Δεξιότητες για την ασφάλεια στον τομέα του υδρογόνου

Erasmus+ KA202 - Στρατηγικές Συμπράξεις στον τομέα της Επαγγελματικής Εκπαίδευσης και Κατάρτισης (ΕΕΚ)

Κεφάλαιο 7

Καύση Υδρογόνου

Περιεχόμενα

Ενότητα 1

1.1. Καύση 03
1.1.1. Τύποι καύσης 03
1.1.2. Συχνές ερωτήσεις για την καύση 04
1.2. Η καύση του υδρογόνου 05
1.3. Εφαρμογές της καύσης του υδρογόνου 06
1.3.1. Μηχανές εσωτερικής καύσης υδρογόνου 06
1.3.2. Μια εναλλακτική λύση για το μεθάνιο 06

Ενότητα 2

2.1. Αναφλεξιμότητα του υδρογόνου 08
2.2. Η φλόγα του υδρογόνου 09
2.3. Διαχείριση της καύσης του υδρογόνου 10
2.3.1. Πρόληψη της καύσης 10
2.3.2. Ανίχνευση της καύσης 11
2.3.3. Καταστολή της καύσης 12

Ενότητα 3

3.1. Κινητήρες καύσης του υδρογόνου 14
3.2. Λέβητες υδρογόνου 16
3.2.1. Λειτουργία λεβήτων υδρογόνου 17

Παραπομπές 19

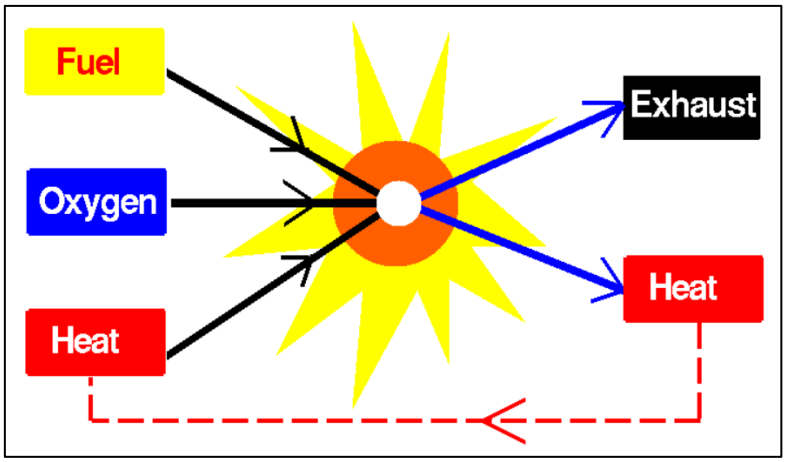
-------- Ενότητα 1 --------

1.1. Καύση

Η καύση είναι μία εξώθερμη χημική διεργασία κατά την οποία μία ουσία αντιδρά με το οξυγόνο και εκλύει θερμότητα.

Η αρχική ουσία ονομάζεται καύσιμο - μπορεί να είναι στερεό, υγρό ή αέριο. Η πηγή του οξυγόνου ονομάζεται οξειδωτής - είναι συνήθως αέριο (αέρας). Οι νέες χημικές ουσίες που δημιουργούνται από το καύσιμο και τον οξειδωτή ονομάζονται καυσαέρια. Όταν χρησιμοποιούνται υδρογονάνθρακες ως καύσιμο, το διοξείδιο του άνθρακα είναι ένα συνηθισμένο καυσαέριο.

Η ενέργεια ενεργοποίησης πρέπει να ξεπεραστεί για να ξεκινήσει η καύση, αλλά η θερμότητα από μία φλόγα μπορεί να παρέχει αρκετή ενέργεια, ώστε η αντίδραση να είναι αυτοσυντηρούμενη.



Εικόνα 1. Βασική σχηματική αναπαράσταση των στοχείων καύσης

1.1.1. Τύποι καύσης

Η καύση μπορεί να κατηγοριοποιηθεί σε διάφορες μορφές: μπορεί να είναι πλήρης (όταν υπάρχει απεριόριστη παροχή οξυγόνου) ή ατελής (όταν υπάρχει περιορισμένη παροχή). Ο Πίνακας 1 περιγράφει τις βασικές διαφορές μεταξύ των δύο αυτών μορφών.

Πίνακας 1. Πλήρης έναντι ατελούς καύσης

	ΠΛΗΡΗΣ	ΑΤΕΛΗΣ
Επίσης γνωστό ως	Καθαρή καύση	Βρώμικη καύση
Κατάσταση	Απεριόριστη παροχή οξυγόνου	Η παροχή οξυγόνου είναι περιορισμένη
Αποτέλεσμα	Το καύσιμο καίγεται πλήρως	Το καύσιμο δεν αντιδρά πλήρως
Υποπροϊόντα	Νερό και CO2	CO και αιθάλη
Παράδειγμα	Κερί	Κάψιμο χαρτιού

Η καύση μπορεί επίσης να κατηγοριοποιηθεί σε τρεις διαφορετικούς τύπους:

- **Ταχεία:** Παράγει μεγάλη ποσότητα θερμότητας και φωτεινής ενέργειας, και μάλιστα γρήγορα. Η φλόγα μίας σόμπας αποτελεί παράδειγμα ταχείας καύσης.

- **Αυθόρμητη:** Δεν απαιτεί εξωτερική ενέργεια για να ξεκινήσει – μία ουσία με χαμηλή θερμοκρασία ανάφλεξης αυτοθερμαίνεται και η θερμότητα δεν μπορεί να διαφύγει. Πολλές ουσίες και ακόμη και άνθρωποι μπορούν να αναφλεγούν αυθόρμητα υπό τις κατάλληλες συνθήκες.

- **Εκρηκτική:** Συνοδεύεται από ξαφνική παραγωγή θερμότητας και ήχου, που συμβαίνει με εξαιρετικά γρήγορο ρυθμό. Τα πυροτεχνήματα αποτελούν παράδειγμα εκρηκτικής καύσης.

