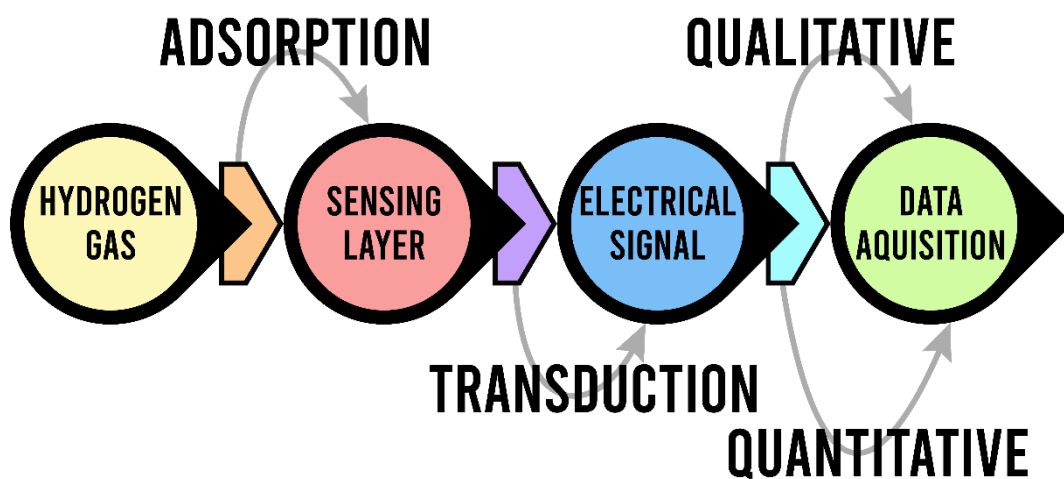


Αισθητήρες υδρογόνου

Με στόχο την απαλλαγή της κοινωνίας μας από τις ανθρακούχες εκπομπές ορυκτών καυσίμων μέσω της εφαρμογής του υδρογόνου, πρέπει να αντιμετωπιστούν τεχνικές προκλήσεις. Μία από τις κύριες ανησυχίες για την ευρεία υιοθέτηση και μετατροπή σε συστήματα υδρογόνου είναι οι ανησυχίες για την ασφάλεια, όπως η εκρηκτική φύση του και το τόσο ευρύ φάσμα ευφλεκτότητας. Προκειμένου να διασφαλιστεί η ασφαλής λειτουργία αυτών των πρακτικών, θα πρέπει να εφαρμόζεται ανίχνευση και παρακολούθηση του υδρογόνου σε όλες τις διαδικασίες που αφορούν το υδρογόνο. Τελευταία, έχει δοθεί έμφαση στην έρευνα των τεχνολογιών αισθητήρων υδρογόνου και την αποτελεσματικότητά τους, δεδομένου ότι οι αισθητήρες υδρογόνου έχουν μελετηθεί καλά και έχουν παραχθεί με τη μορφή εμπορεύσιμων και εμπορικών προϊόντων που μπορούν να αγοραστούν. Οι αισθητήρες υδρογόνου είναι συσκευές που μετατρέπουν μία χημική ή φυσική αλληλεπίδραση του αερίου υδρογόνου σε μετρήσιμο σήμα. Συνήθως, λειτουργούν με προσρόφηση υδρογόνου σε υλικό ανίχνευσης στερεάς κατάστασης, το οποίο υφίσταται μία αντίστοιχη μεταβολή των ιδιοτήτων του και παρέχει αποτελεσματικά τη μετατροπή της συγκέντρωσης του αερίου σε μία μετρούμενη τιμή. Αυτό παρουσιάζεται περαιτέρω στο σχήμα 1, το παρακάτω διάγραμμα λειτουργικής ροής που περιγράφει τις λειτουργίες ενός αισθητήρα υδρογόνου.



Σχήμα 2: Λειτουργικό διάγραμμα ενός αισθητήρα υδρογόνου.

Απαιτήσεις και προδιαγραφές για αισθητήρες υδρογόνου

Όπως περιγράφεται από τους Hübert κ.ά., οι απαιτήσεις για τους αισθητήρες υδρογόνου μπορούν να συνοψιστούν ως εξής (Hübert κ.ά., 2011):

- Χαμηλή κατανάλωση ενέργειας
- Μικρό μέγεθος
- Απλή ενσωμάτωση και διασύνδεση συστήματος
- Απλή λειτουργία και συντήρηση με μεγάλο διάστημα συντήρησης
- Ασφαλής απόδοση, π.χ. σχεδιασμός αισθητήρων με αντικερηκτική προστασία και προστατευτικό πλαίσιο/κάλυμμα
- Αξιόπιστα αποτελέσματα επαρκούς ακρίβειας και ευαισθησίας (αβεβαιότητα < 5-10% του σήματος)
- Γρήγορη αποκατάσταση και χρόνος απόκρισης (< 1s)
- Μεγάλη διάρκεια ζωής (> 5 έτη)
- Χαμηλή διασταυρούμενη ευαισθησία (π.χ. υδρογονάνθρακες, υδρόθειο, μονοξείδιο του άνθρακα)
- Σταθερό σήμα με χαμηλό θόρυβο
- Ένδειξη υδρογόνου σε εύρος συγκεντρώσεων 0,01-10% (ασφάλεια) ή 1-100% (κυψέλες καυσίμου)
- Ανθεκτικότητα, συμπεριλαμβανομένης της χαμηλής ευαισθησίας σε περιβαλλοντικές παραμέτρους όπως: Θερμοκρασία (1-30-80°C [ασφάλεια], 70-150°C [κυψέλες καυσίμου]), πίεση (80-110 kPa), σχετική υγρασία (10-98%) και ρυθμός ροής αερίου.

Πίνακας 1: Προδιαγραφές στόχων για αισθητήρες υδρογόνου. Προσαρμογή από (Manjanacas and Nieto, 2016).

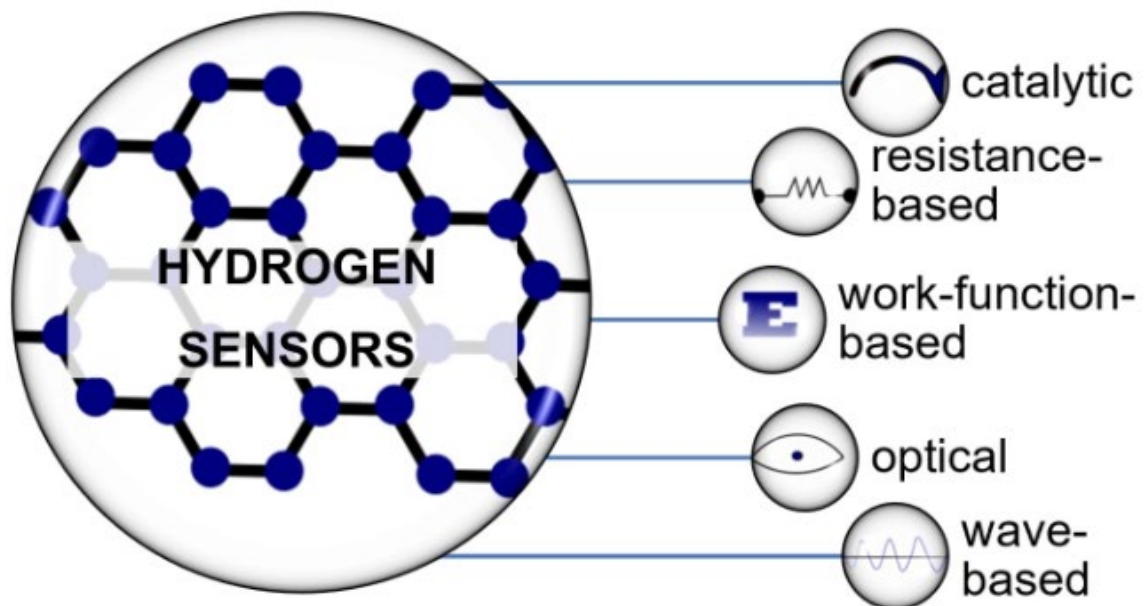
Παράμετρος	Αξία
Εύρος μέτρησης	0.1-10%
Θερμοκρασία λειτουργίας	-30 έως 80°C
Χρόνος απόκρισης	< 1s
Ακρίβεια	5% της πλήρους κλίμακας
Περιβάλλον αερίου	Αέρας περιβάλλοντος, 10-98 Σχετική υγρασία %
Διάρκεια ζωής	10 χρόνια
Παρεμβολές	Αντίσταση

