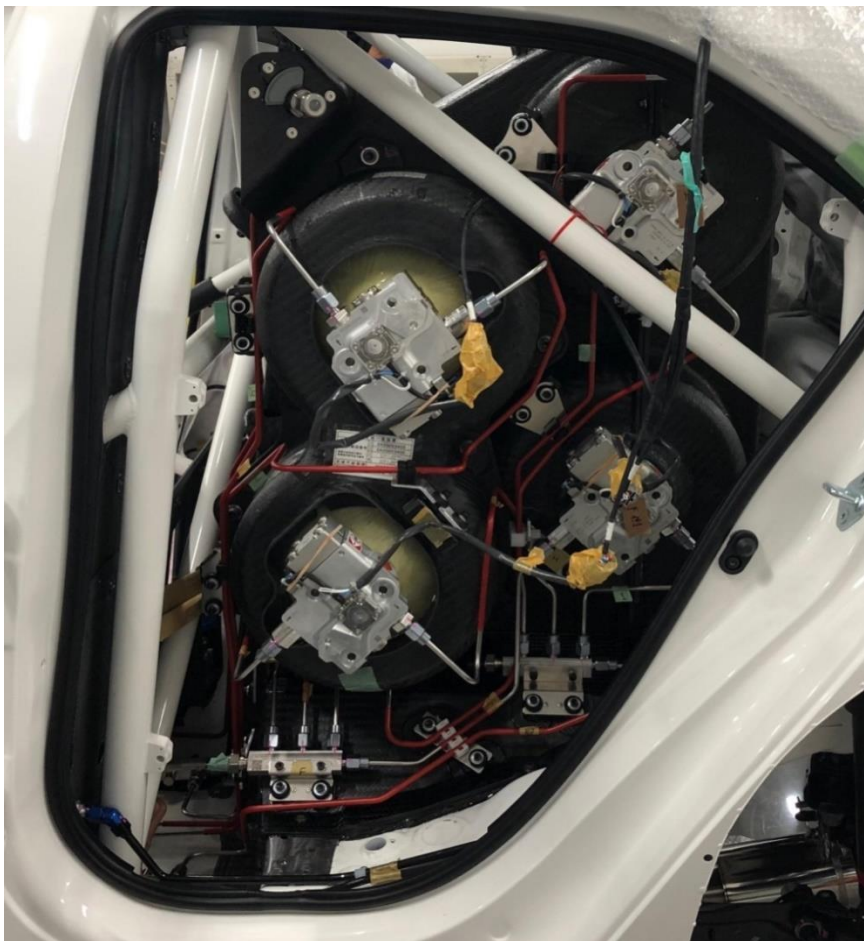
Το Toyota Corolla Sport τροφοδοτείται από έναν υπερπληρωμένο 1.6L τρικύλινδρο κινητήρα που προέρχεται από το Toyota GR Yaris και έχει μετατραπεί για την χρήση του υδρογόνου ως καύσιμο. Έχει δεξαμενή για αποθήκευση συμπιεσμένου αέριου υδρογόνου στα (700bar/10.000 psi). Ο κινητήρας δουλεύει όπως ένας συμβατικός κινητήρας βενζίνης, είναι τετράχρονος, το υδρογόνο εγχέεται άμεσα στον θάλαμο καύσης (Direct-Injection) και αναφλέγεται με σπινθήρα (Spark-Ignition).

Αυτό που θέλουν να καταφέρουν στην Toyota είναι η μέγιστη χρήση της ήδη υπάρχουσας τεχνολογίας για τις μηχανές εσωτερικής καύσης για να βοηθήσει στην μετατροπή κινητήρων για χρήση του υδρογόνου ως καύσιμο. Επιπλέον, αυτός είναι ο πρώτος κινητήρας που χρησιμοποιήθηκε σε αγωνιστικό αυτοκίνητο και ολοκλήρωσε τον αγώνα αντοχής με χρήση του υδρογόνου αποκλειστικά ως καύσιμο. Είχαν πραγματοποιηθεί και άλλες προσπάθειες με κινητήρα διπλού καυσίμου (50% βενζίνη

– 50% υδρογόνο) το 2016, και από εκεί αποκλειστικά με υδρογόνο υπήρχαν θέματα αξιοπιστίας του κινητήρα. Επομένως, αυτό ήταν δύσκολο να πραγματοποιηθεί, και υπάρχουν αρκετοί παράγοντες που έκαναν αυτόν το στόχο πραγματικότητα.