Συζήτηση → Συνιστάται μία συζήτηση στην τάξη για την ανάδειξη περισσότερων παραδειγμάτων των προαναφερθέντων τύπων καύσης.

1.1.2. Συχνές ερωτήσεις για την καύση

Ποιοι είναι οι παράγοντες που υποστηρίζουν τη διαδικασία της καύσης;

1. Επαρκής παροχή οξυγόνου
2. Ένα καύσιμο το οποίο καίγεται κατά την καύση
3. Ενέργεια που βοηθά το καύσιμο να φτάσει στο σημείο ανάφλεξης.

Ποια είναι η θερμοκρασία ανάφλεξης;

Είναι η θερμοκρασία στην οποία το καύσιμο αρχίζει να καίγεται. Κάθε ουσία έχει διαφορετικό σημείο ανάφλεξης.

Ποιες είναι οι εύφλεκτες ουσίες;

Είναι ουσίες με πολύ χαμηλές θερμοκρασίες ανάφλεξης, οι οποίες πρέπει να αποθηκεύονται προσεκτικά.

1.2. Η καύση του υδρογόνου

Κατά την καύση του υδρογόνου, αυτό αντιδρά με το οξυγόνο για το σχηματισμό νερού, με απελευθέρωση ενέργειας, σύμφωνα με την εξίσωση:

$$2H_2\,(g) + O_2\,(g) \rightarrow 2H_2O\,(g) + \text{energy}$$

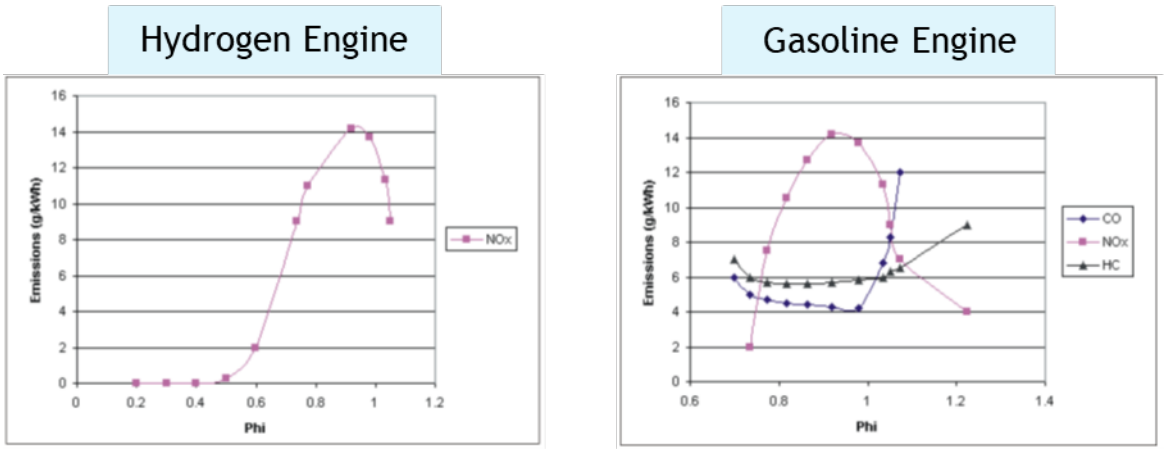
Η αντίδραση αυτή χρησιμοποιείται συνήθως στον τομέα του διαστήματος για την τροφοδοσία πυραυλοκινητήρων, δεδομένου ότι το υδρογόνο αποδίδει την υψηλότερη ειδική ώθηση από οποιοδήποτε άλλο γνωστό προωθητικό.

Το υδρογόνο δεν παράγει εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα μετά την καύση. Ωστόσο, όταν καίγεται στον αέρα, παράγονται οξείδια του αζώτου (**NOx**) λόγω του αζώτου που υπάρχει στον ατμοσφαιρικό αέρα.

$$\mathbf{NOx} = \text{the sum of NO and } NO_2$$

Σημειώστε ότι αυτό δεν ισχύει αποκλειστικά για την καύση υδρογόνου, αλλά και για την καύση ορυκτών καυσίμων. Το NO2 είναι ένας βασικός ατμοσφαιρικός ρύπος και πρόδρομος άλλων ρύπων που προκαλούν ανησυχία, όπως τα σωματίδια.

Η ελαχιστοποίηση των εκπομπών NOx από κινητήρες και λέβητες υδρογόνου είναι δυνατή με τον έλεγχο ορισμένων συνθηκών καύσης, ενώ είναι επίσης δυνατή η μετεπεξεργασία και η απομάκρυνση των NOx. Ωστόσο, αυτές οι στρατηγικές αυξάνουν πάντοτε το κόστος και την πολυπλοκότητα των συστημάτων καύσης υδρογόνου.



Εικόνα 2. Σύγκριση των εκπομπών ενός κινητήρα καύσης υδρογόνου με έναν τυπικό βενζινοκινητήρα. [Πηγή: https://www1.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/tech_validation/pdfs/fcm03r0.pdf]

Η καύση του υδρογόνου είναι ένας τρόπος παραγωγής ενέργειας από αυτό. Ωστόσο, το τελευταίο διαφέρει από την ηλεκτροχημική διαδικασία που λαμβάνει χώρα στο εσωτερικό μίας κυψέλης καυσίμου, η οποία επίσης παράγει ενέργεια από το υδρογόνο.

Συζήτηση → Συνιστάται μία συζήτηση στην τάξη για να αναδειχθούν οι βασικές διαφορές και ομοιότητες μεταξύ των συστημάτων κυψελών καυσίμου και των συστημάτων καύσης υδρογόνου.

1.3. Εφαρμογές της καύσης του υδρογόνου

Ορισμένα παραδείγματα εφαρμογών της καύσης υδρογόνου, τα οποία θα συζητηθούν λεπτομερέστερα στη συνέχεια του μαθήματος, περιλαμβάνουν:

1.3.2. Μηχανές εσωτερικής καύσης υδρογόνου

Λειτουργούν με πολύ παρόμοιο τρόπο με τους παραδοσιακούς κινητήρες εσωτερικής καύσης με σπινθήρα, αλλά έχουν τροποποιηθεί ώστε να χρησιμοποιούν υδρογόνο ως καύσιμο καύσης.