Τύποι αισθητήρων

Σε αυτή την ενότητα θα εξετάσουμε πέντε από τους κύριους τύπους αισθητήρων υδρογόνου που διατίθενται στην αγορά. Αν και περιλαμβάνονται πέντε εδώ, έχουν αναφερθεί και άλλοι τύποι αισθητήρων που, είτε είναι διαθέσιμοι, είτε αναδύονται στην αγορά. Για παράδειγμα, οι Hubert et al. έχουν υποδιαιρέσει τους διάφορους τύπους αισθητήρων υδρογόνου σε 8 κύριες κατηγορίες:

1. Ακουστική.
2. Οπτική.
3. Μηχανική.
4. Με βάση την αντίσταση.
5. Θερμική αγωγιμότητα.
6. Καταλυτική.
7. Ηλεκτροχημική.
8. Με βάση τη λειτουργία εργασίας.

Από την άλλη πλευρά, οι συγγραφείς όπως οι Pham και Brown έχουν υποδιαιρέσει τους τύπους αισθητήρων σε αυτούς που χρησιμοποιούν υλικά 2D.



Σχήμα 3: Διαφορετικοί τύποι αισθητήρων που χρησιμοποιούν υλικά 2D. Προσαρμογή από (Pham and Brown, 2020).

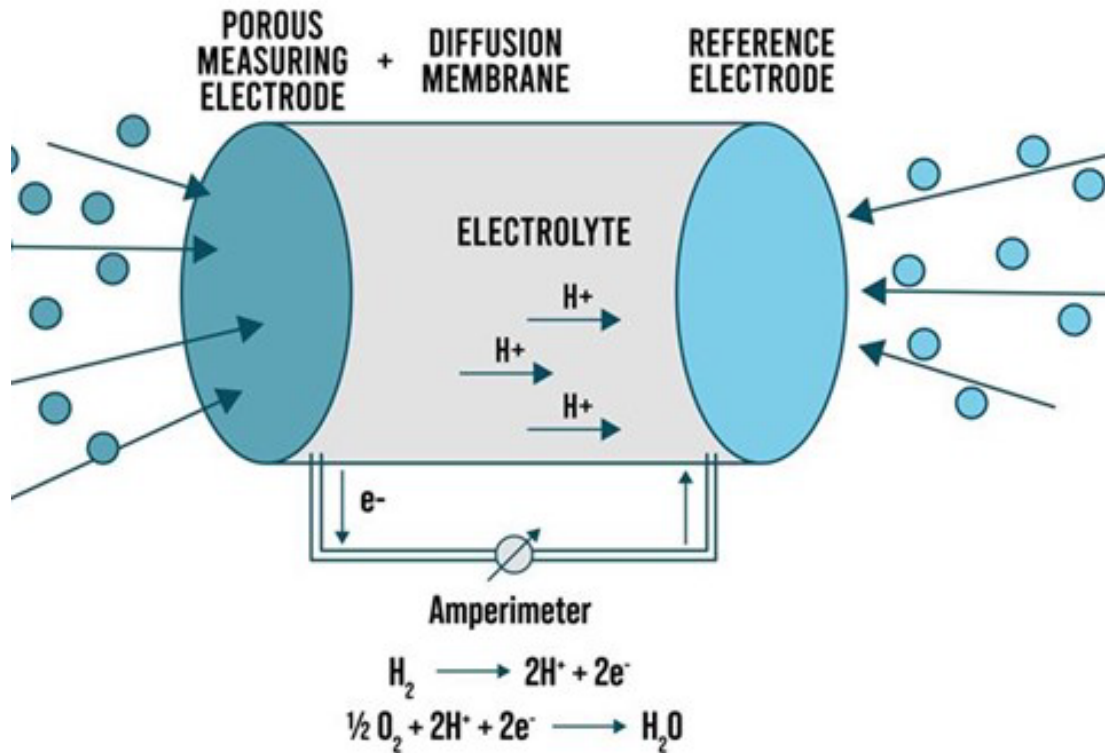
Ηλεκτροχημικοί αισθητήρες

Οι ηλεκτροχημικοί αισθητήρες λειτουργούν καθώς το ηλεκτρικό ρεύμα διέρχεται από ένα ηλεκτρόδιο ανίχνευσης που παράγεται από μια ηλεκτροχημική αντίδραση. Αυτή λαμβάνει χώρα στην επιφάνεια του ηλεκτροδίου ανίχνευσης που είναι επικαλυμμένο με έναν τύπο καταλύτη, π.χ. λευκόχρυσο. Ένας ηλεκτροχημικός αισθητήρας θεωρητικά είναι ουσιαστικά μία μεταλλική άνοδος και μία μεταλλική κάθοδος βυθισμένες σε ηλεκτρολυτικό διάλυμα ώστε να επιτρέπεται η μεταφορά ιόντων μεταξύ των δύο ηλεκτροδίων. Συνήθως, οι ηλεκτροχημικοί αισθητήρες έχουν δύο ή τρεις διαφορετικές διαμορφώσεις ηλεκτροδίων με μία μεμβράνη για τη μεταφορά αερίου, το ηλεκτρικό ρεύμα είναι ανάλογο της συγκέντρωσης υδρογόνου και το ρεύμα αυτό μπορεί να μετρηθεί για τον προσδιορισμό της συγκέντρωσης αερίου. Μερικές φορές ο ηλεκτρολύτης είναι ένα στερεό πολυμερές, το οποίο απομακρύνει την πιθανότητα διαρροής που μπορεί να προκύψει κατά τη χρήση υγρών ηλεκτρολυτών. Οι ποτενσιομετρικοί (potentiometric) και οι αμπερομετρικοί (amperometric) αισθητήρες είναι οι δύο κύριες διαμορφώσεις ηλεκτροχημικών αισθητήρων.

Αμπερομετρικοί - Λειτουργούν με σταθερή εφαρμοζόμενη τάση και το σήμα του αισθητήρα είναι ένα ρεύμα.

Ποτενσιομετρικοί - Λειτουργούν με μηδενικό ρεύμα και το σήμα του αισθητήρα είναι η διαφορά δυναμικού μεταξύ του ηλεκτροδίου ανίχνευσης και ενός ηλεκτροδίου αναφοράς.

