



Κόντης Ελευθέριος

Δρ. Ηλεκτρολόγος Μηχανικός & Μηχανικός Υπολογιστών

kontislefteris@gmail.com

Δικτυακοί τόποι μαθήματος:

ΠΕ: <https://eclass.uowm.gr/courses/HMMY112/>

ΤΕ: <https://eclass.teiwm.gr/courses/EE193/>



Αποθήκευση με Χημικά Μέσα



- ✓ Η αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας με χημικά μέσα περιλαμβάνει κυρίως την αποθήκευση μέσω υδρογόνου (H_2) και μέσω συνθετικού φυσικού αερίου (synthetic natural gas - SNG)
- ✓ Και οι δύο τρόποι περιλαμβάνουν τη χρήση ηλεκτρικής ενέργειας για παραγωγή υδρογόνου μέσω ηλεκτρόλυσης νερού και διαφορετικής επόμενης χρήσης του κάθε φορά
- ✓ Παρόλο που η απόδοση αυτής της μετατροπής είναι πολύ χαμηλή, τα συγκεκριμένα μέσα αποθήκευσης επιτρέπουν την αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας σε πολύ μεγάλη κλίμακα σε σχέση με τις υπόλοιπες μεθόδους

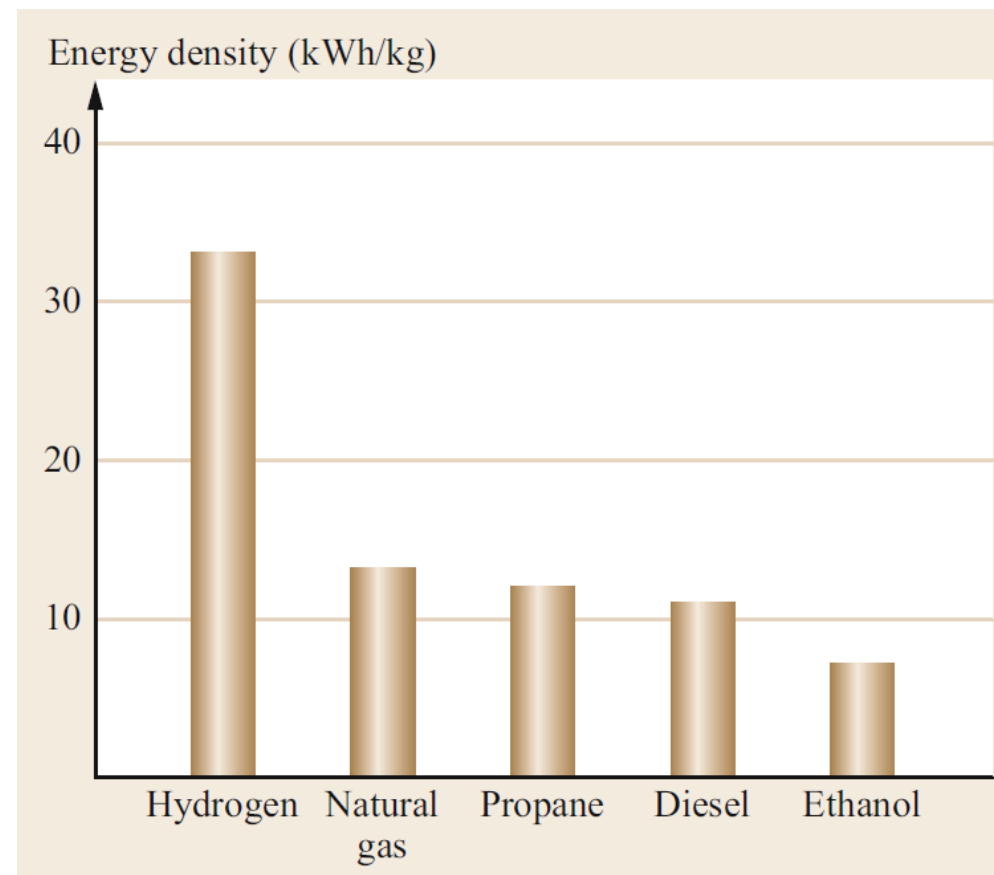




Αποθήκευση με Χημικά Μέσα



- ✓ Ταυτόχρονα αξίζει να σημειωθεί ότι η πυκνότητα αποθηκευμένης ενέργειάς του υδρογόνου είναι αρκετά υψηλότερη σε σχέση με τις υπόλοιπες τεχνολογίες αποθήκευσης ενέργειας που εξετάστηκαν στα πλαίσια του μαθήματος
- ✓ Επιπλέον, πρέπει να αναφερθεί ότι το υδρογόνο περιέχει ως καύσιμο σημαντικά περισσότερη ενέργεια σε σχέση με τα γνωστά συμβατικά μας καύσιμα
- ✓ Για παράδειγμα, έχει περίπου τρεις φορές περισσότερη ενέργεια από το diesel και 2,5 φορές περισσότερη ενέργεια από το φυσικό αέριο



Πηγή: Κ. Ο. Papailiou, "Springer Handbook of Power Systems," Springer, 2021.



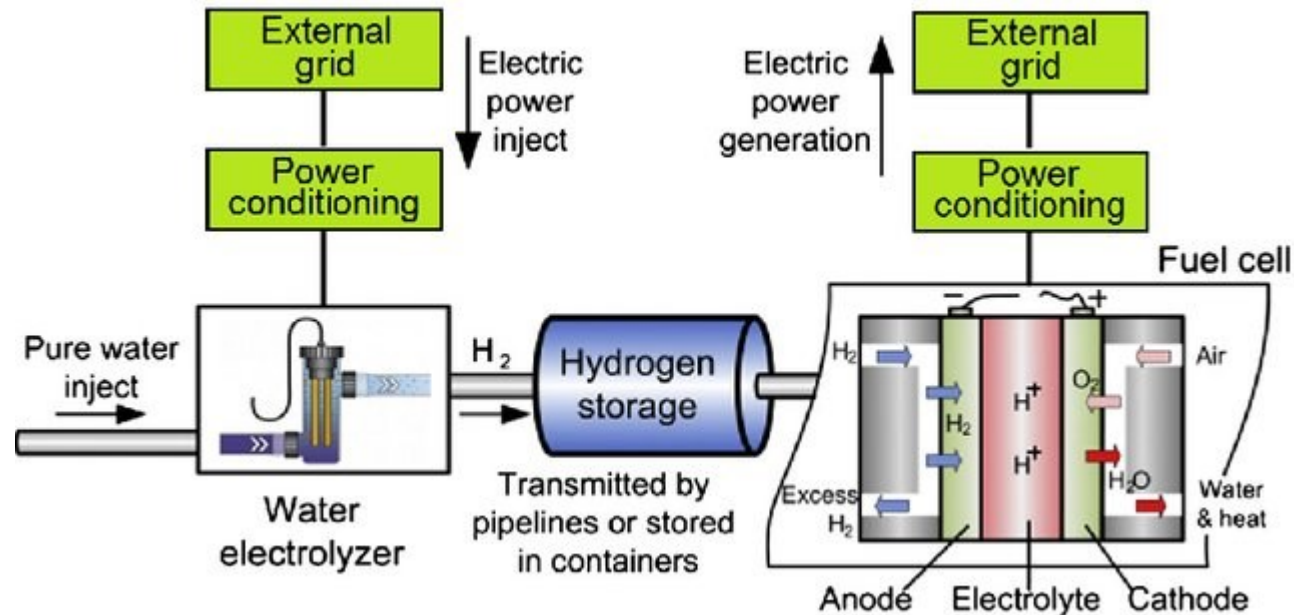
- ✓ Υπάρχουν δύο βασικές προκλήσεις για την επιτυχή πραγματοποίηση του οράματος, που θέλει το υδρογόνο ως μείζον καύσιμο:
 - Δεν υπάρχει σχεδόν καθόλου αέριο H_2 στην ατμόσφαιρα της Γης. Μπορούμε να παράγουμε H_2 με θέρμανση νερού ή διέλευση ηλεκτρικής ενέργειας μέσω αυτού, με διαχωρισμό του από το μεθάνιο (CH_4) που βρίσκεται στο φυσικό αέριο και από μόρια βενζίνης, αλλά και μέσω μιας χημικής αντίδρασης που περιλαμβάνει άνθρακα, οξυγόνο και ατμό. Ως αποτέλεσμα, το H_2 έχει **αρνητική καθαρή ενεργειακή απόδοση**, επειδή χρειάζεται περισσότερη ενέργεια υψηλής ποιότητας για να παραχθεί χρησιμοποιώντας αυτές τις μεθόδους, απ' ότι λαμβάνεται με την καύση του
 - Οι κυψέλες καυσίμου είναι ο καλύτερος τρόπος, ώστε να χρησιμοποιηθεί H_2 για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, αλλά οι τρέχουσες εκδοχές των κυττάρων καυσίμου είναι δαπανηρές. Ωστόσο, η πρόοδος στην ανάπτυξη της νανοτεχνολογίας θα μπορούσε να οδηγήσει σε λιγότερο δαπανηρές κυψέλες καυσίμου
- ✓ Επίσης, το κατά πόσο ένα ενεργειακό σύστημα με βάση το υδρογόνο παράγει λιγότερη ατμοσφαιρική ρύπανση και CO_2 (σε σχέση με ένα συμβατικό σύστημα που χρησιμοποιεί ορυκτά καύσιμα) εξαρτάται από το πώς παράγεται το καύσιμο H_2