Προτεινόμενη βιβλιογραφία → Πώς οι κινητήρες εσωτερικής καύσης υδρογόνου μπορούν να συμβάλουν στην επίτευξη μηδενικών εκπομπών.
https://www.mckinsey.com/industries/automotive-and-assembly/our-insights/how-hydrogen-combustion-engines-can-contribute-to-zero-emissions

1.3.3. Μία εναλλακτική λύση για το μεθάνιο

Το υδρογόνο μπορεί να καεί και να χρησιμοποιηθεί για τις ίδιες εφαρμογές με το ορυκτό φυσικό αέριο, όπως η βιομηχανική θέρμανση, η θέρμανση των σπιτιών και το μαγείρεμα, καθώς και η καύση σε αεριοστρόβιλους.

Το υδρογόνο μπορεί να αναμιχθεί με το ορυκτό φυσικό αέριο σε πολλούς τύπους υφιστάμενων αγωγών, ενισχύοντάς το ή, τελικά, αντικαθιστώντας το εντελώς. Ορισμένα έργα έγχυσης φυσικού αερίου στο δίκτυο ανά τον κόσμο περιλαμβάνουν:

- ✓ H21 Leeds City Gate (Ηνωμένο Βασίλειο), ένα σχέδιο δικτύου υδρογόνου 100% για μία πόλη του Ηνωμένου Βασιλείου που είναι τεχνικά εφικτό και οικονομικά βιώσιμο. Περισσότερες πληροφορίες https://h21.green/projects/h21-leeds-city-gate/

- ✓ HyDeploy (Ηνωμένο Βασίλειο), το πρώτο σχέδιο έγχυσης υδρογόνου σε δίκτυο παγκοσμίως. Περισσότερες πληροφορίες https://hydeploy.co.uk

- ✓ Evolugen/Gazifère (Καναδάς), ένα σχέδιο πράσινης έγχυσης υδρογόνου στη Βόρεια Αμερική. Περισσότερες πληροφορίες https://evolugen.com/evolugen-and-gazifere-announce-one-of-canadas-largest-green-hydrogen-injection-projects-to-be-located-in-quebec/

Προτεινόμενη βιβλιογραφία → Zero Emission Hydrogen Turbine Center: Ένα κλειστό κύκλωμα του ενεργειακού μέλλοντος. https://www.powerengineeringint.com/hydrogen/zero-emission-hydrogen-turbine-center-a-closed-loop-of-the-energy-future/

ΣΥΝΕΧΗΣ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ 1: ΚΟΥΙΖ

-------- Τέλος Ενότητας 1 --------

-------- Ενότητα 2 --------

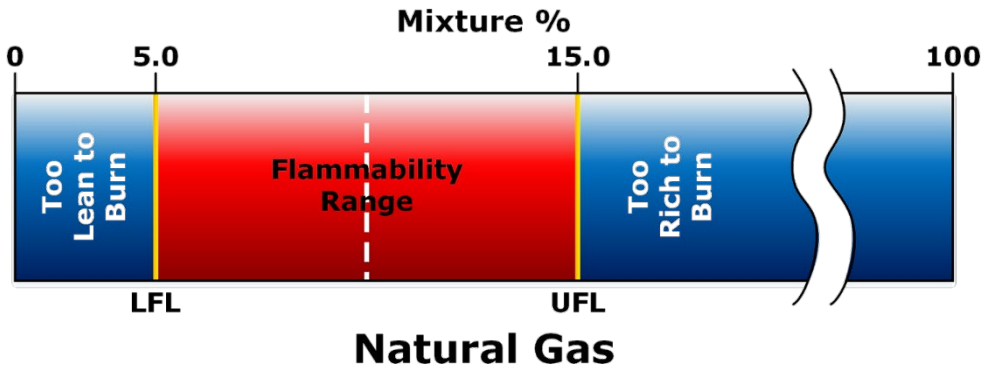
2.1. Αναφλεξιμότητα του υδρογόνου

Αναφλεξιμότητα είναι η ευκολία με την οποία μπορεί να αναφλεγεί μία εύφλεκτη ουσία. Το υδρογόνο έχει ένα πολύ ευρύ φάσμα ευφλεκτότητας: μεταξύ 4% και 74% συγκέντρωση στον αέρα και 4% έως 94% συγκέντρωση σε καθαρό οξυγόνο.

Αυτό σημαίνει ότι είναι εύφλεκτο όταν αναμιγνύεται ακόμη και σε μικρές ποσότητες με αέρα, και είναι πολύ σημαντικό να μην αναμιγνύεται ο αέρας ή το οξυγόνο με το υδρογόνο μέσα σε κλειστούς χώρους. Ο Πίνακας 2 και η Εικόνα 3 συγκρίνουν το υδρογόνο και άλλα καύσιμα όσον αφορά την αναφλεξιμότητα.