Ένα πλεονέκτημα των ηλεκτροχημικών αισθητήρων είναι ότι έχουν καθιερωθεί εμπορικά, η υψηλή ευαισθησία τους στο υδρογόνο και η πολύ μικρή κατανάλωση ενέργειας. Επιπλέον, είναι αρκετά οικονομικοί και έχουν πολύ καλή ακρίβεια. Ένα σημαντικό μειονέκτημα των ηλεκτροχημικών αισθητήρων είναι ότι η υψηλή ευαισθησία τους στο υδρογόνο μειώνεται με την πάροδο του χρόνου λόγω της υποβάθμισης του ηλεκτροχημικού καταλύτη, καθώς μολύνονται εύκολα από τα αέρια της διεργασίας. Επιπλέον, έχουν μέτρια εκλεκτικότητα και λειτουργούν με περιορισμένο εύρος θερμοκρασιών.



Σχήμα 4: Σχηματική αναπαράσταση της αρχής μέτρησης ενός ηλεκτροχημικού αισθητήρα υδρογόνου.

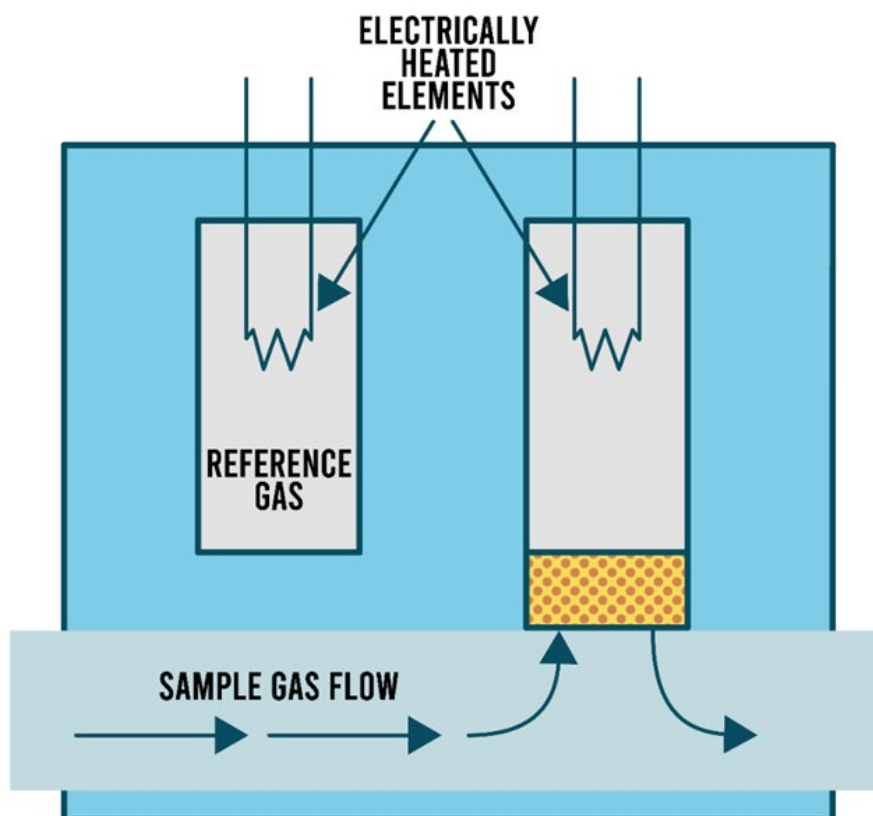
Αισθητήρες θερμικής αγωγιμότητας

Οι αισθητήρες θερμικής αγωγιμότητας λειτουργούν με βάση την αρχή της μεταβολής που προκαλείται από τη θερμοκρασία ενός ηλεκτρικά θερμαινόμενου αισθητήριου στοιχείου. Η θερμική αγωγιμότητα είναι μια ιδιότητα για κάθε αέριο. Οι μετρήσεις είναι θετικές για το υδρογόνο, χρησιμοποιώντας τον αέρα ως αέριο αναφοράς. Ο λόγος είναι ότι ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας για το υδρογόνο σε κανονικές συνθήκες (273K και 101325 Pa) είναι ο μεγαλύτερος από όλα τα γνωστά αέρια. Όπως φαίνεται στο σχήμα 5 παρακάτω, ένας αισθητήρας θερμικής αγωγιμότητας μετρά τη συγκέντρωση όπως ενός αερίου σε ένα δυαδικό μείγμα μετρώντας τη θερμική αγωγιμότητα προς το αέριο αναφοράς. Χρησιμοποιούνται θερμοστόρες για να σχηματίσουν το αισθητήριο στοιχείο, το ένα σε επαφή με το αέριο δείγμα και το άλλο σε επαφή με το αέριο αναφοράς. Η θερμοκρασία του στοιχείου ανίχνευσης, που καθορίζει την ηλεκτρική αντίσταση, εξαρτάται από την απώλεια θερμότητας μέσω του περιβάλλοντος αερίου, ενώ το σήμα του αισθητήρα είναι η μεταβολή της αντίστασης. Η μεταβολή αυτή είναι ανάλογη της συγκέντρωσης υδρογόνου στο αέριο μείγμα.

Ένα πλεονέκτημα των αισθητήρων θερμικής αγωγιμότητας είναι ότι είναι πολύ σταθερές συσκευές, καθώς δεν υπάρχει χημική αλληλεπίδραση. Αυτό τελικά σημαίνει ότι είναι πολύ λιγότερο ευαίσθητοι

στη μόλυνση. Επιπλέον, είναι εξαιρετικά ακριβείς, αξιόπιστοι, έχουν μεγάλη διάρκεια ζωής (> 5 έτη) και έχουν ευρύ φάσμα ανίχνευσης υδρογόνου (< 1-100% H₂).

Ωστόσο, υπάρχουν ορισμένα μειονεκτήματα στη χρήση αυτού του τύπου αισθητήρα. Για παράδειγμα, οι αισθητήρες θερμικής αγωγιμότητας δυσκολεύονται να ανιχνεύσουν χαμηλές συγκεντρώσεις αερίου υδρογόνου. Εξαιτίας αυτού, συνήθως συνδυάζονται με άλλους τύπους αισθητήρων υδρογόνου. Καθώς έχουν επίσης χαμηλή επιλεκτικότητα αερίου, αυτό δημιουργεί πρόβλημα σε εφαρμογές διεργασιών, αλλά όχι όταν υπάρχει μόνο ένα καύσιμο αέριο.

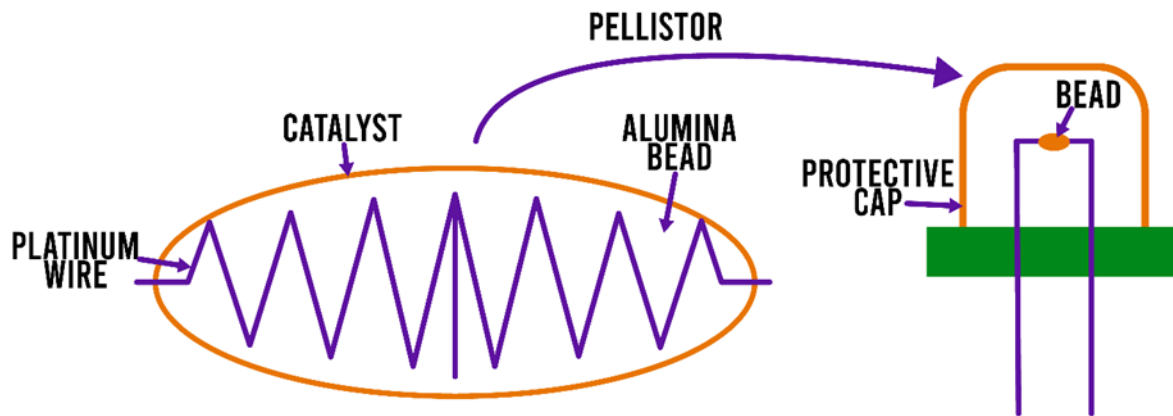


Σχήμα 5: Σχηματική αναπαράσταση ενός αισθητήρα θερμικής αγωγιμότητας.