Πρώτον, με την εξέλιξη στους εγχυτήρες καυσίμου, κατάφεραν την βέλτιστη έγχυση του αέριου υδρογόνου στον θάλαμο καύσης με αποτελεσματικότητα και σταθερότητα στην καύση. Συνδυάζοντας και την τεχνολογία της άμεσης έγχυσης της Toyota, επιτύγχανε τον έλεγχο της σταθερής θερμοκρασίας στην διάρκεια της καύσης.

Δεύτερον βοήθησε η τεχνολογία αποθήκευσης υδρογόνου σε δεξαμενές που χρησιμοποιούνται ήδη στο Toyota Mirai, λόγω των δοκιμών που έχουν ήδη γίνει στην αξιοπιστία των δεξαμενών σε συγκρούσεις. Στο αγωνιστικό αυτοκίνητο υπάρχουν τέσσερις δεξαμενές στα πίσω καθίσματα, δύο μεσαίου μεγέθους και δύο λίγο μικρότερες. Συνολικά, αυτές αποθηκεύουν 180 λίτρα υδρογόνου που συμβάλλουν στην αύξηση των χιλιομέτρων που μπορεί να ταξιδέψει το αυτοκίνητο με ένα γέμισμα. Ακόμη, για λόγους ασφαλείας, οι δεξαμενές προστατεύονται με ανθρακούχα καλύμματα.



**Εικόνα 29:** Οι τέσσερις δεξαμενές που βρίσκονται στα πίσω καθίσματα

Ο τελευταίος παράγοντας που «έδωσε» ζωή στον κινητήρα αυτόν της Toyota είναι η πολιτική που ακολούθησε για την ανάπτυξη του αυτοκινήτου που στηρίχτηκε ο κινητήρας με υδρογόνο, το Toyota GR Yaris. Αυτό αναπτύχθηκε ως ένα αυτοκίνητο ικανό να κερδίζει στους μηχανοκίνητους αγώνες και μετά σαν εμπορικό όχημα, με αποτέλεσμα να αντέχει υψηλές θερμοκρασίες (υψηλότερη θερμοκρασία ανάφλεξης υδρογόνου), πιέσεις και στροφές. Έτσι, ωθώντας το αυτοκίνητο στα όρια του, εξερευνάται η σταθερότητα και η αντοχή του κινητήρα.

Τα αποτελέσματα του αγώνα αντοχής με τον κινητήρα αυτόν είναι:

- 1634 χιλιόμετρα
- 11 ώρες και 54 λεπτά οδήγησης
- 4 ώρες ανεφοδιασμού - 35 ανεφοδιασμοί με ~7 λεπτά ο καθένας -
- 8 ώρες επισκευών και επιβλέψεων ασφάλειας

Μέσω αυτού του αγώνα παρουσιάστηκαν προβλήματα με κομμάτια που αλλοιώνονται πιο εύκολα, με αποτέλεσμα πλέον να γνωρίζουν τις απαραίτητες βελτιώσεις που χρειάζονται και για την εξέλιξη του συστήματος. Ακόμη, υπήρξε ένα περιστατικό με μια διαρροή υδρογόνου στην καμπίνα του κινητήρα, το οποίο βρέθηκε από τους αισθητήρες με υψηλή ακρίβεια και επιδιορθώθηκε, αυξάνοντας έτσι την αξιοπιστία του. Παρ' όλα αυτά τα αποτελέσματα και το ένα- τρίτο του αγώνα χαμένος σε επισκευές, αυτός ο αγώνας έδειξε την αρχή για ένα μέλλον απαλλαγμένο από τον άνθρακα. [19], [20], [21], [22]

### 5.3. Hyundai Nexo (2021)

Το 2021 η Hyundai ξεκίνησε στην Ευρώπη, ιδίως στην Γερμανία την κυκλοφορία του νέου της υδρογονοκίνητο μοντέλο Nexo, το οποίο δεν εκπέμπει καθόλου καυσαέρια από την εξάτμισή του, παρά μόνο σταγονίδια καθαρού νερού. Οι κυψέλες καυσίμου αποτελούν ένα μηχανισμό για την ηλεκτροχημική μετατροπή της ενέργειας μετατρέποντας υδρογόνο και οξυγόνο σε νερό, παράγοντας ταυτόχρονα με τη διαδικασία αυτή, ηλεκτρισμό και θερμότητα. Ο ηλεκτρισμός παράγεται με τη μορφή συνεχούς ρεύματος ενώ οι υδρατμοί είναι οι μόνες εκπομπές των οχημάτων κυψελών καύσιμο