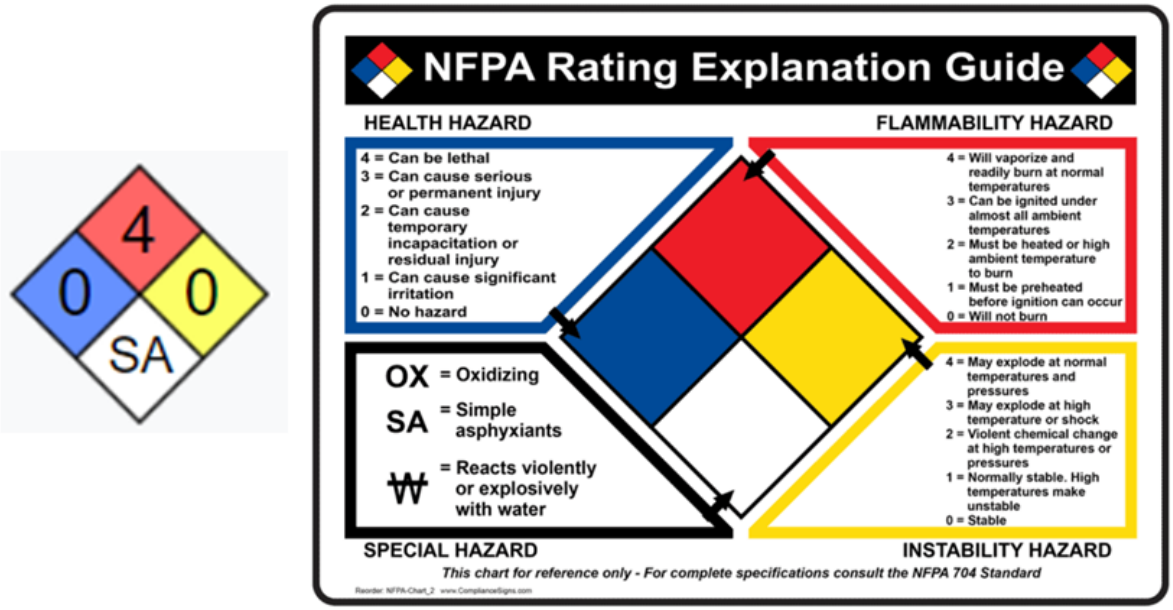
Πίνακας 2. Εύρος εύφλεξης του υδρογόνου και άλλων καυσίμων.

Καύσιμο	Εύλεκτο Έυρος στον αέρα (%)
Υδρογόνο	**4.0 – 74**
Μεθάνιο	5.3 – 15
Προπάνιο	2.2 – 9.6
Μεθανόλη	6.0 – 36
Βενζίνη	1.0 – 7.6
Ντίζελ	0.6 – 5.5



Εικόνα 3. Το εύρος ευφλεκτότητας του φυσικού αερίου (μεθάνιο), για σύγκριση.

Το NFPA 704 είναι το "Πρότυπο σύστημα για τον προσδιορισμό των κινδύνων των υλικών για την αντιμετώπιση έκτακτης ανάγκης". Το υδρογόνο έχει την υψηλότερη βαθμολογία του NFPA 704, 4 στην κλίμακα ευφλεκτότητας, ωστόσο έχει τη χαμηλότερη βαθμολογία 0 για εγγενή κίνδυνο αντιδραστικότητας ή τοξικότητας.



Εικόνα 4. Διαμάντι φωτιάς του υδρογόνου (αριστερά) και λεπτομερής εξήγηση ενός διαμαντιού φωτιάς (δεξιά).
[Πηγή: https://myusf.usfca.edu/environmental-health-safety/nfpa-hazard-diamond]

Σύμφωνα με το Εικόνα 4, ο κίνδυνος ανάφλεξης του υδρογόνου σημαίνει ότι "εξατμίζεται γρήγορα ή πλήρως σε κανονική ατμοσφαιρική πίεση και θερμοκρασία ή διασκορπίζεται εύκολα στον αέρα και καίγεται εύκολα". Η ταξινόμησή του ως προς την υγεία δηλώνει ότι το υδρογόνο "δεν ενέχει κίνδυνο για την υγεία, δεν απαιτούνται προφυλάξεις" και η ταξινόμησή του ως προς την αστάθεια/αντιδραστικότητα είναι "κανονικά σταθερή".

Ως ειδική σημείωση, το υδρογόνο θεωρείται απλό ασφυξιογόνο αέριο, το οποίο μπορεί να μειώσει/αντικαταστήσει την κανονική συγκέντρωση οξυγόνου στον αναπνευστικό αέρα. Αυτή είναι μία τυπική ταξινόμηση για πολλά αέρια, και το υδρογόνο δεν είναι επικίνδυνο με αυτή την έννοια, εκτός αν βρίσκεται σε αυξημένες συγκεντρώσεις.

2.2. Η φλόγα του υδρογόνου

Το υδρογόνο καίγεται με μία ανοιχτή μπλε φλόγα που είναι σχεδόν αόρατη στο φως της ημέρας, αν και η φλόγα μπορεί να φαίνεται κίτρινη αν υπάρχουν ακαθαρσίες στον αέρα, όπως σκόνη. Μία καθαρή φλόγα υδρογόνου δεν παράγει καπνό και η θερμοκρασία της φλόγας είναι σχετικά υψηλή - ο πίνακας 3 συγκρίνει τη θερμοκρασία φλόγας του υδρογόνου με άλλα καύσιμα.

Πίνακας 3. Σύγκριση θερμοκρασίας φλόγας.

Καύσιμο	Θερμοκρασία φλόγας στον αέρα
Υδρογόνο	2,045 °C
Μεθάνιο	1,957 °C
Προπάνιο	1,980 °C
Κερί	1,000 °C

Οι φλόγες υδρογόνου έχουν χαμηλή ακτινοβολούμενη θερμότητα, πράγμα που σημαίνει ότι μπορεί να μην αισθάνεστε θερμότητα μέχρι να βρεθείτε πολύ κοντά (ή μέσα) στη φλόγα. Ένα βίντεο θα απεικονίσει καλύτερα τα χαρακτηριστικά μίας φλόγας υδρογόνου, χρησιμοποιώντας μία φλόγα προπανίου ως μέσο σύγκρισης.

Βίντεο → Ασφάλεια υδρογόνου: Υδρογόνο: Επίδειξη φλόγας υδρογόνου https://www.youtube.com/watch?v=r-8H5u4YzuY

Εργαστηριακό πείραμα → Στο σημείο αυτό συνιστάται ένα απλό εργαστηριακό πείραμα, ώστε οι εκπαιδευόμενοι/ες να μπορούν να οπτικοποιήσουν μία φλόγα υδρογόνου και να τη συγκρίνουν με τη φλόγα από άλλα κοινά καύσιμα, τονίζοντας τις σχετικές πτυχές ασφάλειας.

2.3. Διαχείριση της Καύσης του Υδρογόνου

Η διαχείριση και η ασφάλεια της καύσης υδρογόνου αποτελείται από τρεις βασικούς τομείς: πρόληψη, ανίχνευση και καταστολή της (ανεπιθύμητης/μη ελεγχόμενης) καύσης.