Καταλυτικοί αισθητήρες

Οι καταλυτικοί αισθητήρες υδρογόνου βασίζονται στην οξείδωση του αερίου στην επιφάνεια ενός καταλυτικού στοιχείου που θερμαίνεται ηλεκτρικά. Αυτή η οξείδωση χρησιμοποιεί το οξυγόνο του αέρα και προκαλεί αύξηση της θερμοκρασίας στο στοιχείο ανίχνευσης, η οποία εξαρτάται από τη συγκέντρωση του αερίου. Ο πιο συνηθισμένος τύπος ανιχνευτή είναι ο τύπος pellistor, ο οποίος σχηματίζεται από δύο κεραμικές χάντρες με ενσωματωμένα σύρματα πλατίνας, εκ των οποίων η μία είναι επικαλυμμένη με ένα καταλυτικό υλικό, στο οποίο λαμβάνει χώρα οξείδωση του υδρογόνου. Η

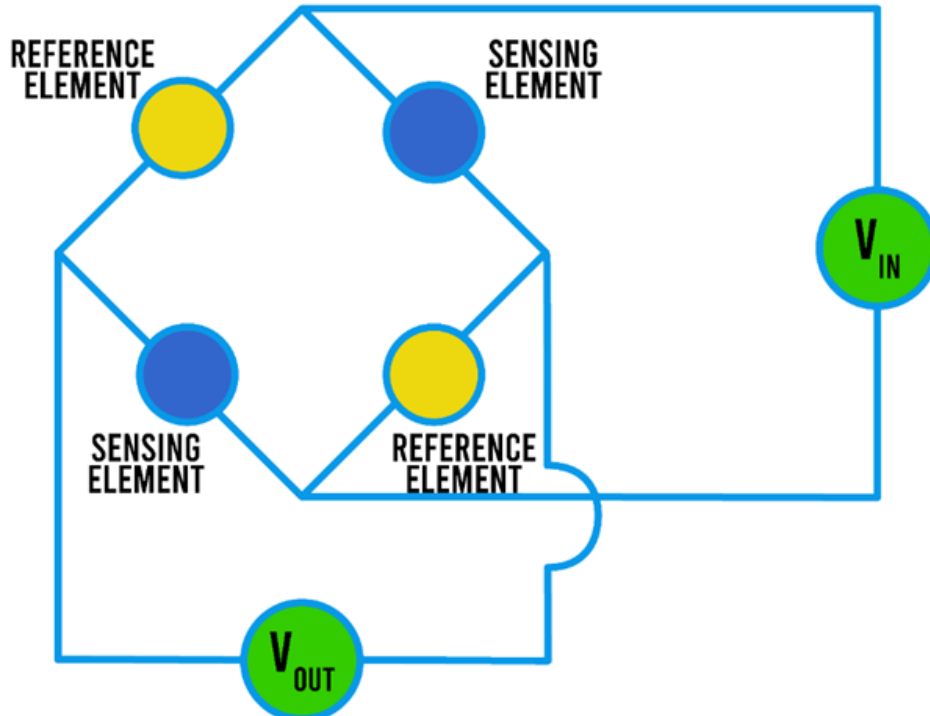
οξειδωση του αερίου προκαλεί αύξηση της θερμοκρασίας στο σφαιρίδιο του καταλύτη, προκαλώντας μεταβολή της ηλεκτρικής αντίστασης του σύρματος πλατίνας, το οποίο λειτουργεί και ως θερμαντήρας και αποτελεί μέτρο της συγκέντρωσης του αερίου.



Σχήμα 6: Σχηματική αναπαράσταση Pellistor.

Το θερμαινόμενο σύρμα περιέχεται σε ένα πιστοποιημένο κατά το ex-πρότυπο περίβλημα με πορώδες συμπακνωμένο μέταλλο που επιτρέπει την είσοδο του αερίου. Για τη μέτρηση αυτών των μεταβολών, τα pellistors συνδέονται μεταξύ τους σε αυτό που είναι γνωστό ως γέφυρα wheatstone, όπως φαίνεται στο σχήμα 7 παρακάτω. Ένας άλλος τύπος καταλυτικού αισθητήρα, ο θερμοηλεκτρικός αισθητήρας, βασίζεται στην ίδια αρχή της παραγωγής ηλεκτρικού σήματος από μια καταλυόμενη εξώθερμη αντίδραση οξειδωσης του υδρογόνου, αλλά, στην περίπτωση αυτή,

χρησιμοποιεί το θερμοηλεκτρικό φαινόμενο, το οποίο ουσιαστικά συνίσταται στην άμεση μετατροπή της διαφοράς θερμοκρασίας σε ηλεκτρική τάση, για να παράγει το ηλεκτρικό σήμα.



Σχήμα 7: Αρχή μέτρησης καταλυτικού αισθητήρα.

Ένα μεγάλο πλεονέκτημα της χρήσης καταλυτικών αισθητήρων είναι ότι διαθέτουν μία καλά αναπτυγμένη τεχνολογία και μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την ανίχνευση οποιουδήποτε καύσιμου αερίου. Αυτοί οι ανιχνευτές είναι μικροί και χρησιμοποιούνται για την ανίχνευση εύφλεκτων αερίων από 0% έως 100% κατώτερο όριο έκρηξης (LEL).

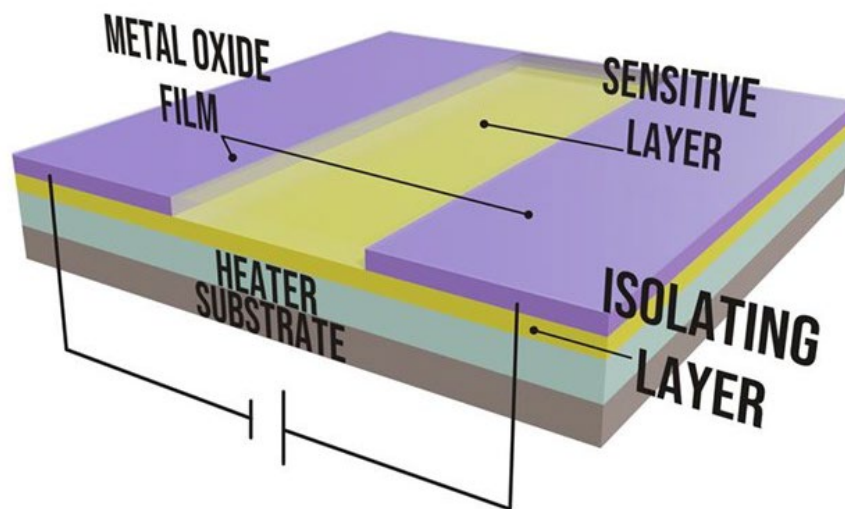
Κάτι που πρέπει να σημειωθεί είναι ότι οι καταλυτικοί αισθητήρες δεν αφορούν αποκλειστικά το υδρογόνο. Αυτό σημαίνει ότι συχνά δεν μπορούν να διαφοροποιήσουν μεταξύ των εύφλεκτων αερίων. Για τη λειτουργία τους απαιτείται η παρουσία οξυγόνου και δεν συνιστάται η χρήση του πάνω από το κατώτερο όριο έκρηξης. Επιπλέον, μπορούν να δώσουν λανθασμένες ενδείξεις σε ατμόσφαιρες πλούσιες σε αέρια, π.χ. πάνω από το ανώτερο όριο έκρηξης (UEL). Ο καταλύτης μπορεί επίσης να δηλητηριαστεί από ιχνοαέρια, όπως το υδρόθειο και οι σιλκόνες και, στη συνέχεια, απαιτεί τακτική βαθμονόμηση και αντικατάσταση.