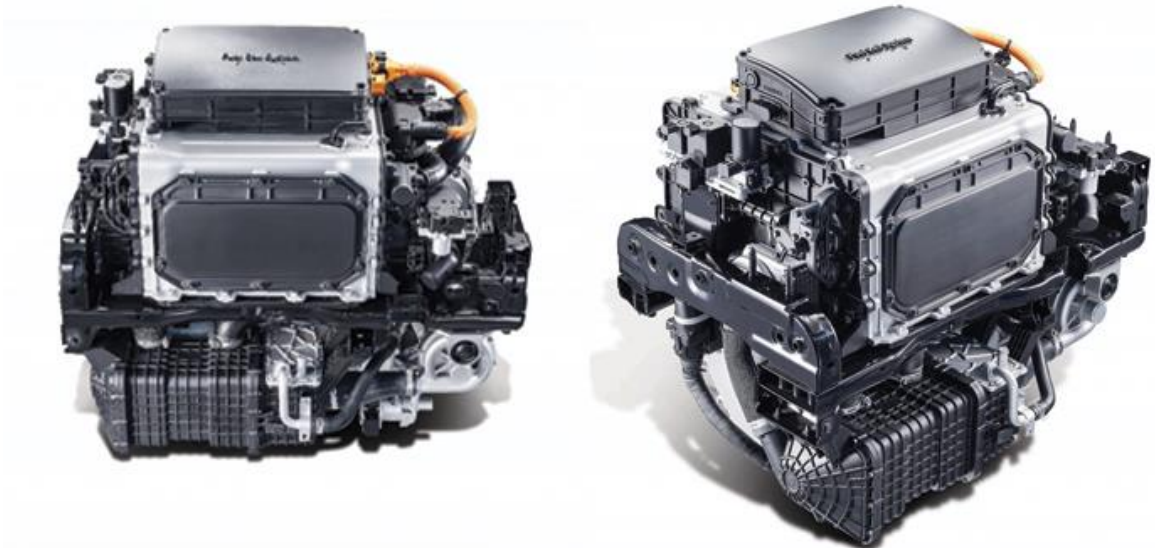
Ο ηλεκτροκινητήρας του Hyundai Nexo αποδίδει ισχύ (163) ίππων και ροπή (395) Nm, προσφέρει επιτάχυνση από (0-100) χλμ./ώρα σε (9,2) δευτερόλεπτα, η τελική ταχύτητα φτάνει τα (179) χλμ./ώρα και η αυτονομία με ένα γέμισμα φτάνει τα (756) χιλιόμετρα. Ενδεικτικά, στη Γερμανία όπου λειτουργούν (118) σταθμοί ανεφοδιασμού υδρογόνου, ένα κιλό υδρογόνο πωλείται στην τιμή των (9,5) ευρώ. Αυτό σημαίνει ότι το Nexo κοστίζει σε καύσιμο 8 ευρώ/100 χλμ. Η τιμή πώλησής του στην Γερμανία κοστίζει περίπου (77.008,40) ευρώ.[33]



**Εικόνα 30: Το υδρογονοκίνητο όχημα Nexo της αυτοκινητοβιομηχανίας Hyundai**



**Εικόνα 31: Άποψη του επάνω μέρους του κινητήρα και τον υπόλοιπων υποβοηθούμενων συστημάτων**



**Εικόνα 32: Όψη του κινητήρα του Hyundai Nexο**



Εικόνα 33: Οι δεξαμενές αποθήκευσης του καυσίμου υδρογόνου, τοποθετημένες κάτω από τον χώρο αποσκευών και συγκρατημένες από το πλαίσιο(σασί) του αμαξώματος



Εικόνα 34: Πλήρωση με καύσιμο υδρογόνο του Nexo σε σταθμό ανεφοδιασμού καυσίμου υδρογόνου

## 5.2 Εξελίξεις

Σήμερα, η ανθρωπότητα αρχίζει να ανησυχεί περισσότερο για το περιβάλλον και τα ηλεκτρικά οχήματα μπορούν να παίξουν καλά σε αυτό το ζήτημα. Ο περιβαλλοντικός αντίκτυπος των οχημάτων αναλύεται «well-to-wheel», επομένως θεωρείται η ρύπανση όλων των τμημάτων του ενεργειακού κύκλου, όχι μόνο του οχήματος από μόνο του. Πρώτον, πρέπει να θυμόμαστε ότι η ενέργεια προέρχεται από κάπου, δεν εμφανίζεται απλώς. Σε αυτό το σημείο, υπάρχει ένα ερώτημα: «θα μπορούσε να είναι δυνατό να μετακινηθούν οι άνθρωποι προς πιο περιβαλλοντικά μέσα μεταφοράς;» Φυσικά. Ωστόσο, απαιτείται η ισχύς του νόμου και της ρύθμισης υπέρ της λιγότερης ρύπανσης. Το καλύτερο παράδειγμα έλαβε χώρα στην Καλιφόρνια με το California Air Resources Board (CARB). Στόχος αυτού του οργανισμού είναι η διατήρηση της υγιούς ποιότητας του αέρα. Το CARB είχε τεράστιο αντίκτυπο στην ανάπτυξη των ηλεκτρικών οχημάτων. Στη δεκαετία του 1980 η CARB θέσπισε μια οδηγία που απαιτούσε ότι κάθε κατασκευαστής αυτοκινήτων που πωλούσε οχήματα στην Καλιφόρνια θα έπρεπε να διασφαλίζει ένα ελάχιστο ποσό πωλήσεων οχημάτων μηδενικών εκπομπών. Ως αποτέλεσμα, έγιναν οι μεγάλες εξελίξεις στις κυψέλες καυσίμου, τα υβριδικά οχήματα.