Αποθήκευση με Χημικά Μέσα



- ✓ Μια τυπική μονάδα αποθήκευσης υδρογόνου αποτελείται από έναν ηλεκτρολύτη, μια δεξαμενή αποθήκευσης υδρογόνου και κάποιο μέσο καύσης (κυψέλη καυσίμου)
- ✓ Κατά τη λειτουργία της αποθήκευσης διαχωρίζεται με τη βοήθεια της ηλεκτρόλυσης το νερό σε υδρογόνο και οξυγόνο. Το υδρογόνο αποθηκεύεται ακολούθως σε δεξαμενή αποθήκευσης για πρακτικά απεριόριστο χρόνο, ενώ το οξυγόνο απελευθερώνεται στην ατμόσφαιρα

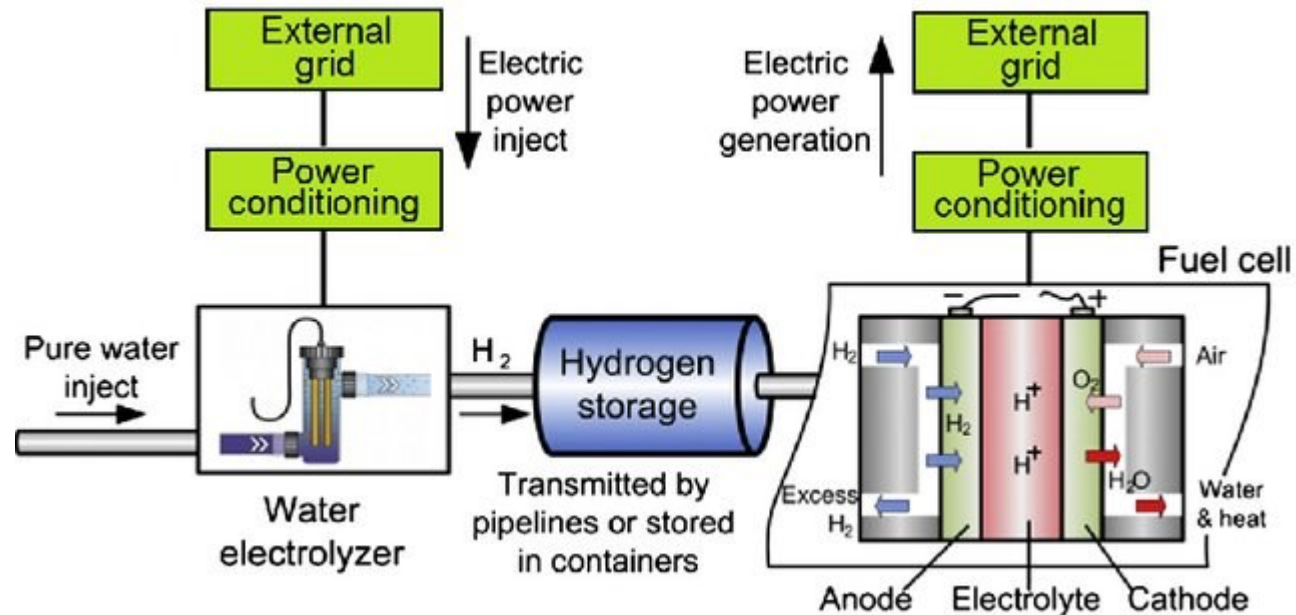




Αποθήκευση με Χημικά Μέσα



- ✓ Για την αντίθετη διαδικασία (την παραγωγή ενέργειας), συμβαίνει η αντίστροφη διαδικασία της ηλεκτρόλυσης
- ✓ Συγκεκριμένα, το υδρογόνο αντιδρά με το οξυγόνο μέσα σε μια κυψέλη καυσίμου και παράγουν ηλεκτρισμό και θερμότητα
- ✓ Αντί για κυψέλη καυσίμου, μπορούν να χρησιμοποιηθούν και θερμικές μηχανές. Σε αυτές τις περιπτώσεις, η θερμότητα που παράγεται χρησιμοποιείται για την κίνηση ενός στροβίλου και την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας





Αποθήκευση με Χημικά Μέσα



- ✓ Το υδρογόνο μπορεί να αποθηκευτεί σε υγρή μορφή (άρα σε πολύ χαμηλή θερμοκρασία), αέρια μορφή (που σημαίνει πολύ υψηλή πίεση) ή στερεά μορφή – μεταλλικά υδρίδια (κανονικές συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας, αλλά πολύ υψηλό κόστος). Για τη στερεά αποθήκευση χρησιμοποιούνται μέταλλα όπως το Μαγγάνιο και το Αλουμίνιο
- ✓ Σε εφαρμογές μικρής κλίμακας, όπου απαιτείται υψηλή πυκνότητα, το H_2 αποθηκεύεται σε υγρή μορφή, ενώ σε μεγάλης κλίμακας εφαρμογές αποθηκεύεται σε αέρια μορφή (η πιο οικονομική). Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιούνται μεγάλοι υπόγειοι φυσικοί χώροι (σπήλαια, εξαντλημένα κοιτάσματα πετρελαίου/φυσικού αερίου) και σπανιότερα τεχνητές δεξαμενές. Επομένως, για μεγάλες εφαρμογές υπάρχει ο περιορισμός της τοποθεσίας εγκατάστασης

Τεχνική	Προδιαγραφές	Ποσότητα H_2 (kg/m ³)
Πεπιεσμένο H_2	700 bar	42
Υγροποιημένο H_2	-253 °C	70
Μεταλλικά Υδρίδια MgH_2	Ατμοσφαιρική πίεση, θερμοκρασία περιβάλλοντος	106



Αποθήκευση με Χημικά Μέσα



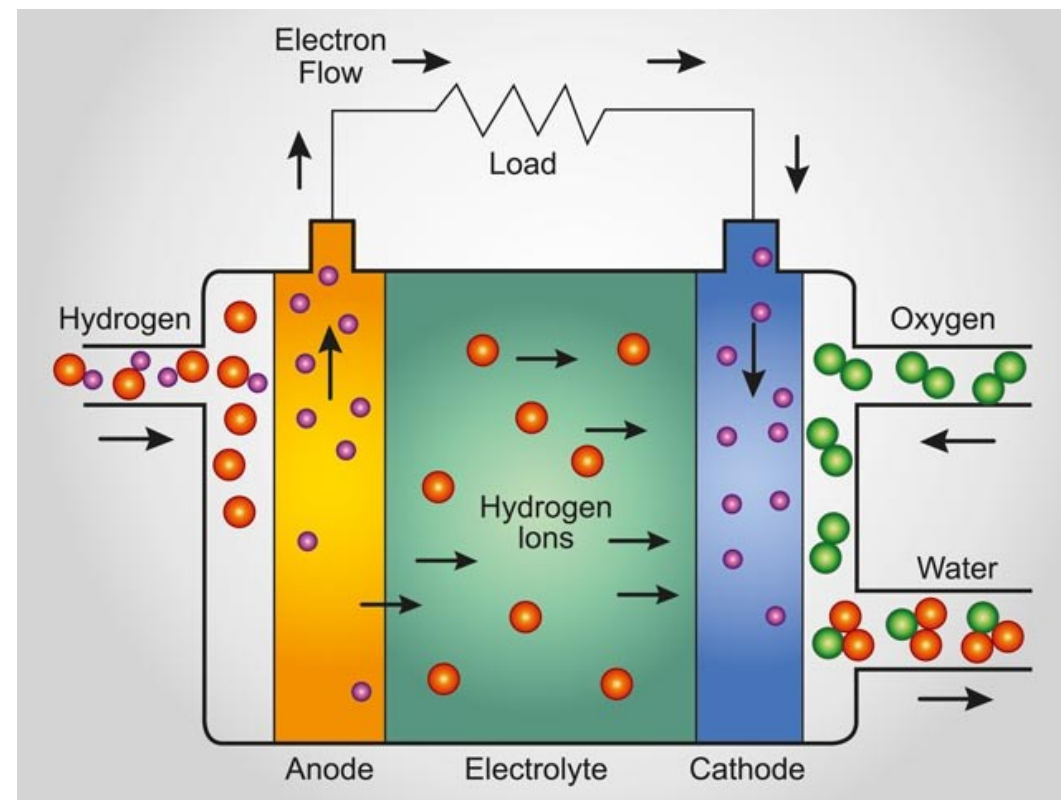
- ✓ Η αποθήκευση μπορεί να γίνει σε συνθετικές φιάλες υπό υψηλή πίεση (350- 700 bar) με πυκνότητα που φτάνει τα 30 g/lt. Οι φιάλες παρουσιάζουν πολύ καλή ασφάλεια και μηδενική διαρροή H_2 αλλά εμφανίζουν υψηλό κόστος. Η αποθήκευση σε υψηλή πίεση είναι καλή λύση σε εφαρμογές μεταφορών (οχήματα) λόγω του μικρού βάρους, της ταχύτητας ανεφοδιασμού και της ταχύτητας στην αποδέσμευση του H_2 προς χρήση
- ✓ Υγροποιημένο H_2 (LH_2) μπορεί να αποθηκευτεί σε κρυογενικές δεξαμενές σε θερμοκρασία 20,3 K και πυκνότητα 70,8 g/lt. Η αποθήκευση σε κρυογενικές δεξαμενές έχει ενεργειακό κόστος ~30-40% του ενεργειακού περιεχομένου του H_2 λόγω της συνεχούς εξάτμισης και επαναυγροποίησης του H_2 που απαιτείται για διατήρηση της χαμηλής θερμοκρασίας
- ✓ H_2 μπορεί να αποθηκευτεί και μέσω προσρόφησης σε στερεά υλικά, με τα πιο διαδεδομένα να είναι τα μεταλλικά υδρίδια αλλά και νανοϋλικά ανθρακικής βάσης. Η διεργασία αυτή παρέχει μεγάλη ασφάλεια. Από την άλλη μεριά, τα στερεά υλικά έχουν μεγάλο βάρος και χαμηλούς ρυθμούς φόρτισης / αποφόρτισης
- ✓ Η μεταφορά του H_2 σε αποστάσεις έως ορισμένα εκατοντάδες χιλιόμετρα μπορεί να γίνει μέσω υπόγειων χαλύβδινων αγωγών. Το κόστος μεταφοράς είναι από 1,5 έως 1,8 φορές μεγαλύτερο από το κόστος μεταφοράς φυσικού αερίου. Επίσης, η μεταφορά του μπορεί να γίνεται σε υγροποιημένη μορφή με πλοία ή τρέινα