Ημι-αγώγιμοι αισθητήρες μεταλλικού οξειδίου

Η αρχή λειτουργίας των αισθητήρων μεταλλικών οξειδίων (MOX) είναι ότι η επιφανειακή αλληλεπίδραση μεταξύ ενός αναγωγικού αερίου και ενός ημιαγωγού που είναι ευαίσθητος στα αέρια, τροποποιεί την αγωγιμότητα του τελευταίου. Βασικά, ένα φιλμ οξειδίων μετάλλων εφαρμόζεται σε ένα υλικό υποστρώματος μεταξύ δύο ηλεκτροδίων, το οποίο εμφανίζει ευαισθησία προς το αέριο υδρογόνο (όπως φαίνεται στο σχήμα 8 παρακάτω). Η μεταβολή της ηλεκτρικής αγωγιμότητας του ημιαγωγού αποτελεί μέτρο της συγκέντρωσης του αερίου υδρογόνου.

Ένα πλεονέκτημα της χρήσης ενός ανιχνευτή MOX είναι ότι μπορεί να έχει γρήγορο χρόνο απόκρισης και αποδεκτή διάρκεια ζωής. Επιπλέον, είναι χαμηλού κόστους, μικρού τύπου αισθητήρας και έχει ανεκτή κατανάλωση ενέργειας.

Ένα σημαντικό μειονέκτημα είναι ότι οι αισθητήρες MOX είναι πολύ ευαίσθητοι στους υδρατμούς και σε πολλά άλλα αέρια που μπορεί να παράγουν ψευδείς ενδείξεις και δεν θεωρούνται επιλεκτικές συσκευές. Επιπλέον, έχουν μεγάλο και μη γραμμικό χρόνο απόκρισης, ενώ είναι ευαίσθητοι και στη μόλυνση.



Σχήμα 8: Σχηματική αναπαράσταση ενός αισθητήρα υδρογόνου μεταλλικού οξειδίου.

Οπτικοί αισθητήρες υδρογόνου

Οι οπτικοί αισθητήρες βασίζονται σε ένα οπτικά ενεργό υλικό που μετατρέπει τη συγκέντρωση υδρογόνου σε οπτικό σήμα. Είναι κατάλληλοι για λειτουργία σε εκρηκτικές ατμόσφαιρες επειδή είναι ηλεκτρικά απομονωμένοι. Υπάρχουν πολλοί τύποι οπτικών αισθητήρων, με τους πλέον αναφερόμενους να είναι οι συσκευές που βασίζονται στις οπτικές ιδιότητες των μεμβρανών παλλαδίου. Η έκθεση σε υδρογόνο προκαλεί αλλαγή διαστάσεων σε αυτό το μέταλλο, προκαλώντας τροποποίηση της αποτελεσματικής οπτικής διαδρομής του, η οποία είναι ανάλογη της συγκέντρωσης υδρογόνου. Έτσι, χρησιμοποιούνται τεχνικές διαφοροποίησης για τη μέτρηση αυτής της διαστατικής αλλαγής, για παράδειγμα η μέτρηση με συμβολομετρία ή η μέτρηση της ανακλαστικότητας.

Ένα πλεονέκτημα της χρήσης του οπτικού αισθητήρα είναι ότι εξαλείφει τον κίνδυνο παροχής μιας πηγής ανάφλεξης στη θέση της διαρροής, επειδή πρόκειται για ένα οπτικό και όχι ηλεκτρικό σήμα και λόγω της διαμόρφωσής του στο πεδίο, θα μπορούσε να καλύψει μια ευρεία περιοχή παρακολούθησης με τη χρήση μόνο μίας συσκευής. Επιπλέον, είναι λιγότερο ευαίσθητος στον ηλεκτρομαγνητικό θόρυβο από τους άλλους και μπορεί να λειτουργήσει απουσία οξυγόνου.

Από την άλλη πλευρά, ένα μειονέκτημα είναι ότι οι οπτικοί αισθητήρες μπορεί να είναι ευαίσθητοι σε παρεμβολές από το φως του περιβάλλοντος και σε μεταβολές της θερμοκρασίας.

Τοποθεσία των αισθητήρων

Η θέση ενός αισθητήρα υδρογόνου είναι ένα από τα πιο κρίσιμα ζητήματα που πρέπει να εξεταστούν όταν πρόκειται να χρησιμοποιηθεί. Η θέση του αισθητήρα σχετίζεται άμεσα με το χρόνο απόκρισης.

Το πρότυπο ISO/TR 15916:2015 "Basic considerations for the safety of hydrogen systems" ("ISO - ISO/TR 15916:2015 - Basic considerations for the safety of hydrogen systems", n.d.) περιλαμβάνει ορισμένες προτεινόμενες θέσεις για τους αισθητήρες υδρογόνου:

1. Θέσεις όπου θα μπορούσε να συσσωρευτεί υδρογόνο
2. Σε συνδέσεις υδρογόνου που διαχωρίζονται συνήθως (π.χ. θύρες ανεφοδιασμού υδρογόνου)
3. Σε αγωγούς εξάτμισης κτιρίων, εάν το υδρογόνο θα μπορούσε να απελευθερωθεί στο εσωτερικό του κτιρίου
4. Στους αγωγούς εισαγωγής αέρα του κτιρίου, εάν το υδρογόνο θα μπορούσε να μεταφερθεί μέσα στο κτίριο
5. Θέσεις όπου είναι πιθανή η διαρροή ή η έγχυση υδρογόνου

Εκτός από αυτά τα πέντε σημεία που περιγράφονται και το γεγονός ότι πρέπει να γνωρίζετε σε βάθος το σύστημα υδρογόνου όπου πρέπει να εγκατασταθεί ένα σύστημα ανίχνευσης (συνδέσεις σωλήνων, σωλήνες προώθησης/επιστροφής των συστημάτων εξαερισμού), είναι απαραίτητο να διαθέτετε και άλλα εργαλεία για να μπορέσετε να εντοπίσετε τους ανιχνευτές με τον κατάλληλο τρόπο.



Σχήμα 9: Ανιχνευτής υδρογόνου (H₂) Honeywell BW Solo Single Gas Detector.