## Επίλογος

Με την συνεχή εξέλιξη της τεχνολογίας, το υδρογόνο θα γίνει ένα σημαντικό στοιχείο στο μέλλον που θα χρησιμοποιηθεί στην αντικατάσταση των συμβατικών καυσίμων που βασίζονται στους ορυκτούς υδρογονάνθρακες (βενζίνη, πετρέλαιο, μεθάνιο κ.λπ.). Επιπλέον, λόγω και της κλιματικής αλλαγής των τελευταίων χρόνων, το υδρογόνο θα συμβάλλει στην αλλαγή των καυσίμων σαν ένα προϊόν που παράγει σχεδόν μηδενικούς ρύπους αλλά και ότι μπορεί να παραχθεί από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας.

Άοσμο, άγευστο, άχρωμο και μη τοξικό, το υδρογόνο με την καύση του παράγει μόνο υδρατμούς και ενέργεια. Μπορεί να τροφοδοτήσει κινητήρες εσωτερικής καύσης και κυψέλες καυσίμου για να παράξει ωφέλιμο κινητικό φορτίο, η χρήση του βέβαια, αποτελεί μια πολύπλοκη και «αυστηρή» διαδικασία, λόγω των ιδιοτεροτήτων του σαν καύσιμο, όμως με σωστό σχεδιασμό και την τήρηση βασικών αρχών, μπορούν να επιτευχθούν πολύ αποδοτικά ποσά ισχύος.

Ωστόσο, το υδρογόνο παραμένει ως ένα ακριβό καύσιμο το οποίο επηρεάζεται από την έλλειψη σταθμών εφοδιασμού και την ολική αποδοτικότητα της παραγωγής και μεταφοράς του. Η συνεχής έρευνα και ανάπτυξη των ηλεκτρικών οχημάτων παρουσιάζει νέες προοπτικές για ένα καλύτερο μέλλον και μείωση των ρυπογόνων ουσιών, αλλά επηρεάζει και την δημοτικότητα του υδρογόνου και το κόστος του.