Κυψέλες Καυσίμου



- ✓ Οι κυψέλες καυσίμου αποτελούν μία από τις βασικές τεχνολογίες για την ενεργειακή χρήση υδρογόνου
- ✓ Οι κυψέλες καυσίμου μπορούν να θεωρηθούν ως έμμεσος τύπος ηλεκτροχημικής αποθήκευσης
- ✓ Θεμελιώδης διαφορά τους είναι ότι μπορούν να λειτουργούν συνεχώς, αρκεί να τροφοδοτούνται με τις κατάλληλες αντιδρούσες ύλες, ενώ οι κοινές μπαταρίες καταναλώνουν τα δομικά τους υλικά (ηλεκτρόδια) για την πραγματοποίηση των αντιδράσεων και επομένως έχουν περιορισμένο χρόνο ζωής
- ✓ **Αντιδρώντες ύλες:** Υδρογόνο και οξυγόνο
- ✓ **Προϊόντα:** Συνεχές ηλεκτρικό ρεύμα, θερμότητα και νερό





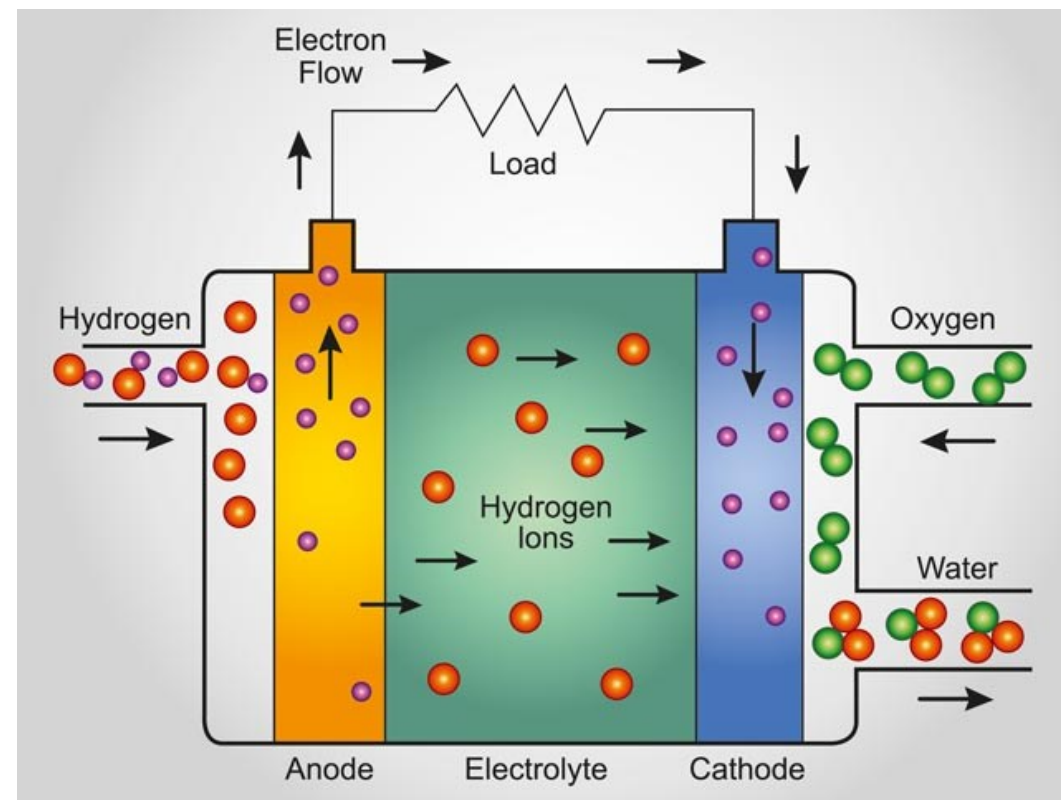
Κυψέλες Καυσίμου



- ✓ Το επιθυμητό καύσιμο είναι καθαρό υδρογόνο, που μπορεί όμως να παραχθεί και από κάποιο άλλο καύσιμο (φορέα υδρογόνου) μετά από κατάλληλη επεξεργασία. Τέτοιοι φορείς είναι:

- η αμμωνία
- το φυσικό αέριο
- παράγωγα του πετρελαίου
- το υγρό προπάνιο
- και η βιομάζα

- ✓ Καθαρό υδρογόνο μπορεί, επίσης, να παραχθεί με την ηλεκτρόλυση νερού, η οποία, όταν επιτυγχάνεται με ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, όπως ηλιακή, αιολική και γεωθερμία, οδηγεί σε 100% λειτουργία της κυψέλης καυσίμου με ΑΠΕ

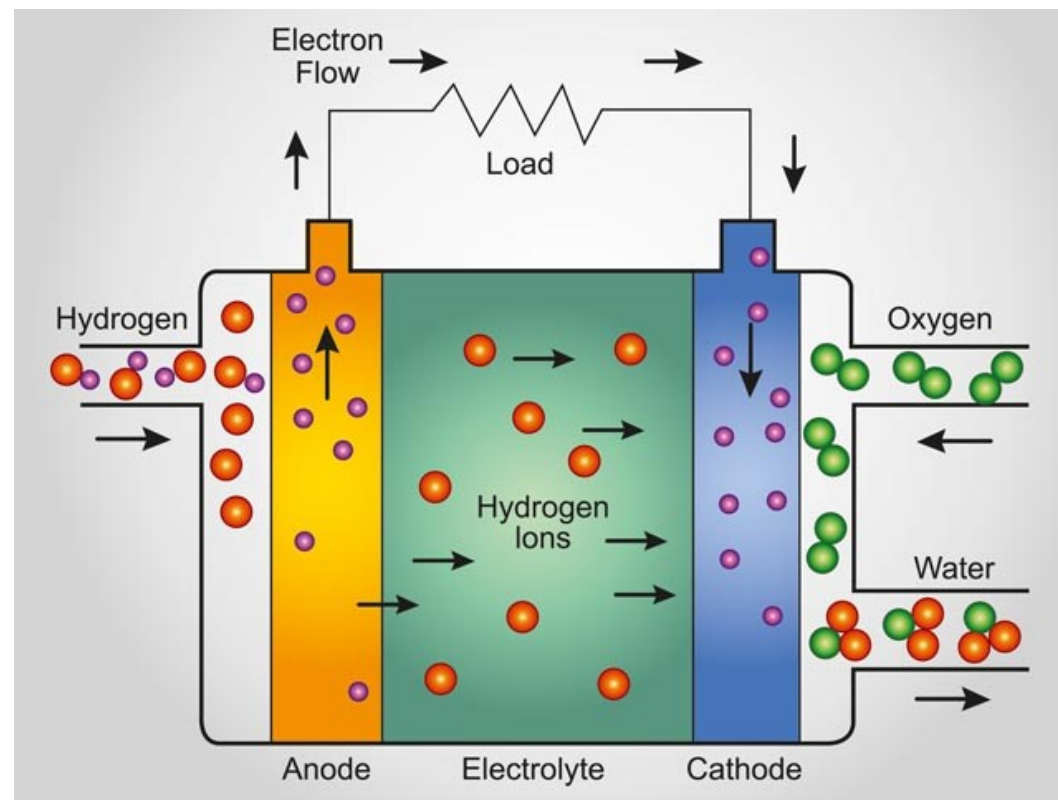




Κυψέλες Καυσίμου



- ✓ Σε μία κυψέλη καυσίμου παράγονται νερό, θερμότητα και ηλεκτρική ενέργεια από τη βασική ηλεκτροχημική αντίδραση
- ✓ Η χημική αλληλουχία είναι τέτοια, ώστε τα αντιδρώντα στοιχεία εισέρχονται στην κυψέλη
- ✓ Ταυτόχρονα τα προϊόντα της αντίδρασης εξέρχονται από αυτή, με τον ηλεκτρολύτη να παραμένει εντός της κυψέλης