2.3.1. Πρόληψη της καύσης

Δεδομένου ότι το υδρογόνο έχει πολύ μεγάλο εύρος ευφλεκτότητας και χαμηλή ενέργεια ανάφλεξης, θα πρέπει να θεωρείται ότι οποιαδήποτε έκλυση υδρογόνου είναι πιθανό να οδηγήσει σε πυρκαγιά.

Ο καλύτερος τρόπος για την αποτροπή της ανεπιθύμητης καύσης (πυρκαγιάς) είναι η απομάκρυνση ενός ή περισσότερων από τα τρία βασικά στοιχεία της: θερμότητα, καύσιμο και οξυγόνο. Κατά κανόνα, όταν έχουμε να κάνουμε με υδρογόνο, ο έλεγχος της θερμότητας και η απομάκρυνσή της από το καύσιμο είναι ο καλύτερος τρόπος για την αποφυγή ανεπιθύμητης καύσης. Οι συνήθεις πηγές θερμότητας περιλαμβάνουν:

- **Εγκαταστάσεις και εξοπλισμός:** θα πρέπει να χρησιμοποιείται ένα σχεδιασμένο πρόγραμμα συντήρησης για τη διατήρηση των εγκαταστάσεων και του εξοπλισμού καθαρούς, συντηρημένους και αεριζόμενους.

- **Εργασίες εν θερμώ**: εργασίες όπως η συγκόλληση πρέπει να ακολουθούν ένα αυστηρό σύστημα αδειοδότησης που περιλαμβάνει προστατευτικό ρουχισμό, έλεγχο σπινθήρων και ελέγχους ρουτίνας.

- **Ηλεκτρικός εξοπλισμός:** η εγκατάσταση και η συντήρηση του ηλεκτρικού εξοπλισμού και των εξαρτημάτων πρέπει να γίνεται πάντα από ειδικευμένους ηλεκτρολόγους εργολάβους.

- **Κάπνισμα:** πρέπει να υπάρχουν πινακίδες απαγόρευσης του καπνίσματος και να εφαρμόζονται.

- **Εμπρησμός:** η πιθανότητα εσκεμμένης πυρκαγιάς πρέπει επίσης να αποτελεί μέρος της εκτίμησης κινδύνου.

2.3.2. Ανίχνευση της Καύσης

Δεδομένου ότι το υδρογόνο είναι άχρωμο, άοσμο, καίγεται με σχεδόν αόρατη φλόγα και εκπέμπει σχετικά λίγη ακτινοβολούμενη θερμότητα, μία πυρκαγιά υδρογόνου είναι συχνά δύσκολο να ανιχνευθεί.

Η χρήση ανιχνευτών φλόγας (όπως αυτός που απεικονίζεται στην Εικόνα 5) και καμερών θερμικής απεικόνισης είναι ο καλύτερος τρόπος για να ανιχνεύσετε εάν υπάρχουν φλόγες. Εάν αυτά τα εργαλεία δεν είναι διαθέσιμα, μία ύποπτη διαρροή θα πρέπει να προσεγγίζεται προσεκτικά προς αναζήτηση θερμικών κυμάτων. Ένα εύφλεκτο αντικείμενο, όπως μία σκούπα ή σωματίδια σκόνης, μπορεί επίσης να τοποθετηθεί προσεκτικά στην ύποπτη φλόγα για να ανιχνευθεί η παρουσία της.

Εικόνα 5. Ο ανιχνευτής φλόγας FSL100 της Honeywell.
[Πηγή: https://sps.honeywell.com/us/en/products/safety/gas-and-flame-detection/industrial-fixed/fsl100-flame-detectors]

2.3.3. Καταστολή της καύσης

Αν και οι πυρκαγιές υδρογόνου δεν παράγουν καπνό, η καύση κοντινών εύφλεκτων υλικών μπορεί να οδηγήσει σε καπνό και η εισπνοή του μπορεί να αποτελέσει κίνδυνο σε μία πυρκαγιά υδρογόνου.

Οι πυρκαγιές υδρογόνου μπορούν να αναφλέξουν κοντινά αντικείμενα μέσω θερμότητας που μεταδίδεται με ακτινοβολία ή/και συναγωγή. Συνήθως, μία πυρκαγιά υδρογόνου δεν σβήνει μέχρι να διακοπεί ή να εξαντληθεί η παροχή υδρογόνου και υπάρχει πάντα ο κίνδυνος αναζωπύρωσης, ακόμη και έκρηξης.

Ο καλύτερος τρόπος αντιμετώπισης μίας πυρκαγιάς υδρογόνου είναι να την αφήσετε να καεί υπό έλεγχο μέχρι να διακοπεί η παροχή, καθώς το άκαυστο αέριο υδρογόνο μπορεί να οδηγήσει σε έκρηξη. Οι βέλτιστες πρακτικές περιλαμβάνουν τις ακόλουθες ενέργειες:

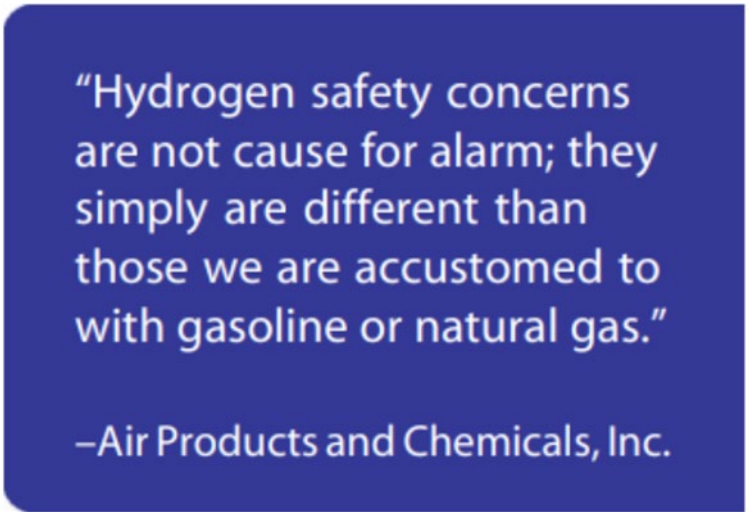
1. Από ασφαλή απόσταση ή με τηλεχειρισμό, διακόψτε τη ροή του υδρογόνου κλείνοντας τη βαλβίδα φραγής ή απομόνωσης

2. Χρησιμοποιήστε ψεκασμούς νερού για να σβήσετε τυχόν δευτερογενείς πυρκαγιές και να αποτρέψετε την εξάπλωση της πυρκαγιάς

3. Μην επιχειρήσετε να μετακινήσετε μία φλεγόμενη φιάλη

4. Το διοξείδιο του άνθρακα μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε μία πυρκαγιά υδρογόνου, αλλά τα ξηρά χημικά λειτουργούν καλύτερα, καθώς κάνουν τις φλόγες πιο ορατές.