## 6. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Diesel Engine Fundamentals  
<https://sites.ntc.doe.gov/partners/tr/Training%20Textbooks/09-Mechanical%20Science/1-MS-Module%201-Diesel%20Engine%20Fundamentals.pdf>
2. U.S. Department of Energy:  
[https://www1.eere.energy.gov/vehiclesandfuels/pdfs/basics/jtb\\_diesel\\_engine.pdf](https://www1.eere.energy.gov/vehiclesandfuels/pdfs/basics/jtb_diesel_engine.pdf)
3. U.S. Department of Energy, *Propane Fuel Basics*:  
[https://afdc.energy.gov/files/u/publication/propane\\_basics.pdf](https://afdc.energy.gov/files/u/publication/propane_basics.pdf)
4. LumenLearning.com, “*Properties of Hydrogen*”  
<https://courses.lumenlearning.com/introchem/chapter/properties-of-hydrogen/>
5. Grochala, W. “*First there was hydrogen*” (2015), διαθέσιμο στο:  
<https://doi.org/10.1038/nchem.2186>
6. LumenLearning.com, “*Isotopes of Hydrogen*”, διαθέσιμο στο:  
<https://courses.lumenlearning.com/introchem/chapter/isotopes-of-hydrogen/>
7. Ιδιότητες ισotόπων: <https://img.brainkart.com/imagebk35/WDYxn45.jpg>
8. Christos M. Kalamaras, Angelos M. Efstathiou (2013), “*Hydrogen Production Technologies: Current State and Future Developments*”, διαθέσιμο στο:  
<https://doi.org/10.1155/2013/690627>
9. Lars Skaugen Strømholm, Raag August Sandal Rolfsen (2021), “*Flexible Hydrogen Production*”, διαθέσιμο στο:  
<https://openaccess.nhh.no/nhh-xmlui/bitstream/handle/11250/2770501/masterthesis.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
10. H2epower.net, “*Solid Oxide Electrolyser Cell*”, διαθέσιμο στο:  
<https://www.h2epower.net/solid-oxide-electrolyser-cell/>
11. Apoorv Gupta (2017), “*Hydrogen Storage, Distribution and Cleaning*”, διαθέσιμο στο:  
<https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1138179/FULLTEXT01.pdf>
12. International Energy Agency (2006), “*Hydrogen Production and Storage*”, διαθέσιμο στο:  
<https://iea.blob.core.windows.net/assets/e19e0c2a-0cef-4de6-a559-59d0342974c3/hydrogen.pdf>
13. Korri, Mohammed Amin (2018), “*Comparative Study of the prospects of hydrogen as an energy source*”, διαθέσιμο στο:  
<https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/112646/KORRI%20-%20Estudio%20comparativo%20sobre%20la%20perspectiva%20del%20hidr%C3%B3geno%20como%20nueva%20fuente%20energ%C3%A9tica.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
14. Serhiy Luzan (2012), “*Materials for Hydrogen Storage and Synthesis of New Materials by Hydrogeneration*”, διαθέσιμο στο:  
<https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:549550/FULLTEXT01.pdf>
15. Etienne Rivard, Michel Trudeau, Karim Zaghbi (2019), “*Hydrogen Storage for Mobility: A Review*”, διαθέσιμο στο:  
<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC6630991/pdf/materials-12-01973.pdf>
16. Judit Anton Francesch (2014), “*Hydrogen Fuel Cell Vehicles*”, διαθέσιμο στο:

<https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/24995/Hydrogen%20Fuel%20Cell%20Vehicles.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

17. Yip, H.L.; Srna, A.; Yuen, A.C.Y.; Kook, S.; Taylor, R.A.; Yeoh, G.H.; Medwell, P.R.; Chan, Q.N (2019), “A Review of Hydrogen Direct Injection for Internal Combustion Engines: Towards Carbon-Free Combustion”,

διαθέσιμο στο: <https://doi.org/10.3390/app9224842>

18. Shadidi, B.; Najafi, G.; Yusaf T. (2021), “A Review of Hydrogen as a Fuel in Internal Combustion Engines”, διαθέσιμο στο:

<https://doi.org/10.3390/en14196209>

19. Toyota Times, διαθέσιμο στο: <https://toyotatimes.jp/en/insidetoyota/143.html>

20. <https://toyotatimes.jp/en/insidetoyota/144.html>

21. <https://toyotatimes.jp/en/insidetoyota/145.html>

22. <https://toyotatimes.jp/en/insidetoyota/150.html>

23. Wired, διαθέσιμο στο:

[https://www.wired.com/images\\_blogs/autopia/files/bmw\\_hydrogen\\_7.pdf](https://www.wired.com/images_blogs/autopia/files/bmw_hydrogen_7.pdf)

24. Β. Αβδελίδης “Καύση Υδρογόνου σε Εμβολοφόρες ΜΕΚ” , Διπλωματική εργασία, Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών, Τομέας Θερμότητας, 2008 <https://dSPACE.lib.ntua.gr/xmlui/handle/123456789/1719>

25. Μπομπολάκι Ευτυχία «Ανάλυση Λειτουργίας Κυψελών Καυσίμου και Μοντελοποίηση τους με τη Χρήση του Λογισμικού Simulink.» Διπλωματική Εργασία, Πολυτεχνείο Κρήτης, Σχολή Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης, 2015

<https://dias.library.tuc.gr/view/25780>

26. [https://eclass.uowm.gr/modules/document/file.php/MECH101/%CE%94%CE%99%CE%91%CE%9B%CE%95%CE%9E%CE%95%CE%99%CE%A3%0\\_%CE%95%CE%B9%CF%83%CE%B1%CE%B3%CF%89%CE%B3%CE%AE\\_oc.pdf](https://eclass.uowm.gr/modules/document/file.php/MECH101/%CE%94%CE%99%CE%91%CE%9B%CE%95%CE%9E%CE%95%CE%99%CE%A3%0_%CE%95%CE%B9%CF%83%CE%B1%CE%B3%CF%89%CE%B3%CE%AE_oc.pdf)

27. Μιχάλης Ι. Βαλάκας, «Χρήση του υδρογόνου ως εναλλακτική πηγή ενέργειας», Διπλωματική εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών, Τομέας θερμότητας, 2007