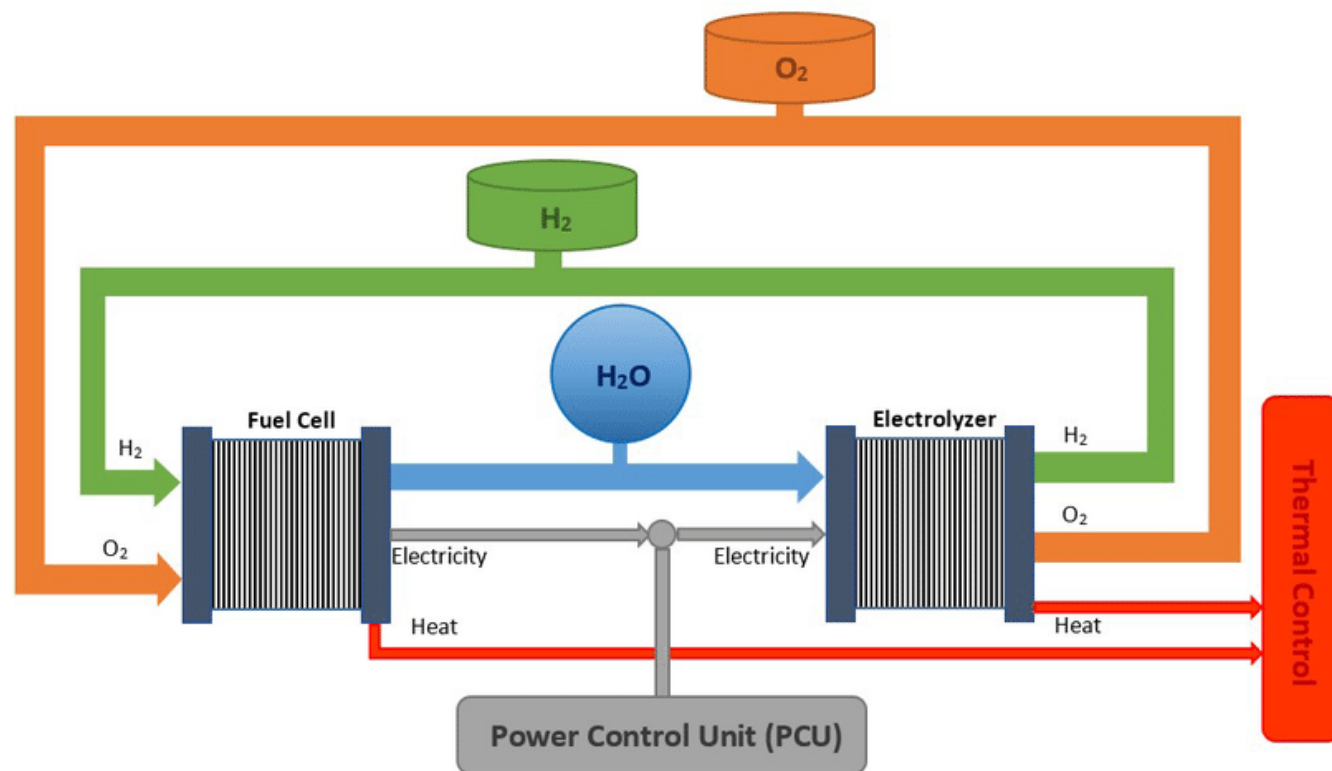




Κυψέλες Καυσίμου



- ✓ Στην περίπτωση που το υδρογόνο αποθηκεύεται με σκοπό να εξασφαλιστεί συνεχής παροχή ισχύος από την κυψέλη καυσίμου, τότε η όλη διάταξη ονομάζεται ως αναγεννούμενη κυψέλη καυσίμου (regenerative fuel cell – RFC)
- ✓ Η κυψέλη καυσίμου τροφοδοτείται με υδρογόνο που παράγεται είτε από μία συσκευής ηλεκτρόλυσης, είτε από μία διαδικασία διάσπασης υδρογονανθράκων. Το υδρογόνο αποθηκεύεται για να αντιδράσει τελικά με το οξυγόνο, παρέχοντας ηλεκτρική ισχύ, όταν τούτο απαιτηθεί από το δίκτυο

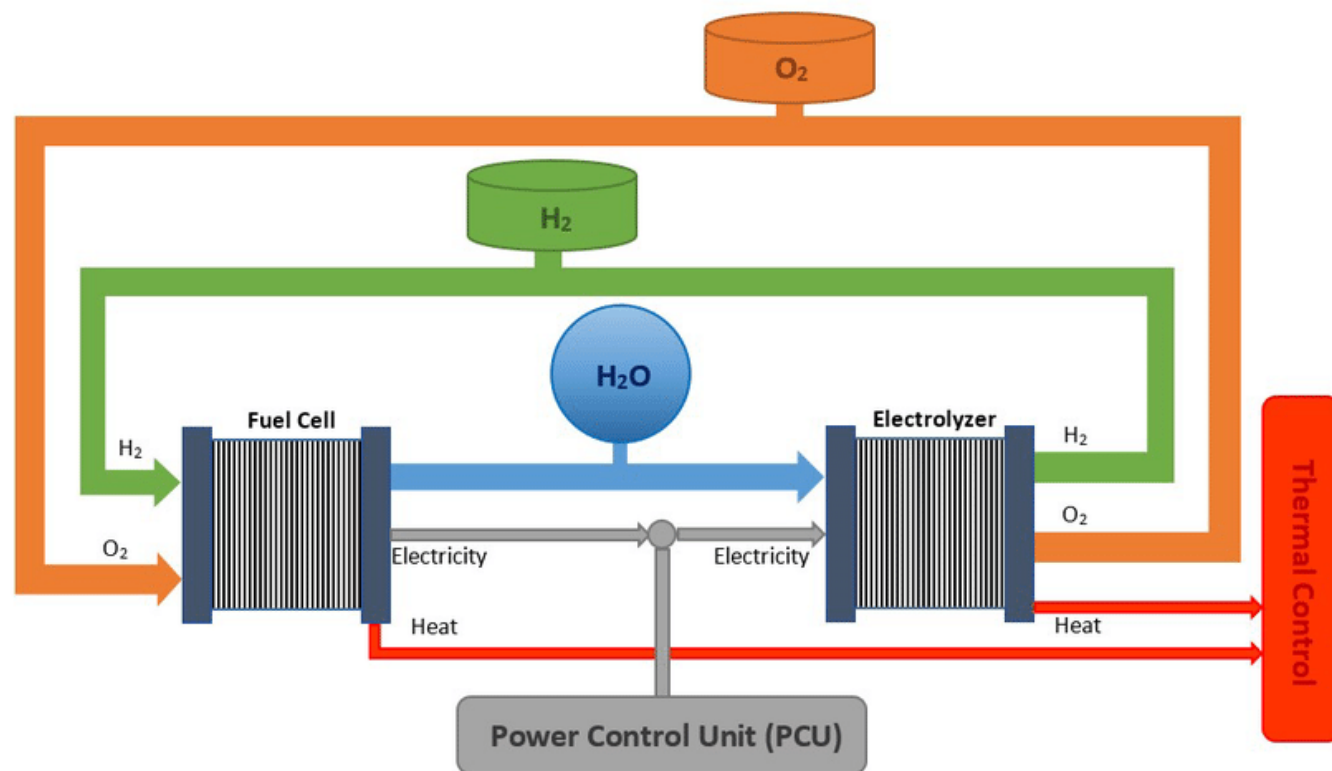




Κυψέλες Καυσίμου



- ✓ Η κυψέλη καυσίμου συμπεριφέρεται με τρόπο παρόμοιο με μία αποθήκη καυσίμου, καθώς το αποθηκευμένο H_2 μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.
- ✓ Η λειτουργία της κυψέλης καυσίμου ελέγχεται από συστήματα αυτομάτου ελέγχου και καθορίζεται, αφενός, από τη διαθεσιμότητα της απαιτούμενης πηγής ισχύος για την παραγωγή του H_2 (συνήθως περίσσεια ΑΠΕ) και, αφετέρου, από την ανάγκη συμβολής της κυψέλης καυσίμου στην παραγωγή ισχύος