Συνοψίζοντας, το υδρογόνο δεν είναι περισσότερο ή λιγότερο επικίνδυνο από άλλα εύφλεκτα καύσιμα, αλλά έχει συγκεκριμένες πτυχές ασφαλείας. Περισσότερες πληροφορίες μπορείτε να βρείτε στη διεύθυνση: https://h2tools.org/bestpractices.



Συζήτηση → Συνιστάται μία συζήτηση στην τάξη σχετικά με τη διαχείριση της καύσης του υδρογόνου, με έμφαση στις ιδιαιτερότητες και τις γενικότητες, καθώς και σύγκριση με τις πιθανές υπάρχουσες γνώσεις των μαθητών σχετικά με την καύση άλλων καυσίμων.

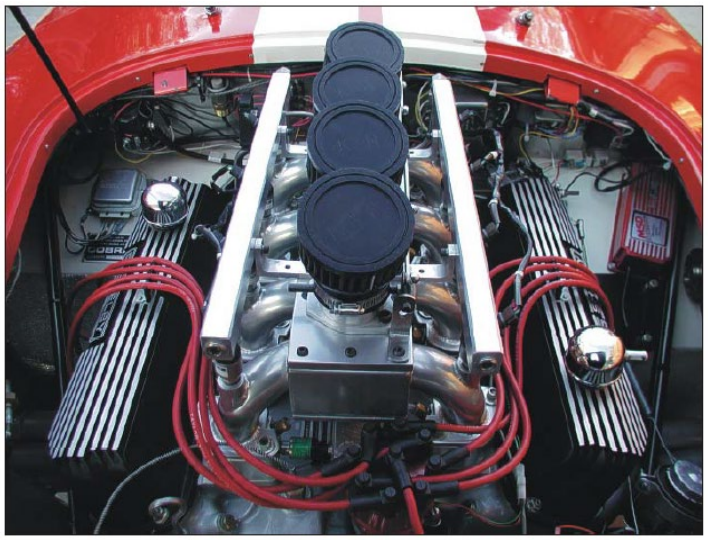
ΣΥΝΕΧΗΣ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ 2: ΚΟΥΙΖ

-------- Τέλος Ενότητας 2 --------

-------- ΕΝΟΤΗΤΑ 3 --------

3.1. Κινητήρες Καύσης του Υδρογόνου

Οι κινητήρες εσωτερικής καύσης υδρογόνου (ΜΕΚ υδρογόνου) είναι σχεδόν πανομοιότυποι με τους παραδοσιακούς κινητήρες ανάφλεξης με σπινθήρα. Στην περίπτωση αυτή, αντί για ορυκτό καύσιμο, καίγεται αέριο ή υγρό υδρογόνο για την παραγωγή ώσης.

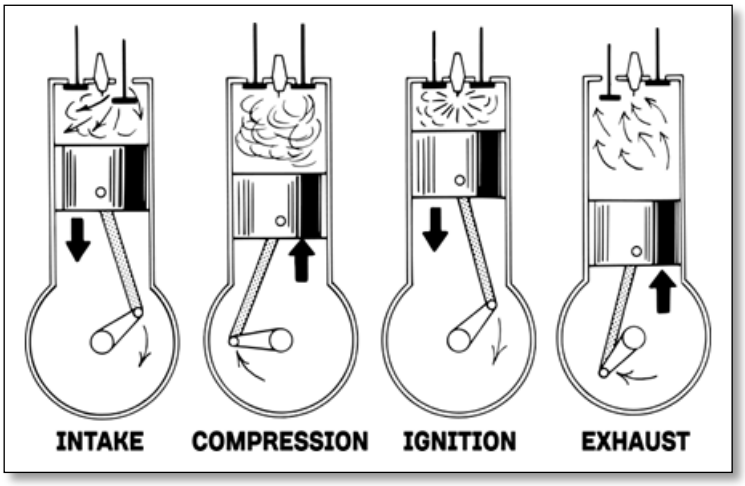


Εικόνα 6. Κινητήρας εσωτερικής καύσης υδρογόνου.
[Πηγή: https://www1.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/tech_validation/pdfs/fcm03r0.pdf]

Ευρέως, ενώ οι κυψέλες καυσίμου είναι πιο αποδοτικές σε χαμηλότερα φορτία, οι ΜΕΚ τείνουν να είναι πιο αποδοτικές σε υψηλά φορτία, με τρόπο που μπορεί να επιτρέψει στις δύο τεχνολογίες να είναι επιτυχείς για διαφορετικές εφαρμογές.

Οι ΜΕΚ υδρογόνου έχουν τον ίδιο τετράχρονο κύκλο καύσης με τους βενζινοκινητήρες, που περιλαμβάνει εισαγωγή, συμπίεση, ανάφλεξη και εξάτμιση και παράγει περιστροφική κίνηση. Αυτό απεικονίζεται στην Εικόνα 7.