<https://www.electricalab.gr/e-yliko/2015-12-05-17-42-59-3/428-2015-12-05-17-43-53/file>

28. <http://www.cres.gr/cres/index.html>

29. <https://docplayer.gr/182603-Eisagogi-taxinomisi-istoriki-anadromi-m-e-k.html>

30. <https://www.caroto.gr/>

31. <https://docplayer.gr/>

32. BMW Forum, <https://www.bmwforum.gr/forum/showthread.php?t=13890>

33. Autogreeknews.gr <https://www.autogreeknews.gr/nea/polla-diafora-diafora-nea/poso-kanei-to-ydrogonokinito-hyundai-nexo>

34. Αλέξανδρος Μαραντζίδης, «Κίνηση οχημάτων με υδρογόνο», Διπλωματική Εργασία, ΤΕΙ Καβάλας, Σχολή τεχνολογικών εφαρμογών, Τμήμα Μηχανολογίας, 2014

<http://digilib.teiemt.gr/jspui/bitstream/123456789/1830/1/012014032.pdf>

35. Νικόλαος Σουλτσιώτης, «Μηχανές Εσωτερικής Καύσης», Πτυχιακή Εργασία, Σχολή Θετικών Επιστημών, Τμήμα Φυσικής, Θεσσαλονίκη (2011)

<http://ikee.lib.auth.gr/record/125686/files/%CE%A0%CE%A4%CE%A5%CE%A7%CE%99%CE%91%CE%9A%CE%97%20%CE%95%CE%A1%CE%93%CE%91%CE%A3%CE%99%CE%91%20%CE%A3%CE%9F%CE%A5%CE%9B%CE%99%CE%A4%CE%A3%CE%99%CE%A9%CE%A4%CE%97%20%CE%9D%CE%99%CE%9A%CE%9F%CE%A5.pdf>

36. Πανεπιστήμιο Δυτικής Μακεδονίας, Ειδικά κεφάλαια παραγωγής ενέργειας, Ενότητα 5(β): Κυψέλες Καυσίμου, Γεώργιος Μαρνέλλος, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών

%CE%B4%CF%85%CF%84%CE%B9%CE%BA%CE%B7%CF%83+%CE%BC%CE%B1%CE%BA%CE%B5%CE%B4%CE%BF%CE%BD%CE%B9%CE%B1%CF%83+%CE%BA%CF%85%CF%88%CE%B5%CE%BB%CE%B5%CF%83+%CE%BA%CE%B1%CF%85%CF%83%CE%B9%CE%BC%CE%BF%CF%85&biw=1821&bih=833&ei=OQS3YcX8Hc6Qxc8P-

9GkuA4&ved=0ahUKEwiF\_djhreD0AhVOSPEDHfsoCec4FBDh1QMIDg&uact=5&oq=%CF%80%CE%B1%CE%BD%CE%B5%CF%80%CE%B9%CF%83%CF%84%CE%B7%CE%BC%CE%B9%CE%BF+%CE%B4%CF%85%CF%84%CE%B9%CE%BA%CE%B7%CF%83+%CE%BC%CE%B1%CE%BA%CE%B5%CE%B4%CE%BF%CE%BD%CE%B9%CE%B1%CF%83+%CE%BA%CF%85%CF%88%CE%B5%CE%BB%CE%B5%CF%83+%CE%BA%CE%B1%CF%85%CF%83%CE%B9%CE%BC%CE%BF%CF%85&gs\_lcp=Cgdnd3Mtd2l6EAM6BwgAEEcQsAM6CwguEIAEELEDEIMBOgsIABCABBCxAXCDAToOCC4QgAQQsQMqxwEQowl6CAgAELEDEIMBOhEILhCABBCxAXCDARDHARCjAjoICAAQgAQQsQM6CAguELEDEIMBOgUILhCABDoFCAAQgAQ6CAguEIAEELEDOgsILhCABBDHARCvAToGCAAQFhAeOgUIABDNAjoHCCEQChCgAToFCCEQoAFKBAhBGABKBAhGGABQkQIY5o0BYLuQAWgDcAJ4AIAB2AGIAY8zkgEGMC40Ny4xmAEAoAEBByAEIwAEB&scient=gws-wiz

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

38. <https://www.britannica.com/technology/emission-control-system>



Εξώφυλλο: Hopium Machina Hydrogen car

<https://www.formtrends.com/hopium-machina-first-sketches/>

Εικόνα 1: Τετράχρονος κινητήρας

<https://www.caroto.gr/static/media/2014/06/4-stroke.jpg>

Εικόνα 2: Δίχρονος κινητήρας

<https://www.caroto.gr/static/media/2014/06/2-stroke-engine.jpg>

Εικόνα 3: Διαφορά κύκλων Otto/Diesel:

[https://8ermikoi-kukloi.weebly.com/uploads/1/8/3/3/18336781/8813058\\_orig.png](https://8ermikoi-kukloi.weebly.com/uploads/1/8/3/3/18336781/8813058_orig.png)

Εικόνα 4: Κινητήρας ανάφλεξης Diesel:

[https://www1.eere.energy.gov/vehiclesandfuels/pdfs/basics/jtb\\_diesel\\_engine.pdf](https://www1.eere.energy.gov/vehiclesandfuels/pdfs/basics/jtb_diesel_engine.pdf)

Εικόνα 5: Περιστροφικός κινητήρας Wankel

[https://www.caroto.gr/static/media/2009/02/rotoras\\_wankel\\_resize.jpg](https://www.caroto.gr/static/media/2009/02/rotoras_wankel_resize.jpg)

Εικόνα 6: Υδρογόνο

[https://www.h2-view.com/wp-content/files/19515/shutterstock\\_1649661589-scaled.jpg](https://www.h2-view.com/wp-content/files/19515/shutterstock_1649661589-scaled.jpg)

Εικόνα 7: Αντιδραστήρας Αναμόρφωσης Ατμών

<https://studentenergy.org/site/assets/uploads/2020/01/Steam-Methane-Reformer.jpg>

Εικόνα 8: Μερική οξειδωση

<https://i0.wp.com/globalsyngas.org/wp-content/uploads/2021/04/img-partial-oxidation.jpeg?w=580&ssl=1>

Εικόνα 9: Αυτοθερμικός αντιδραστήρας

<https://www.industryandenergy.eu/wp-content/uploads/2020/06/Syncor.jpg>

Εικόνα 10: Βιομάζα

[https://solaredition.com/wp-content/uploads/2020/12/Biomass\\_Website-678x381.png](https://solaredition.com/wp-content/uploads/2020/12/Biomass_Website-678x381.png)

Εικόνα 11: Ηλεκτρόλυση με μεμβράνη ανταλλαγής πρωτονίων

<https://ptx-hub.org/wp-content/uploads/2021/05/Own-depiction-of-PEM-electrolysis-based-on-1-1024x831.png>

Εικόνα 12: Φωτοηλεκτροχημική κυψέλη διαχωρισμού νερού

<https://www.researchgate.net/publication/303091565/figure/fig9/AS:668376410103817@1536364762698/Solar-driven-electrochemical-water-splitting-cells-a-photovoltaic-electrolysis-cell-b.png>

Εικόνα 13: Δεξαμενή συμπιεσμένου υδρογόνου

<https://iea.blob.core.windows.net/assets/e19e0c2a-0cef-4de6-a559-59d0342974c3/hydrogen.pdf>

Εικόνα 14: Κυψέλη (PEMFC)

<https://dias.library.tuc.gr/view/25780>

Εικόνα 15: Κυψέλη (PAFC)

<http://apothesis.teicm.gr/xmlui/bitstream/handle/123456789/2613/Vlaxos.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Εικόνα 16: Κυψέλη (AFC)

<https://www.electricallab.gr/e-yliko/alternative-fuel-product-h2-electro-catalysis/849-homer-energy/file>

Εικόνα 17: Κυψέλη (MCFC)

<https://dias.library.tuc.gr/view/25780>



Εικόνα 18: Κυψέλη(SOFC)

<https://docplayer.gr/45481732-Aristoteleio-panepistimio-thessalonikis-sholi-thetikon-epistimon-tmima-fysikis-ptyhiaki-ergasia-me-thema-tehnologies-ydrogonoy-gia-paragogi-energeias.html>

Εικόνα 19: Κυψέλη(DMFC)

<https://dornsife.usc.edu/assets/sites/1156/imgs/Pictue1.png>

Εικόνα 20: Mazda RX-8 Hydrogen Renesis

[https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/4/4d/Mazda\\_RX8\\_hydrogen\\_rotary\\_car\\_1.jpg/1280px-Mazda\\_RX8\\_hydrogen\\_rotary\\_car\\_1.jpg](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/4/4d/Mazda_RX8_hydrogen_rotary_car_1.jpg/1280px-Mazda_RX8_hydrogen_rotary_car_1.jpg)

Εικόνα 21: Η δεξαμενή αποθήκευσης του καυσίμου υδρογόνου στον χώρο των αποσκευών

<https://www.researchgate.net/profile/Alaswad/publication/301729893/figure/fig1/AS:395702757806082@1471354297810/e-The-hydrogen-storage-tank-installed-in-a-Mazda-RX-8-Hydrogen-car-77.png>