- ✓ Η χρήση των κυψελών καυσίμου ως καθαρές πηγές ενέργειας έχει αναγνωριστεί τις τελευταίες δύο δεκαετίες
- ✓ Τα τελευταία χρόνια έχουν αναπτυχθεί μία σειρά διαφορετικών τύπων κυψελών καυσίμου, με σκοπό την αντικατάσταση των μηχανών εσωτερικής καύσης, την παροχή ισχύος σε ΣΗΕ και την τροφοδοσία ισχύος σε φορητές καταναλώσεις και ως βοηθητική πηγή ισχύος σε αυτοκινούμενα οχήματα (π.χ. Υβριδικά αυτοκίνητα)
- ✓ Η συνολική απόδοση μιας κυψέλης καυσίμου είναι της τάξης του 40 – 65%, με τάση αύξησης υπό την προϋπόθεση ότι προκύπτει ταυτόχρονη αξιοποίηση της απορριπτόμενης θερμότητας σε παράλληλες χρήσεις
- ✓ Ένα βασικό μειονέκτημα, που προς το παρόν αποτελεί ανασταλτικό παράγοντα στην ευρεία χρήση των κυψελών καυσίμου, είναι το υψηλό κόστος προμήθειας και εγκατάστασης, το οποίο είναι της τάξης των 5.000– 8.000€/kW. Το κόστος αυτό διαμορφώνεται κυρίως από το κόστος των απαιτούμενων υλικών για την κατασκευή και τη λειτουργία της κυψέλης καυσίμου



- ✓ Η αύξηση της κατανάλωσης ορυκτών καυσίμων οδηγεί σε εξάντληση των αποθεμάτων και συνεπαγόμενη αύξηση του κόστους εξόρυξης και διάθεσης, επιτάχυνση της κλιματικής αλλαγής και επιβάρυνση της ατμόσφαιρας με ρύπους
- ✓ Πλεονεκτήματα του H_2 είναι η μεγάλη ενεργειακή πυκνότητα του, οι υψηλοί βαθμοί απόδοσης των συσκευών κατά τη μετατροπή του, και η μηδενική παραγωγή αερίων θερμοκηπίου και άλλων ρύπων κατά τη χρήση του σε ηλεκτροχημικές διεργασίες
- ✓ Σήμερα χρηματοδοτούνται παγκόσμια σημαντικές δράσεις για την προώθηση της χρήσης του H_2 , που αφορούν:
 - βασική έρευνα για τις διεργασίες και τη μετατροπή του H_2 σε συσκευές
 - έρευνα για την αποθήκευση και τη διανομή του
 - έργα επίδειξης, έργα τυποποίησης
 - ανάπτυξης τεχνικών κανονισμών



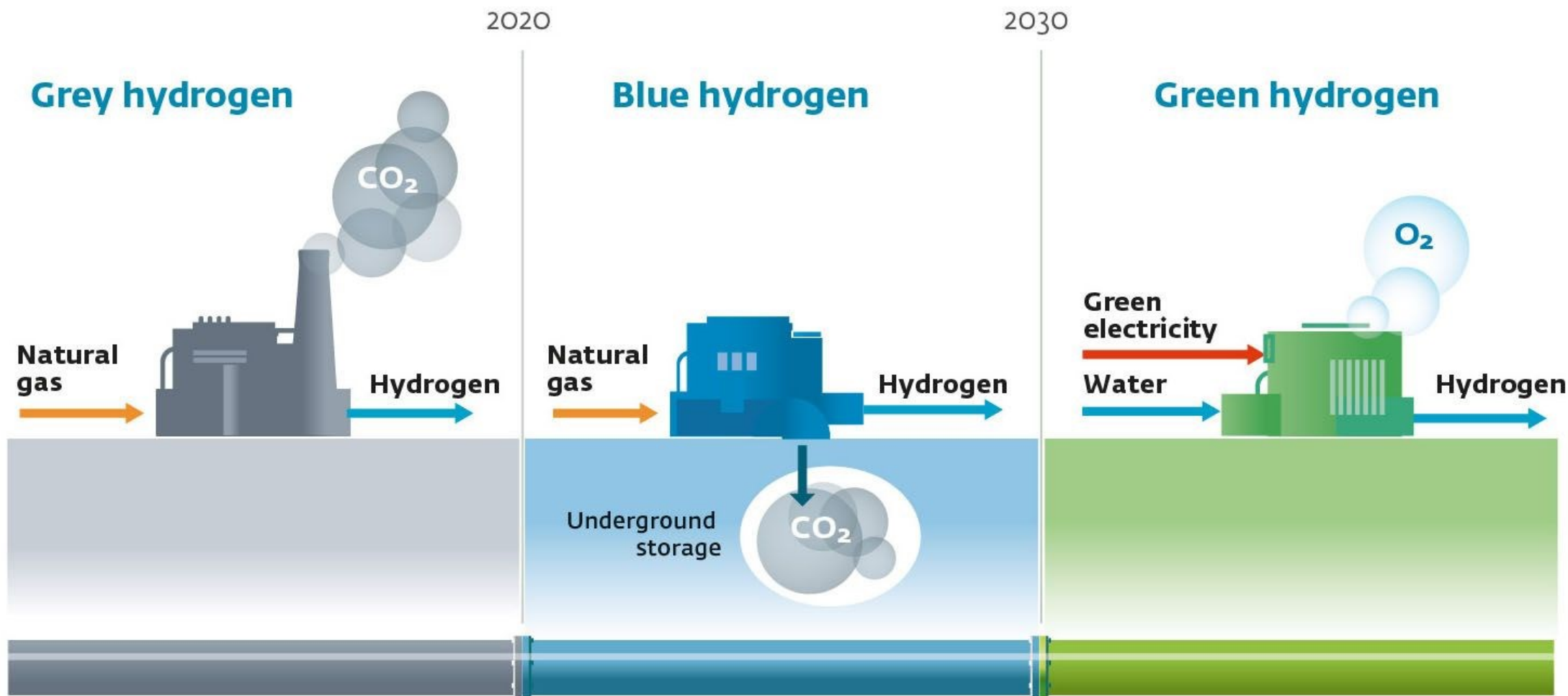
- ✓ Η συνηθέστερη μέθοδος παραγωγής H_2 σήμερα είναι από φυσικό αέριο με αναμόρφωση με ατμό. Οι σχετικοί βαθμοί απόδοσης κυμαίνονται από 65% (μικρή κλίμακα) έως 85% (μεγάλη κλίμακα)
- ✓ Η παραγωγή του H_2 μπορεί να γίνει από στερεό άνθρακα (λιγνίτη, λιθάνθρακα, κλπ.) μέσω της αεριοποίησης του άνθρακα με υδρατμούς σε υψηλή θερμοκρασία. Η εφαρμογή έχει ενδιαφέρον όπου χρησιμοποιείται ευρέως ορυκτός άνθρακας (π.χ. Κίνα) γιατί μπορεί να συνδυαστεί με δέσμευση του άνθρακα για μείωση της παραγωγής αερίων του θερμοκηπίου
- ✓ H_2 μπορεί να παραχθεί επίσης και από βιομάζα, μέσω αναερόβιας ζύμωσης ή αεριοποίησης. Και οι δύο μέθοδοι χρησιμοποιούνται σήμερα σε κάποιο βαθμό. Η χρήση τους αναμένεται να επεκταθεί περισσότερο στο μέλλον
- ✓ Το H_2 μπορεί να παραχθεί από ΑΠΕ σε αποκεντρωμένους (κατανεμημένους) σταθμούς ώστε να ενισχύσει τη συμμετοχή των ΑΠΕ στην πρωτογενή παραγωγή ενέργειας. Η αποκεντρωμένη παραγωγή προσφέρει τα πλεονεκτήματα της ενίσχυσης της τοπικής οικονομίας και μείωσης των αναγκών για δίκτυα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας



- ✓ Η παραγωγή H_2 από ηλεκτρόλυση νερού με χρήση ΑΠΕ αποτελεί μια καθαρή λύση (χωρίς παραγωγή ανθρακικών παραπροϊόντων) με αυξημένο όμως ακόμα κόστος. Το κόστος αναμένεται να μειωθεί στα επόμενα χρόνια. Η παραγωγή H_2 με αυτόν τον τρόπο έχει το πλεονέκτημα ότι μέσω της αποθήκευσης H_2 είναι δυνατόν να μειωθεί η διακύμανση του φορτίου στο δίκτυο από τις ΑΠΕ, οι οποίες μπορούν να συμμετάσχουν περαιτέρω στο ενεργειακό ισοζύγιο
- ✓ Το ανθρακικό αποτύπωμα παραγωγής H_2 εξαρτάται ισχυρά από τη διεργασία που υλοποιείται και κυμαίνεται από μηδενικό (ηλεκτρόλυση με χρήση ενέργειας από ΑΠΕ) έως σημαντικό (αεριοποίηση ορυκτών καυσίμων χωρίς δέσμευση του άνθρακα). Διεργασίες δέσμευσης και αποθήκευσης του άνθρακα έχουν αρχίσει να αναπτύσσονται αλλά αυξάνουν σημαντικά το κόστος της επένδυσης και μειώνουν τους βαθμούς απόδοσης της παραγωγής ενέργειας