1. **Εισαγωγή:** ο αέρας και το καύσιμο αναμιγνύονται και εισέρχονται στον κύλινδρο
2. **Συμπίεση:** το μείγμα συμπιέζεται στο θάλαμο
3. **Ανάφλεξη:** το συμπιεσμένο μείγμα πυροδοτείται και αναφλέγεται, πιέζοντας το έμβολο προς τα κάτω
4. **Εξάτμιση:** η εξάτμιση εξέρχεται από τον κύλινδρο και ο κύκλος ολοκληρώνεται



Εικόνα 7. Ο τυπικός τετράχρονος κύκλος καύσης ενός κινητήρα

Όσον αφορά τις ιδιότητες καύσης του υδρογόνου, το ευρύ φάσμα ευφλεκτότητάς του αποτελεί πλεονέκτημα: αυτό σημαίνει ότι οι ΜΕΚ υδρογόνου εκκινούν εύκολα, παρέχουν μεγαλύτερη οικονομία καυσίμου και πληρέστερη καύση. Επιπλέον, η ενέργεια ανάφλεξης του υδρογόνου είναι μία τάξη μεγέθους μικρότερη από εκείνη που απαιτείται για τη βενζίνη, πράγμα που σημαίνει φτωχά μίγματα και άμεση ανάφλεξη. Ωστόσο, αυτό μπορεί να οδηγήσει σε πρόωρη ανάφλεξη, μία πολύ γνωστή πρόκληση για τις ΜΕΚ υδρογόνου. Άλλες ιδιαιτερότητες που σχετίζονται με τις ιδιότητες καύσης του υδρογόνου περιλαμβάνουν:

- Η **θερμοκρασία αυτοανάφλεξης** του υδρογόνου είναι σχετικά υψηλή, απαιτώντας διαφορετικό λόγο συμπίεσης,

- Η υψηλή **ταχύτητα φλόγας** του υδρογόνου σημαίνει ότι οι κινητήρες υδρογόνου μπορούν να προσεγγίσουν περισσότερο έναν θερμοδυναμικά ιδανικό κύκλο,

- Η υψηλή ικανότητα **διάχυσης** του υδρογόνου (ικανότητα διασποράς στον αέρα) παρέχει ένα πιο ομοιόμορφο μίγμα, αλλά αποτελεί μειονέκτημα σε περίπτωση που αναπτυχθεί διαρροή,

- Η **χαμηλή πυκνότητα** του υδρογόνου δημιουργεί προκλήσεις όσον αφορά την αποθήκευση καυσίμου και τη μειωμένη ενεργειακή πυκνότητα του μίγματος καυσίμου-αέρα.

Οι πτυχές της ασφάλειας των οχημάτων που κινούνται με κινητήρα καύσης υδρογόνου παρουσιάζουν επίσης ορισμένες ιδιαιτερότητες. Για παράδειγμα, απαιτείται προσοχή όσον

αφορά τους κλειστούς χώρους (όπως τα γκαράζ) και τον εξαερισμό, καθώς και τη συμπεριφορά σε περίπτωση σύγκρουσης.

Προτεινομενη Βιβλιογραφία → Μία χρήσιμη δημοσίευση από το εργαλεία H2 σχετικά με τις πτυχές της ασφάλειας των οχημάτων που κινούνται με υδρογόνο με κινητήρες εσωτερικής καύσης https://h2tools.org/sites/default/files/2019-09/310002.pdf

3.2. Λέβητες Υδρογόνου

Στο εγγύς μέλλον, αναμένεται ότι λέβητες με δυνατότητα καύσης 100% υδρογόνου θα είναι διαθέσιμοι στο εμπόριο σε χώρες όπως: το Ηνωμένο Βασίλειο και η Ιρλανδία. Ωστόσο, οι περισσότεροι σύγχρονοι λέβητες - και άλλες συσκευές αερίου που χρησιμοποιούμε σήμερα - είναι ήδη σε θέση να λειτουργούν με μείγμα υδρογόνου έως και 20%. Στις εταιρείες που κατασκευάζουν συσκευές αερίου και οι οποίες ενδέχεται να παρέχουν σύντομα συστήματα υδρογόνου περιλαμβάνονται οι: Worcester (μέρος του ομίλου Bosch), Viessmann και Baxi.

Εικόνα 8. Η ιδέα ενός λέβητα 100% υδρογόνου

Μία από τις πιο συχνές ερωτήσεις - και πηγή ανησυχίας - σχετικά με τους λέβητες υδρογόνου αφορά το κόστος τους. Ωστόσο, οι κατασκευαστές πιστεύουν ότι δεν θα κοστίζουν περισσότερο από το αντίστοιχο φυσικό αέριο: περίπου μεταξύ 600 λιρών (700 ευρώ) για ένα οικονομικό μοντέλο και 2.000 λιρών (2.400 ευρώ) για ένα premium μοντέλο. Η διαδικασία εγκατάστασης αναμένεται επίσης να είναι πολύ παρόμοια με εκείνη των λεβήτων φυσικού αερίου, με παρόμοιο κόστος που προβλέπεται.