Εικόνα 22: Ανεφοδιασμός καυσίμου υδρογόνου, μέσω του σωλήνα πλήρωσης

[www.hydrogen-motors.com/Mazda/images/im/Mazda\\_RX-8\\_1.jpg](http://www.hydrogen-motors.com/Mazda/images/im/Mazda_RX-8_1.jpg)

Εικόνα 23: Συγκρότημα κινητήρα Renesis

[https://static.wixstatic.com/media/75cc88\\_81960bc5fccb4d38a76fbc9c5f4b2b3b.jpg/v1/fill/w\\_916,h\\_609,al\\_c,q\\_85,usm\\_0.66\\_1.00\\_0.01/75cc88\\_81960bc5fccb4d38a76fbc9c5f4b2b3b.webp](https://static.wixstatic.com/media/75cc88_81960bc5fccb4d38a76fbc9c5f4b2b3b.jpg/v1/fill/w_916,h_609,al_c,q_85,usm_0.66_1.00_0.01/75cc88_81960bc5fccb4d38a76fbc9c5f4b2b3b.webp)

Εικόνα 24: Σύστημα διπλού καυσίμου

<https://images.cdn.circlesix.co/image/1/700/0/uploads/posts/2017/12/866f440dea135fc2a3f26ee6042f8bf1.jpg>

Εικόνα 25: BMW Hydrogen 7

[https://topworldauto.com/photos/BMW/e8/a3/661\\_533227012\\_98299c3910\\_o-jpg.jpg](https://topworldauto.com/photos/BMW/e8/a3/661_533227012_98299c3910_o-jpg.jpg)

Εικόνα 26: Κινητήρας BMW Hydrogen 7

<https://www.hydrogencarsnow.com/images/BMW/bmw-hydrogen-engine.jpg>

Εικόνα 27: Δεξαμενή αποθήκευσης κρυογενικού υδρογόνου στις αποσκευές

[https://topworldauto.com/photos/BMW/94/12/661\\_the-hydrogen-tank-in-bmw-39-s-hydrogen-7-concept-car-flickr-photo.jpg](https://topworldauto.com/photos/BMW/94/12/661_the-hydrogen-tank-in-bmw-39-s-hydrogen-7-concept-car-flickr-photo.jpg)

Εικόνα 28: Toyota Corolla Sport

[https://toyotatimes.jp/en/insidetoyota/upload\\_images/insidetoyota\\_150\\_1.jpg](https://toyotatimes.jp/en/insidetoyota/upload_images/insidetoyota_150_1.jpg)

Εικόνα 29: Εικόνα δεξαμενών αποθήκευσης υδρογόνου στα πίσω καθίσματα

[https://toyotatimes.jp/en/insidetoyota/upload\\_images/143%20hydrogen%20tank.jpg](https://toyotatimes.jp/en/insidetoyota/upload_images/143%20hydrogen%20tank.jpg)

Εικόνα 30: Το υδρογονοκίνητο όχημα Nexo της αυτοκινητοβιομηχανίας Hyundai

<https://car-news.gr/wp-content/uploads/2018/10/nexo-exterior-30-0.jpg>

Εικόνα 31: Άποψη του επάνω μέρους του κινητήρα και των υπόλοιπων υποβοηθούμενων συστημάτων.

[https://www.autocar.co.uk/sites/autocar.co.uk/files/styles/gallery\\_slide/public/30-hyundai-nexo-2019-rt-engine.jpg?itok=ds492WFJ](https://www.autocar.co.uk/sites/autocar.co.uk/files/styles/gallery_slide/public/30-hyundai-nexo-2019-rt-engine.jpg?itok=ds492WFJ)

Εικόνα 32: Όψη του κινητήρα του Hyundai Nexo

<https://www.autonomous.gr/wp-content/uploads/2020/11/nexo-system.jpg>

Εικόνα 33: Οι δεξαμενές αποθήκευσης του καυσίμου υδρογόνου, τοποθετημένες κάτω από τον χώρο αποσκευών και συγκρατημένες από το πλαίσιο(σασί) του αμαξώματος

<https://cdn.motor1.com/images/mgl/nnL1j/s1/hyundai-nexo-iihs-crash-testing.jpg>

Εικόνα 34: Πλήρωση με καύσιμο υδρογόνου του Νexοσε σταθμό ανεφοδιασμού καυσίμου υδρογόνου

<https://fuelcellsworks.com/news/hyundai-nexo-first-vehicle-with-a-hydrogen-fuel-cell-registered-in-spain-re/>