Αποθήκευση με Χημικά Μέσα





- ✓ Παραγωγή του H_2 σε **κεντρικούς** σταθμούς μέσω των τεχνικών που παρουσιάστηκαν απαιτεί σημαντική μείωση του κόστους από 3 έως 10 φορές σε σχέση με τα σημερινά επίπεδα. Αυτό είναι τεχνικά δυνατό ως ένα βαθμό
 - Σε κάθε περίπτωση αύξηση του κόστους παραγωγής θα πρέπει να αναμένεται από όλες τις πηγές ενέργειας στο άμεσο μέλλον λόγω της ανάγκης μείωσης των αερίων του θερμοκηπίου. Αυτό θα κάνει την παραγωγή H_2 περισσότερο ανταγωνιστική
- ✓ Παραγωγή του H_2 σε **αποκεντρωμένους** σταθμούς παρέχει τη δυνατότητα εξομάλυνσης της παραγόμενης ισχύος από ΑΠΕ μέσω ενδιάμεσης αποθήκευσης H_2
 - Τέτοια συστήματα θα γίνουν οικονομικά ανταγωνιστικά των συμβατικών ΑΠΕ όταν το κόστος περαιτέρω ανάπτυξης του δικτύου θα γίνει απαγορευτικό
 - και όταν τα οικονομικά οφέλη από παραγωγή “πράσινης” ηλεκτρικής ενέργειας μειωθούν λόγω κορεσμού του δικτύου σε έργα ΑΠΕ



- ✓ Όσον αφορά στο συνθετικό φυσικό αέριο (SNG), η διαδικασία αποθήκευσης με αυτό απαιτεί ένα δεύτερο βήμα μετά την ηλεκτρόλυση του νερού. Έτσι, μετά την παραγωγή υδρογόνου από την ηλεκτρόλυση, το υδρογόνο αντιδρά με διοξείδιο του άνθρακα και παράγουν μεθάνιο ή SNG. Αυτό μπορεί να αποθηκευτεί με αντίστοιχους τρόπους όπως αποθηκεύεται το υδρογόνο
- ✓ Η παραγωγή και αποθήκευση SNG είναι ιδανική και πιο αποδοτική σε μέρη όπου υπάρχει παραγωγή διοξειδίου του άνθρακα από βιομηχανικές ή άλλες διεργασίες, όπως είναι οι χώροι επεξεργασίας αποβλήτων και βιολογικών καθαρισμών
- ✓ Το πλεονέκτημα του SNG είναι ότι έχει μεγαλύτερη πυκνότητα ενέργειας από το υδρογόνο. Το γεγονός όμως, ότι υφίσταται επιπλέον διεργασία για την παραγωγή και αποθήκευσή του, καθιστά τη χρησιμοποίησή του λιγότερο αποδοτική, καθώς υπάρχουν αυξημένες απώλειες ενέργειας από το στάδιο της δημιουργίας του μέχρι την παραγωγή εκ νέου ηλεκτρικής ενέργειας



✓ Το H_2 χρησιμοποιείται:

- Μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως καύσιμο σε λέβητες και εμβολοφόρες μηχανές εσωτερικής καύσης
- Να χρησιμοποιηθεί αναμεμειγμένο με φυσικό αέριο σε αεριοστρόβιλο μεγάλης κλίμακας (έχει χαμηλότερες εκπομπές CO_2 σε σύγκριση με τρέχον συμβατικό φυσικό αέριο)
- Να εγχυθεί σε αγωγό φυσικού αερίου για οικιακή χρήση θερμότητας ή για μικρο-συστήματα συμπαραγωγής ηλεκτρισμού και θερμότητας
- Στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας μέσω της χρήσης κυψελών καυσίμου
- Επιπλέον, υδρογόνο ή φυσικό αέριο εμπλουτισμένο με υδρογόνο μπορούν να χρησιμοποιηθούν για εφαρμογές μεταφοράς χαμηλών εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα (π.χ. είτε οχήματα φυσικού αερίου που λειτουργούν με φυσικό αέριο εμπλουτισμένο με υδρογόνο ή οχήματα με κυψέλες καυσίμου υδρογόνου). Η χρήση του υδρογόνου μπορεί να είναι εποχική ή να προορίζεται καθημερινή χρήση



✓ Το H_2 χρησιμοποιείται:

- Για την παραγωγή αμμωνίας (NH_3), η οποία με τη σειρά της χρησιμοποιείται ως επί το πλείστον για την παραγωγή λιπασμάτων
- Σε διυλιστήρια, όπου το υδρογόνο χρησιμοποιείται σε πλήθος διαδικασιών, όπως την αποθείωση του αργού πετρελαίου, τον καθαρισμό και βελτίωση της ποιότητας του πετρελαίου και των παραγώγων καυσίμων ή λιπαντικών
- Στη βιομηχανία των πλαστικών (για παραγωγή και ανακύκλωση πλαστικών)
- Στον τομέα της μεταλλουργίας και των ηλεκτρονικών (κυρίως στην παραγωγή πυριτίου)



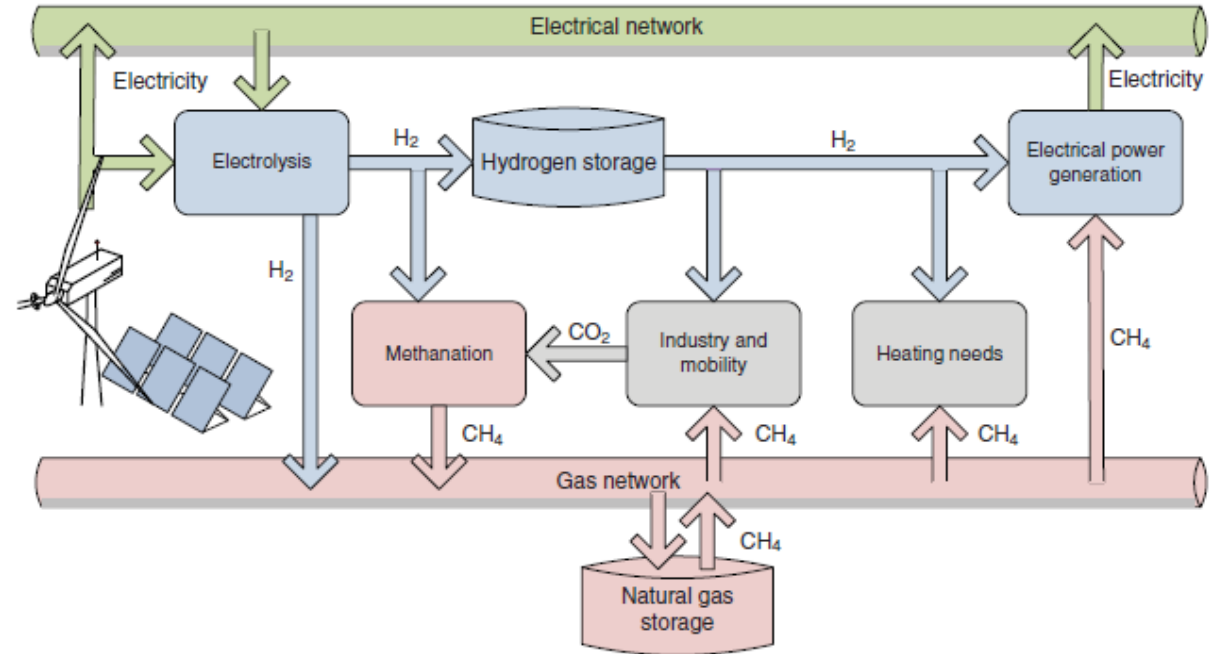
- ✓ Τα κύρια **πλεονεκτήματα** για τη χρήση του H_2 ως ενεργειακού πόρου:
 - Μπορεί να παραχθεί εύκολα από νερό
 - Δεν έχει εκπομπές CO_2 όταν παράγεται από περίσσεια ενέργεια ΑΠΕ. Με αυτό το τρόπο εκμεταλευόμαστε και το πλεόνασμα παραγωγής των ΑΠΕ
 - Καλό υποκατάστατο του πετρελαίου. Υψηλή πυκνότητα ενέργειας
 - Μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε κυψέλες καυσίμου για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας
 - Μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως καύσιμο σε λέβητες, αεριοστροβίλους και μηχανές εσωτερικής καύσης. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί στην αυτοκίνηση (είτε σε ΜΕΚ είτε σε κυψέλες καυσίμου)