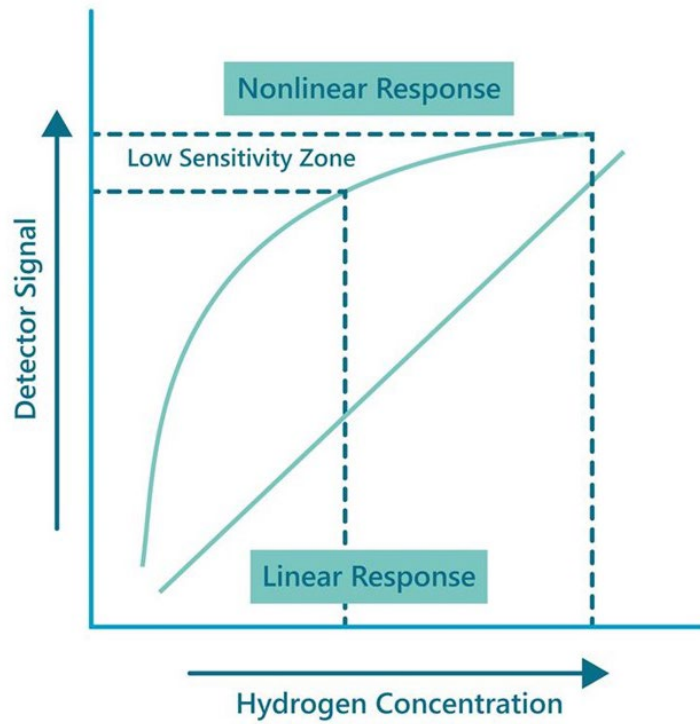
Συντήρηση αισθητήρων υδρογόνου

Στους αισθητήρες υδρογόνου, το αισθητήριο στοιχείο είναι το ευαίσθητο στοιχείο που είναι υπεύθυνο για τη μετατροπή ενός φυσικού μέτρου, όπως η συγκέντρωση υδρογόνου, σε ένα χρήσιμο σήμα εξόδου. Από την άλλη πλευρά, ένας μετατροπέας μετατρέπει το σήμα εξόδου σε χρήσιμες πληροφορίες που εμφανίζονται από τη διεπαφή χρήστη. Η απόδοση των περισσότερων ανιχνευτών υδρογόνου επιδεινώνεται με το χρόνο, ενώ ο ρυθμός επιδείνωσης εξαρτάται από τον τύπο του αισθητήρα υδρογόνου και τις συνθήκες λειτουργίας. Η γήρανση των στοιχείων ανίχνευσης μπορεί να προκαλέσει ολίσθηση με την πάροδο του χρόνου. Συνεπώς, η συντήρηση είναι απαραίτητη για τη διατήρηση των ανιχνευτών υδρογόνου σε υψηλό επίπεδο απόδοσης και απαιτείται για την ασφαλή χρήση. Όσον αφορά τις αναφερόμενες πληροφορίες, οι ανιχνευτές πρέπει να είναι:

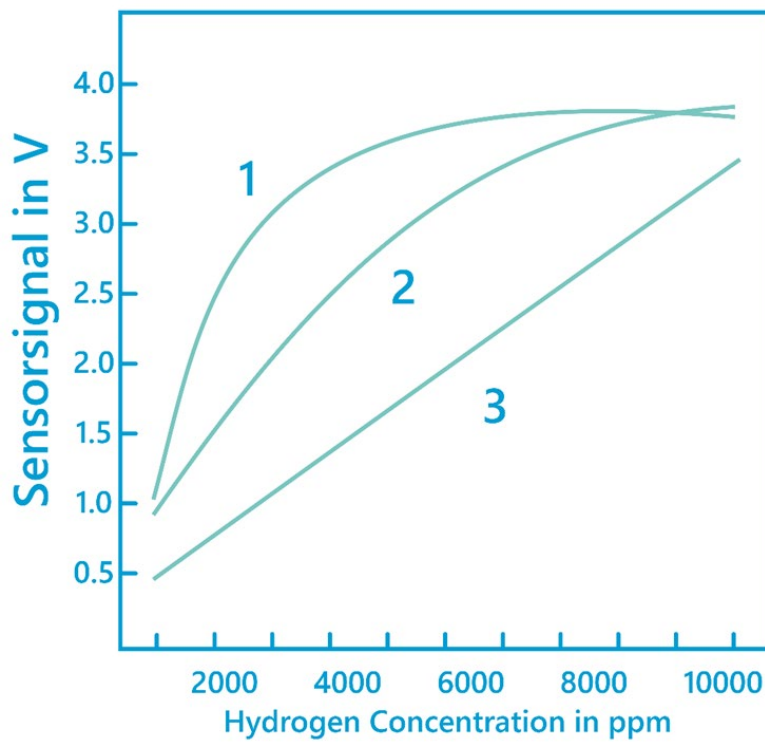
- Βαθμονομείται (ρύθμιση μηδενός και ευαισθησίας) με πρότυπο αέριο σύμφωνα με τη διαδικασία που περιγράφεται στο εγχειρίδιο οδηγιών.
- Καθαρίζεται τακτικά, ιδίως η κεφαλή του ανιχνευτή, ώστε να επιτρέπει στο αέριο να φτάσει στο ευαίσθητο στοιχείο.
- Να επιθεωρείται τακτικά για πιθανές δυσλειτουργίες, ορατές ζημιές ή άλλου είδους φθορές.

Βαθμονόμηση αισθητήρα υδρογόνου

Όσον αφορά τους αισθητήρες υδρογόνου, η βαθμονόμηση πρέπει να είναι μια συνάρτηση που σχετίζεται με τη συγκέντρωση του υδρογόνου και το σήμα του αισθητήρα. Επιπλέον, θα πρέπει να επιτρέπει τη λήψη μιας αναφοράς για τον προσδιορισμό της ακρίβειας του αισθητήρα. Σε ένα ιδανικό σενάριο, αναμένεται γραμμική απόκριση, αλλά κάθε τύπος τεχνολογίας αισθητήρων έχει τη δική του μοναδική απόκριση. Το γεγονός αυτό είναι σαφές όταν συγκρίνονται ηλεκτροχημικοί, ημιαγωγικοί και καταλυτικοί αισθητήρες (Hübert et al., 2011). Αυτό μπορεί να φανεί στο Σχήμα 10 παρακάτω, ενώ παράλληλα συγκρίνεται με τη γραμμική και μη γραμμική απόκριση στο Σχήμα 9. Στο Σχήμα 10, ο πρώτος έχει γραμμική απόκριση, ενώ για τους ηλεκτροχημικούς και ημιαγωγικούς αισθητήρες εμφανίζεται μη γραμμική απόκριση. Όταν εμφανίζονται υψηλές συγκεντρώσεις υδρογόνου, η μη γραμμική απόκριση ενός αισθητήρα προκαλεί μείωση της ευαισθησίας του. Το γεγονός αυτό πρέπει να μελετάται όταν πρόκειται να επιλεγεί μια τεχνολογία αισθητήρα για μια συγκεκριμένη εφαρμογή.



Σχήμα 10: Σύγκριση μη γραμμικής και γραμμικής απόκρισης για έναν αισθητήρα υδρογόνου που σχετίζεται με τη λειτουργία βαθμονόμησης.



Σχήμα 11: Καμπύλη βαθμονόμησης τριών διαφορετικών αισθητήρων υδρογόνου στο εύρος συγκέντρωσης 0,1-1%: 1) αισθητήρας ημιαγωγών, 2) ηλεκτροχημικός αισθητήρας, 3) αισθητήρας καταλυτικής καύσης.

Απόλυτη σύγκριση των τεχνολογιών αισθητήρων υδρογόνου

Όταν εξετάζετε ποιος τύπος αισθητήρα υδρογόνου πρέπει να χρησιμοποιηθεί, θα πρέπει να χρησιμοποιήσετε έναν πίνακα σύγκρισης. Τα τυπικά χαρακτηριστικά και οι πληροφορίες σχετικά με τους πέντε κύριους τύπους αισθητήρων υδρογόνου συνοψίζονται στον πίνακα 2 παρακάτω. Επιπλέον, ο πίνακας αυτός παρέχει τεχνικά στοιχεία των διαφόρων αισθητήρων που διατίθενται στο εμπόριο.

Πίνακας 2: Επισκόπηση των τεχνολογιών τύπου αισθητήρα υδρογόνου.