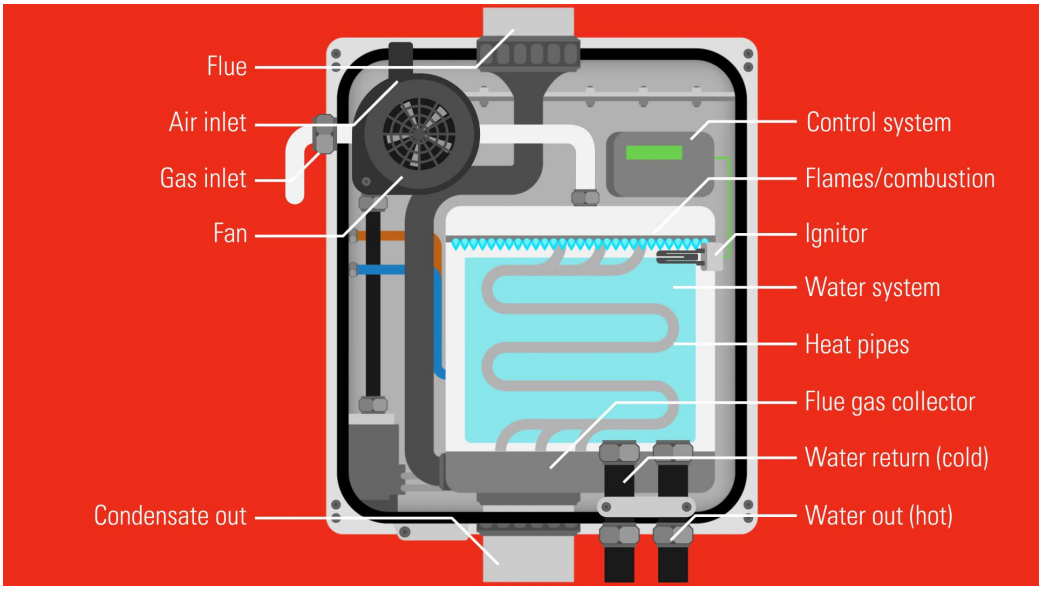
Έργα και προγράμματα σε πολλές χώρες διερευνούν επί του παρόντος τη χρήση του υδρογόνου ως καυσίμου για οικιακές και βιομηχανικές συσκευές. Για παράδειγμα, το πρόγραμμα **HyDeploy** που διεξάγεται στο Πανεπιστήμιο Keele, στην Αγγλία, δοκιμάζει τα αποτελέσματα της ανάμειξης υδρογόνου και φυσικού αερίου. Το πρόγραμμα διευκόλυνε την

έγχυση υδρογόνου σε ένα τμήμα του δικτύου φυσικού αερίου του Ηνωμένου Βασιλείου για πρώτη φορά, ενώ για το εγγύς μέλλον προγραμματίζονται μεγαλύτερες επιδείξεις. Περισσότερες πληροφορίες διατίθενται στη διεύθυνση www.hydeploy.co.uk.

Ομοίως, το νέο Κέντρο Καινοτομίας του Gas Networks Ireland (GNI), στο Δουβλίνο, δοκιμάζει διάφορα μείγματα υδρογόνου και μεθανίου (έως 10% υδρογόνο), καθώς και τις εφαρμογές τους σε συσκευές όπως λέβητες, σόμπες και τζάκια φυσικού αερίου. Περισσότερες πληροφορίες είναι διαθέσιμες στη διεύθυνση https://www.gasnetworks.ie.

3.2.1. Λειτουργία Λεβήτων Υδρογόνου

Παρόλο που η συνολική διαδικασία ενός λέβητα υδρογόνου είναι η ίδια με έναν παραδοσιακό λέβητα, απαιτούνται ορισμένες τροποποιήσεις. Μία σχηματική απεικόνιση των κύριων συστατικών του μπορεί να δει κανείς στην Εικόνα 9.



Εικόνα 9. Βασικά στοιχεία ενός λέβητα υδρογόνου.
[Πηγή: https://youtu.be/241Ltw7B8ZA]

Η λειτουργία ενός λέβητα υδρογόνου περιλαμβάνει τέσσερα στάδια:

1) **Το υδρογόνο και το οξυγόνο εισέρχονται στον λέβητα.**
   - ✓ Το υδρογόνο (που προέρχεται από την κύρια παροχή) και το οξυγόνο (από τον αέρα) εισέρχονται μέσω εισόδων που περιέχουν βαλβίδες που ελέγχουν τις ποσότητες τους.
   - ✓ Η ποσότητα του αερίου επηρεάζει το μέγεθος της φλόγας.

2) **Τα δύο αέρια αναμειγνύονται και καίγονται.**
   - ✓ Το υδρογόνο και το οξυγόνο αναμιγνύονται και καίγονται σε έναν καταλυτικό καυστήρα.
   - ✓ Λόγω της ευφλεκτότητας του υδρογόνου, οι καυστήρες πρέπει να είναι ειδικά σχεδιασμένοι ώστε να μπορούν να περιορίσουν τις φλόγες.
   - ✓ Επίσης, απαιτείται ανιχνευτής φλόγας, καθώς οι φλόγες του υδρογόνου είναι σχεδόν αόρατες.

3) **Το καυτό μείγμα εισέρχεται στον εναλλάκτη θερμότητας.**
   - ✓ Ο εναλλάκτης θερμότητας αποτελείται από διάφορους σωλήνες μέσω των οποίων ταξιδεύουν τα θερμά αέρια, που περιβάλλονται από κρύο νερό.
   - ✓ Το νερό αυτό, όταν θερμανθεί, στέλνεται στις βρύσες και στα συστήματα θέρμανσης.

4) **Τα παραπροϊόντα εξέρχονται από το σύστημα.**
   - ✓ Το άμεσο παραπροϊόν της καύσης του υδρογόνου (νερό) εξέρχεται από το σύστημα.
   - ✓ Διαφεύγουν επίσης τα θερμά καυσαέρια (υδρογόνο και οξυγόνο).
   - ✓ Η μικρή ποσότητα NOx που παράγεται κατά την καύση μπορεί επίσης να εξέλθει από το σύστημα μέσω της καπνοδόχου.

Βίντεο → Πώς λειτουργεί ένας λέβητας υδρογόνου (από τη Viessmann). https://youtu.be/241Ltw7B8ZA.

Συζήτηση → Συνιστάται μία συζήτηση μέσα στην τάξη σχετικά με τα πρόσθετα εξαρτήματα ενός λέβητα υδρογόνου και με τα γενικά ζητήματα ασφάλειας.

ΣΥΝΕΧΗΣ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ 2:
ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΟΣ ΛΕΒΗΤΑ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ

-------- Τέλος Ενότητας 3 --------

Παραπομπές

Best Practices - Hydrogen Tools. Available at: https://h2tools.org/bestpractices.

Hydrogen Use in Internal Combustion Engines. rep. Available at: https://www1.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/tech_validation/pdfs/fcm03r0.pdf.

NFPA Hazard Diamond. Available at: https://myusf.usfca.edu/environmental-health-safety/nfpa-hazard-diamond.

Viessmann. Available at: https://www.viessmann.co.uk.

Πληροφορίες σχετικά με τους πίνακες και τις εικόνες δίνονται ως επεξήγηση κατά περίπτωση.