- ✓ Αντίστοιχα, τα κύρια **μειονεκτήματα** μπορούν να συνοψιστούν στα εξής:
 - Έχει αρνητική καθαρή ενεργειακή απόδοση, εκτός και αν παράγεται από πλεόνασμα ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται από ΑΠΕ
 - Έχει σημαντικές εκπομπές CO_2 , όταν παράγεται από ενώσεις που περιέχουν άνθρακα (όχι δηλαδή μέσω ηλεκτρόλυσης κάνοντας χρήση πλεονάζουσας ηλεκτρικής ενέργειας από ΑΠΕ)
 - Υψηλό κόστος, το οποίο δημιουργεί την ανάγκη για επιδοτήσεις των σχετικών τεχνολογιών
 - Απαιτείται σύστημα αποθήκευσης και διανομής. Αυτά με τη σειρά τους αυξάνουν το συνολικό κόστος που απαιτείται για τη χρήση του H_2 ως βασικού καύσιμου



- ✓ Αναφέρεται στη μετατροπή της ηλεκτρικής ενέργειας (προερχόμενη συνήθως θα λέγαμε από ΑΠΕ) σε αέριο, το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως καύσιμο σε διάφορες εφαρμογές (π.χ. στον τριτογενή τομέα, το δίκτυο φυσικού αερίου, τις μεταφορές, και τη βιομηχανία)
- ✓ Το αέριο που παράγεται μπορεί να είναι είτε υδρογόνο είτε συνθετικό μεθάνιο (συνθετικό φυσικό αέριο) και παραδίδεται στους τελικούς χρήστες χρησιμοποιώντας το δίκτυο μεταφοράς και διανομής φυσικού αερίου
- ✓ Θεωρείται μια από τις πλέον υποσχόμενες στρατηγικές για την περαιτέρω ενσωμάτωση ΑΠΕ στα υπάρχοντα ΣΗΕ και για την απανθρακοποίηση των σύγχρονων ΣΗΕ



Πηγή: F. Diaz-Gonzalez, A. Sumper, O. Gomis-Bellmunt, "Energy Storage in Power Systems," Wiley, 2016.



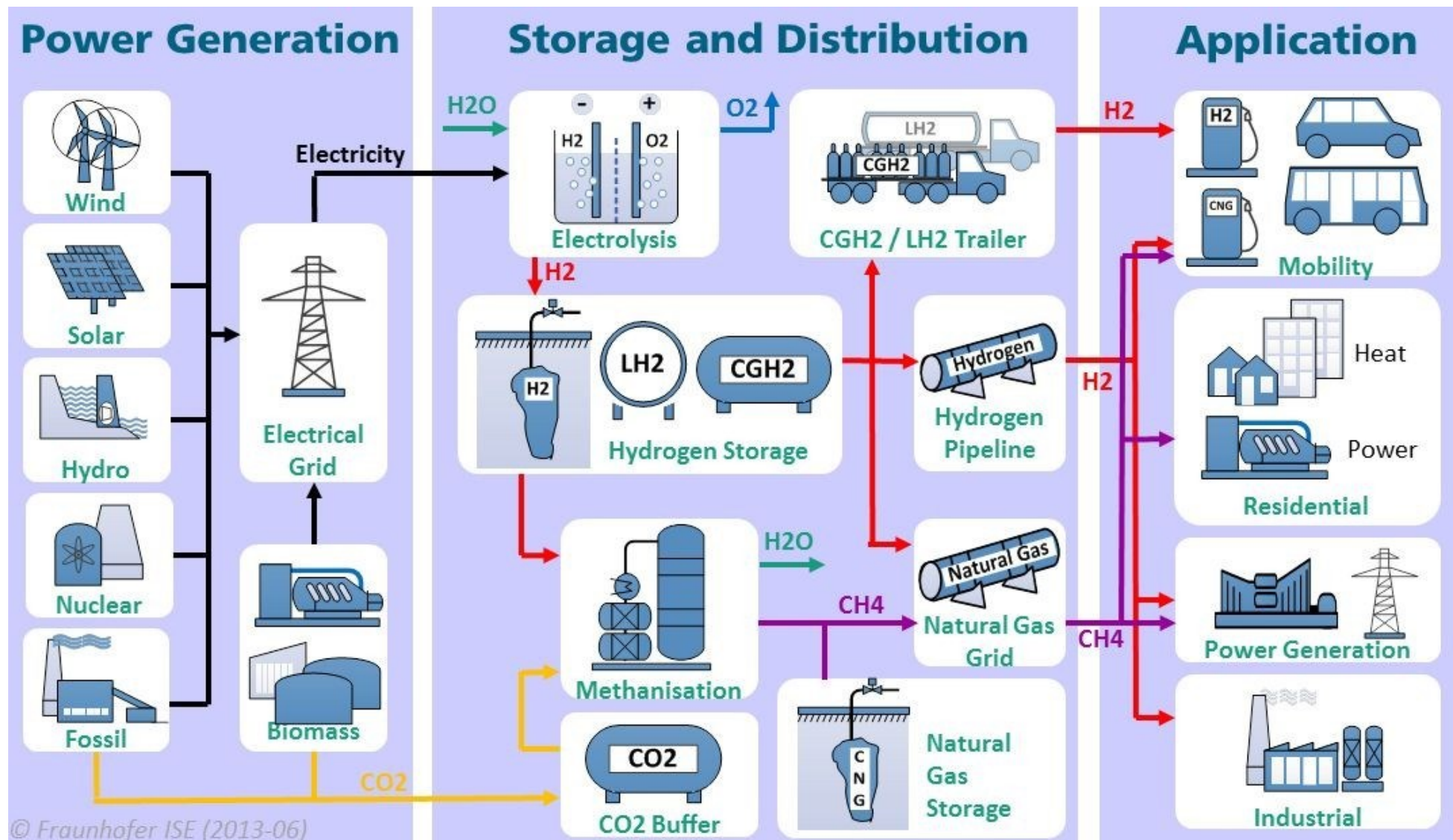
- ✓ Σε χρονικές στιγμές πλεονάζουσας ενέργειας από ΑΠΕ, παράγεται H_2 μέσω ηλεκτρόλυσης. Με αυτό τον τρόπο η περίσσεια ΑΠΕ που δε μπορεί να εγχυθεί στο ΣΗΕ μετατρέπεται σε χημική ενέργεια, η οποία με τη σειρά της μπορεί να αποθηκευτεί σε δεξαμενές ώστε να επαναχρησιμοποιηθεί σε μεταγενέστερο χρόνο για άλλους σκοπούς (π.χ. Να χρησιμοποιηθεί ως καύσιμο σε μια κυψέλη καυσίμου ή ως καύσιμο σε κάποιο αεριοστρόβιλο ώστε να παραχθεί ξανά ηλεκτρική ενέργεια)
- ✓ Εκτός από την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, το H_2 μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για άλλους σκοπούς (π.χ. στη βιομηχανία, ως καύσιμο στις μεταφορές, να εγχυθεί στο σύστημα μεταφορά και διανομής φυσικού αερίου ώστε να φτάσει σε οικιακούς καταναλωτές και να καλύψει ανάγκες θέρμανσης)
- ✓ Ωστόσο, αυτή η τελευταία επιλογή (της έγχυσης του H_2 στο δίκτυο φυσικού αερίου) περιορίζεται από το γεγονός ότι λόγω της υψηλής ευφλεκτότητας του υδρογόνου, ο συνολικός όγκος του που αποθηκεύεται στους αγωγούς περιορίζεται από τους κανονισμούς ασφαλείας μεταξύ του 0,2 και 12% της συνολικής χωρητικότητας μεταφοράς φυσικού αερίου (ανάλογα με τους κανονισμούς κάθε χώρας)



- ✓ Επιπρόσθετα, το H_2 μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε συνδυασμό με CO_2 για την παραγωγή συνθετικού μεθανίου (μέσω κατάλυσης). Κατά τη χημική ένωση H_2 και CO_2 παράγεται εκτός από μεθάνιο και θερμότητα, η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε επόμενη χρήση
- ✓ Το CO_2 που απαιτείται μπορεί να ληφθεί από την ατμόσφαιρα, από βιομάζα ή από εργοστάσια παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας που χρησιμοποιούν ορυκτά καύσιμα (πρέπει να είναι εξοπλισμένα με συστήματα δέσμευσης CO_2)
- ✓ Κάθε διεργασία ή τεχνολογία μετατροπής/αποθήκευσης ενέργειας συνεπάγεται απώλειες. Οι απώλειες ενέργειας είναι αποδεκτές σε περιπτώσεις που το πλεόνασμα ηλεκτρικής ενέργειας δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί για άλλη εφαρμογή ή η παραγωγή της πρέπει να μειωθεί (π.χ., απόρριψη ενέργειας ΑΠΕ)