	Αρχή Λειτουργίας	Τύπος αισθητήρα				
		Ηλεκτροχημική	Θερμική αγωγιμότητα	Catalytic	MOX	Οπτική
		Ηλεκτρικό ρεύμα	Μεταβολή θερμοκρασίας	Αντίσταση θερμοκρασίας	Μεταβολή αγωγιμότητας	Οπτικά ενεργό υλικό
Επιδόσεις	Διάρκεια ζωής (έτη) Επιλεκτικότητα T90 (seg) Εύρος μέτρησης (vol%) Υγρασία που επηρεάζεται Θερμοκρασία που επηρεάζεται Κατανάλωση ισχύος Κόστος	2 Αποδεκτό <30 <4% Ναι Ναι Χαμηλή Καλή	>5 Χαμηλό <15 <1-100% Ναι Ναι Χαμηλή Χαμηλή	>5 Χαμηλό <20 <4% Όχι Όχι Ανεκτή Χαμηλή	2-4 Χαμηλή <30 <2% Ναι Ναι Ανεκτή Χαμηλή	<2 -- <60 0.1-100% Όχι Ναι Ανεκτή Υψηλή
Χαρακτηριστικά	Πλεονεκτήματα	1. Καλά εδραιωμένο εμπορικά 2. Καλό επίπεδο ακρίβειας 3. Μικρό μέγεθος	1. Σταθερές συσκευές 2. Μικρό μέγεθος	1. Καλά ανεπτυγμένη τεχνολογία 2. Μικρό μέγεθος	1. Υψηλή ευαισθησία 2. Μικρό μέγεθος	1. Ευρεία περιοχή λειτουργίας 2. Δεν επηρεάζεται ηλεκτρομαγνητικά 3. Δεν υπάρχει πηγή ανάφλεξης
	Μειονεκτήματα	Εύκολα μολύνεται	1. Δυσκολία στην ανίχνευση πολύ χαμηλών συγκεντρώσεων υδρογόνου	1. Απαιτείται τακτική βαθμονόμηση 2. Μπορεί να δηλητηριαστεί από ιχνοστοιχεία αερίων 3. Μπορεί να δώσει λανθασμένες ενδείξεις	1. Μη γραμμικός χρόνος απόκρισης 2. Ευάλωτος σε μόλυνση 3. Μπορεί να δώσει λανθασμένες ενδείξεις	Ευαίσθητο σε παρεμβολές από το φως του περιβάλλοντος

	Συνήθεις εφαρμογές	Ανίχνευση διαρροών + Παρακολούθηση διεργασιών	Παρακολούθηση διαδικασιών	Ανίχνευση διαρροών	Ανίχνευση διαρροών	Ανίχνευση διαρροών
--	---------------------------	---	------------------------------	-----------------------	--------------------	--------------------

Τύποι πυρκαγιάς/φλόγας υδρογόνου

Το υδρογόνο παράγει μόνο υδρατμούς κατά την καύση του, αλλά όχι καπνό, με εξαίρεση την περίπτωση που στη φωτιά εμπλέκονται και άλλα εύφλεκτα υλικά. Η αδιαβατική θερμοκρασία φλόγας του υδρογόνου είναι 2403K. Ένας προφανής κίνδυνος που απορρέει από αυτή την ιδιότητα είναι τα σοβαρά εγκαύματα των ανθρώπων που εκτίθενται άμεσα στις φλόγες του υδρογόνου. Σε σύγκριση με την καύση υδρογονανθράκων, οι φλόγες υδρογόνου εκπέμπουν σημαντικά λιγότερη θερμότητα. Έτσι, η φυσική αίσθηση αυτής της θερμότητας από τον άνθρωπο δεν εμφανίζεται μέχρι την άμεση επαφή με τη φλόγα. Μια πυρκαγιά υδρογόνου μπορεί να παραμείνει απαρατήρητη και θα διαδοθεί παρά την άμεση παρακολούθηση από ανθρώπους στις περιοχές όπου το υδρογόνο μπορεί να διαρρέυσει, να χυθεί ή να συσσωρευτεί και να σχηματίσει δυνητικά εύφλεκτα μείγματα. Οι κίνδυνοι που σχετίζονται με τη θερμική ακτινοβολία είναι μικρότεροι σε σύγκριση με τα καύσιμα με βάση τους υδρογονάνθρακες. Ο κίνδυνος, ο οποίος μπορεί να οδηγήσει σε σοβαρά εγκαύματα, έγκειται στην κακή ορατότητα της φλόγας υδρογόνου στο φως της ημέρας, όταν οι φλόγες υδρογόνου είναι ανιχνεύσιμες μέσω μιας άμεσης επαφής.

Ανίχνευση φλόγας υδρογόνου

Ένα σύστημα ανίχνευσης πυρκαγιάς είναι συνήθως διαμορφωμένο έτσι ώστε να παρέχει οπτικό ή ηχητικό συναγερμό και να ενεργοποιεί ένα σύστημα καταστολής πυρκαγιάς. Υπάρχουν πολυάριθμες μέθοδοι για την ανίχνευση μιας πυρκαγιάς με βάση τα ακόλουθα:

Ανίχνευση θερμότητας	Λυχνίες με εύθραυστους λαμπτήρες
Ανιχνευτές θερμότητας με αντιστάθμιση ρυθμού	Θερμοδιακοπτόμενα βύσματα
Γραμμική ανίχνευση θερμότητας (καλώδια που διέρχονται από περιοχές με κίνδυνο πυρκαγιάς)	Ανίχνευση καπνού ιονισμού
Οπτική ανίχνευση καπνού (οπτική επαφή/αποκάλυψη)	Ανίχνευση καπνού υψηλής ταχύτητας και υψηλής ευαισθησίας
Οπτική ανίχνευση φλόγας (IR και UV και συνδυασμός IR-UV)	Ανίχνευση αερίων προϊόντων καύσης, π.χ. πτητικές οργανικές ενώσεις (VOC), μονοξείδιο του άνθρακα.

Λόγω της φύσης των φλογών υδρογόνου που εκπέμπουν σημαντικά λιγότερη θερμότητα σε σύγκριση με τις αντίστοιχες φλόγες υδρογόνου όταν καίγονται, η φυσική αντίληψη της θερμότητας αυτής από τον άνθρωπο δεν εμφανίζεται μέχρι την άμεση επαφή με τη φλόγα. Έτσι, οι πυρκαγιές υδρογόνου μπορεί να παραμείνουν απαρατήρητες και να διαδοθούν παρά την άμεση παρακολούθηση από τον άνθρωπο στις περιοχές όπου το υδρογόνο μπορεί να διαρρεύσει, να χυθεί ή να συσσωρευτεί, σχηματίζοντας δυνητικά εύφλεκτα μείγματα. Οι ανιχνευτές πυρκαγιάς υδρογόνου μπορούν να βοηθήσουν στη λήψη άμεσων μέτρων σε αυτές τις καταστάσεις. Οι ανιχνευτές πυρκαγιάς υδρογόνου μπορούν να είναι είτε σταθεροί για συνεχή παρακολούθηση απομακρυσμένων εργασιών είτε φορητοί για εργασίες πεδίου. Οι πιο συνηθισμένοι τύποι ανιχνευτών υδρογόνου συνοψίζονται στον παρακάτω πίνακα.

Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των τεχνολογιών ανίχνευσης φλόγας H₂

Τύπος	Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
UV/IR	<ul style="list-style-type: none"> Χαμηλό ποσοστό ψευδών συναγερμών Μέτρια ευαισθησία Μέτρια ταχύτητα Αυτόματος αυτοέλεγχος Δεν τυφλώνεται από εκφορτίσεις προστασίας CO₂ Low false alarm rate 	<ul style="list-style-type: none"> Υψηλό κόστος Πιθανοί λανθασμένοι συναγερμοί σε περίπτωση συνδυασμού πηγών IR και UV Τυφλώνεται από πυκνό καπνό και ατμούς
Τριπλή IR	<ul style="list-style-type: none"> Πολύ υψηλή ευαισθησία Πολύ υψηλή ταχύτητα 	<ul style="list-style-type: none"> Υψηλό κόστος
Απεικόνιση IR/vis	<ul style="list-style-type: none"> Απεικονίζει τη φλόγα 	<ul style="list-style-type: none"> Υψηλό κόστος

- | | | |
|--|---|--|
| | <ul style="list-style-type: none">• Χρησιμοποιείται από τη NASA | |
|--|---|--|

Ανιχνευτές υπεριώδους ακτινοβολίας (UV)

Τα συστήματα υπεριώδους ακτινοβολίας προτιμώνται έναντι των συστημάτων υπέρυθρης ακτινοβολίας επειδή είναι εξαιρετικά ευαίσθητα. Επιπλέον, η πιθανότητα εμφάνισης παρεμβαλλόμενου σήματος είναι μικρότερη εφόσον οι ανιχνευτές UV σκιάζονται από το φως του ήλιου. Τα μειονεκτήματά τους είναι το κόστος και η μειωμένη απόδοσή τους με φλόγες υγρού υδρογόνου, καθώς αυτό θολώνει και εμποδίζει τις υπεριώδεις ακτίνες. Οι ψευδείς συναγερμοί μπορούν να προκληθούν από τυχαίες πηγές υπεριώδους ακτινοβολίας, όπως ο κεραυνός ή η συγκόλληση τόξου. Η ικανότητα του ανιχνευτή να διακρίνει την υπεριώδη ακτινοβολία που προκαλείται από το ηλιακό φως, από τις φλόγες υδρογόνου, ώστε να αποφεύγονται οι ψευδείς συναγερμοί, είναι η κύρια πρόκληση.

Στη συνέχεια, μπορούν να εφαρμοστούν διάφορες τεχνικές:

- Για να διατηρηθούν τα μήκη κύματος που μπορούν να αποδοθούν μόνο σε ατύχημα πυρκαγιάς υδρογόνου. Ως μειονέκτημα, η λύση αυτή κόβει επίσης σχεδόν το 66% της ζώνης UV και επομένως μειώνει την ακρίβεια του ανιχνευτή.
- Η χρήση δύο ταυτόχρονων κυψελών που παρακολουθούν την ίδια ζώνη. Η μία από τις κυψέλες αναλύει κυρίως το ορατό φάσμα όπου το σήμα του ηλιακού φωτός είναι κυρίαρχο σε σύγκριση με το σήμα που εκπέμπεται από τη φλόγα υδρογόνου, ενώ η άλλη εστιάζει στη ζώνη UV. Το υπεριώδες σήμα από την υπεριώδη κυψέλη λαμβάνεται υπόψη μόνο εάν αποκλίνει από το σήμα της ταυτόχρονης κυψέλης.
- Η τρεμάμενη συμπεριφορά μιας φλόγας μπορεί επίσης να ληφθεί υπόψη. Στην περίπτωση αυτή, θα εξεταστεί το διαμορφωμένο μέρος του σήματος UV. Αυτή η τεχνική μπορεί να μην είναι συμβατή με την απαιτούμενη γρήγορη απόκριση.
- Τέλος, εάν είναι γνωστό ότι τα παρασιτικά σήματα είναι μικρά, μπορεί να θεωρηθεί θετικό σήμα κάθε φορά που επιτυγχάνεται ένα συγκεκριμένο κατώφλι.

Ανιχνευτές IR

Η ομίχλη μπορεί να εμποδίσει τη μετάδοση της υπεριώδους ακτινοβολίας στο κύτταρο του αισθητήρα. Ωστόσο, οι ανιχνευτές IR δεν είναι ευαίσθητοι σε αυτά τα ζητήματα. Εξάλλου, οι φλόγες υδρογόνου εκπέμπουν σημαντική ποσότητα IR για να χρησιμοποιηθούν για την ανίχνευση φλόγας υδρογόνου. Η κύρια πρόκληση παραμένει η ίδια όπως και πριν, δηλαδή η διάκριση των IR που σχετίζονται με τη φωτιά υδρογόνου από εκείνες του ήλιου, οποιωνδήποτε φωτεινών πηγών ή θερμών υλικών. Οι πηγές IR που τροφοδοτούνται με εναλλακτικά ηλεκτρικά ρεύματα μπορούν να φιλτραριστούν λόγω του δικού τους διαμορφωμένου σήματος 100Hz. Ωστόσο, ούτε τα θερμά σώματα ούτε το ηλιακό φως εμφανίζουν διαμορφωμένο σήμα που μπορεί να ληφθεί και να φιλτραριστεί. Η λύση έγκειται στην εστίαση στο μήκος κύματος 1,7 μm που αντιστοιχεί σε μια μέγιστη εκπομπή ατμού.

Θερμικοί ανιχνευτές & συστήματα απεικόνισης

Θερμικοί ανιχνευτές

Θερμικοί ανιχνευτές- για παράδειγμα, οι αισθητήρες θερμοκρασίας ανιχνεύουν τη θερμότητα της φλόγας. Οι θερμικοί ανιχνευτές λειτουργούν ως συσκευές ρυθμού αύξησης της θερμοκρασίας ή υπερθέρμανσης για τη λήψη θερμότητας ακτινοβολίας, συναγωγής ή αγωγιμότητας. Αυτοί οι αξιόπιστοι και δοκιμασμένοι ανιχνευτές διαφόρων τύπων είναι κατάλληλοι για μέσα ανίχνευσης πυρκαγιάς υδρογόνου, αρκεί να βρίσκονται κοντά στο σημείο όπου εκδηλώνεται η πυρκαγιά. Οι εν λόγω ανιχνευτές πρέπει να βρίσκονται πολύ κοντά ή στο σημείο της πυρκαγιάς.

Συστήματα απεικόνισης

Τα συστήματα απεικόνισης διατίθενται κυρίως στην περιοχή θερμικής υπέρυθρης ακτινοβολίας και δεν παρέχουν συνεχή παρακολούθηση με δυνατότητα συναγερμού. Απαιτείται εκπαιδευμένος/η χειριστής/ρια για να ερμηνεύσει εάν η εικόνα που βλέπει είναι φλόγα. Τα συστήματα απεικόνισης υπεριώδους ακτινοβολίας απαιτούν ειδικά οπτικά συστήματα και είναι πολύ ακριβά. Άλλοι συνήθεις τύποι ανιχνευτών πυρκαγιάς, όπως εκείνοι με ιονίζουσες κυψέλες, δεν είναι κατάλληλοι για την ανίχνευση πυρκαγιών υδρογόνου.

Βιβλιογραφικές αναφορές

Hübert, T., Boon-Brett, L., Black, G., Banach, U., 2011. Hydrogen sensors - A review. *Sensors Actuators, B Chem.* 157, 329–352.

ISO - ISO/TR 15916:2015 - Basic considerations for the safety of hydrogen systems [WWW Document], n.d. URL <https://www.iso.org/standard/56546.html> (accessed 8.30.22).

Manjavacas, G., Nieto, B., 2016. Hydrogen sensors and detectors, *Compendium of Hydrogen Energy*. Elsevier Ltd.