Power-to-Gas

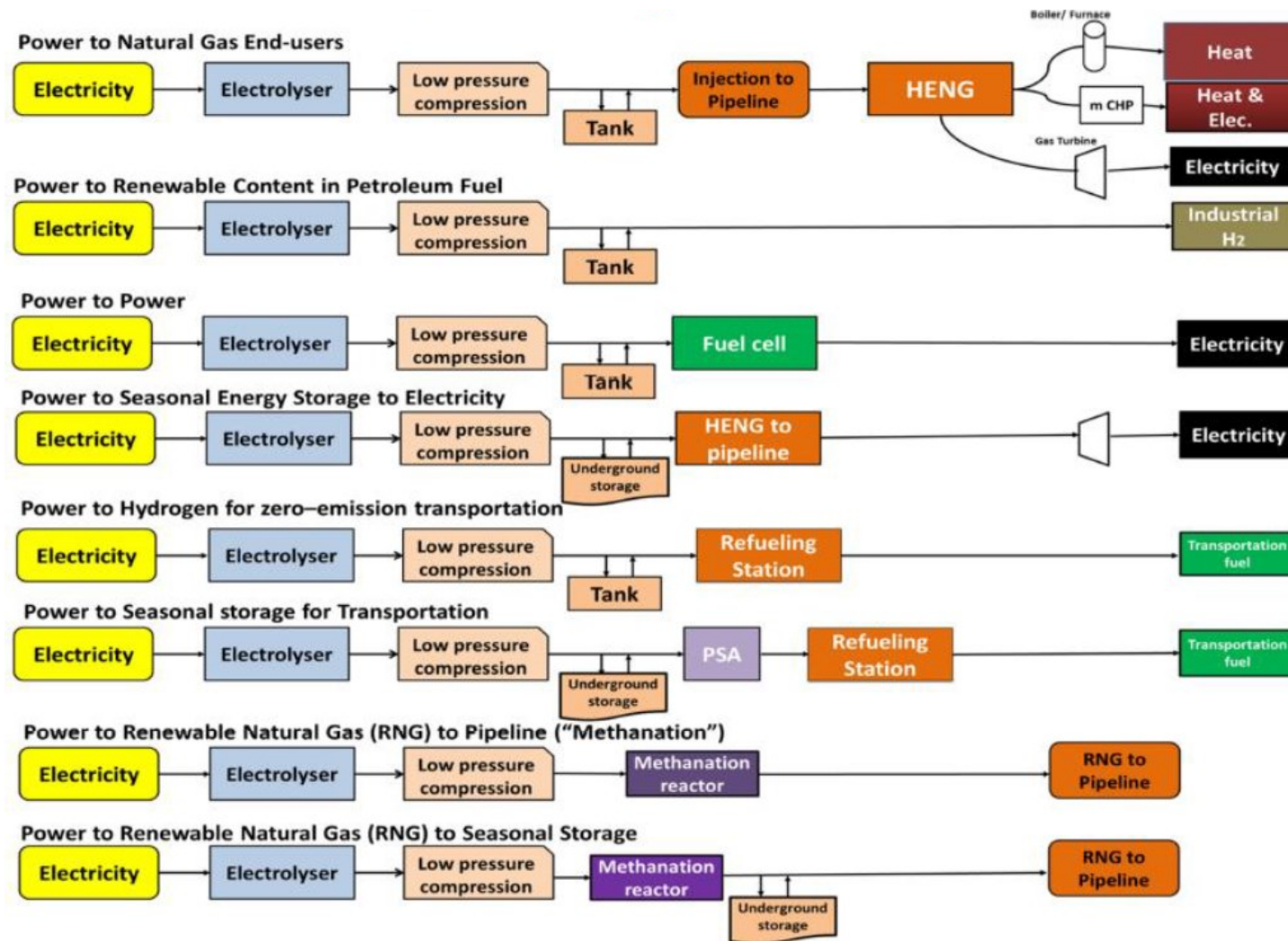




Αλυσίδες Μετατροπής Ηλεκτρικής Ενέργειας σε Αέριο



- ✓ Το κλειδί είναι ότι η διαδικασία μετατροπής ηλεκτρικής ενέργειας σε αέριο (Power-to-Gas, P2G) προσφέρει διαφορετικές εναλλακτικές ενεργειακών εφαρμογών που μπορούν να εφαρμοστούν σταδιακά και συνδυαστικά (επικουρικά η μια με την άλλη)
- ✓ Έτσι, γίνεται πιο αποτελεσματική χρήση των διαθέσιμων πόρων (σήμερα και στο μέλλον)
- ✓ Οι εναλλακτικές επιλογές της διαδικασίας μετατροπής ηλεκτρικής ενέργειας σε αέριο συνοψίζονται στο διπλανό σχήμα





- ✓ Οι εναλλακτικές επιλογές της διαδικασίας μετατροπής ηλεκτρικής ενέργειας σε αέριο είναι οι ακόλουθες:
 1. Ενέργεια σε H_2 για τελικούς χρήστες φυσικού αερίου μέσω φυσικού αερίου εμπλουτισμένου με υδρογόνο (Power to Natural Gas End Users). Οι τελικοί αυτοί χρήστες μπορεί να είναι:
 - Οικιακοί καταναλωτές που χρησιμοποιούν το φυσικό αέριο για θέρμανση
 - Αεριοστροβιλικοί σταθμοί παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας
 - Μονάδες συμπαραγωγής ηλεκτρισμού θερμότητας
 2. Ενέργεια για ανανεώσιμο περιεχόμενο σε πετρελαϊκά καύσιμα (Power to Renewable Content In Petroleum Fuel)



- ✓ Οι εναλλακτικές επιλογές της διαδικασίας μετατροπής ηλεκτρικής ενέργειας σε αέριο είναι οι ακόλουθες:

3. Ενέργεια σε ενέργεια (Power to Power)
4. Ενέργεια σε αέριο – Εποχική αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας (Power to Seasonal Energy Storage to Electricity)
5. Ενέργεια για μεταφορά με μηδενικές εκπομπές (Power to H₂ for Zero Emission Transportation)
6. Ενέργεια για εποχική αποθήκευση για μεταφορά (Power to Seasonal Storage for Transportation)
7. Ενέργεια σε ανανεώσιμο φυσικό αέριο σε αγωγό -μεθανοποίηση- (Power to Renewable Natural Gas -RNG- to Pipeline -Methanation-)
8. Ενέργεια σε ανανεώσιμο φυσικό αέριο για εποχική αποθήκευση (Power to Renewable Natural Gas to Seasonal Storage)



✓ **Power to Natural Gas End Users:**

- Το υδρογόνο που παράγεται από την πλεονάζουσα ενέργεια, συμπεριλαμβανομένων των ΑΠΕ, μπορεί να εγχυθεί στο σύστημα αγωγών φυσικού αερίου για τη δημιουργία φυσικού αερίου εμπλουτισμένο με υδρογόνο (HENG)
- Αυτό το εμπλουτισμένο με υδρογόνο φυσικό αέριο έχει χαμηλότερες εκπομπές CO₂ σε σύγκριση με το συμβατικό φυσικό αέριο και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για διαφορετικούς σκοπούς όπως η θέρμανση, η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας ή ως καύσιμο για τον τομέα των μεταφορών
- Το ηλεκτρολυτικό υδρογόνο που παράγεται με αυτή τη μέθοδο μπορεί να εγχυθεί στους αγωγούς μεταφοράς ή διανομής φυσικού αερίου, έως συγκεκριμένα όρια που κυμαίνονται από 5 έως 20%
- Επιπλέον, απαιτούνται δεξαμενές αποθήκευσης υδρογόνου ως ρυθμιστικός παράγοντας για την εξισορρόπηση της προσφοράς και της ζήτησης υδρογόνου (δεδομένου ότι ένα μέρος της ηλεκτρικής ενέργειας προέρχεται από διαλείπουσα ανανεώσιμη ενέργεια, και λόγω του προφίλ ζήτησης φυσικού αερίου, υπάρχει ανάγκη για συστήματα αποθήκευσης ενέργειας)



✓ **Power to Natural Gas End Users:**

- Η ανάλυση ασφάλειας και κινδύνου είναι δύο σημαντικά ζητήματα που πρέπει να ληφθούν υπόψη κατά την ανάμειξη H_2 σε αγωγούς φυσικού αερίου που εξαρτώνται από τη συγκέντρωση H_2 , τους τύπους και το υλικό των αγωγών
- Η κύρια ανησυχία σχετικά με τον κίνδυνο ανάμειξης H_2 σε αγωγούς φυσικού αερίου είναι η πιθανότητα ανάφλεξης
- Το υλικό των αγωγών υποβαθμίζεται ταχύτερα όταν H_2 αναμιγνύεται με φυσικό αέριο
- Σίγουρα στα αρχικά στάδια εφαρμογής (και για αρκετά χρόνια) οι συγκεντρώσεις στο σύστημα φυσικού αερίου θα είναι πολύ κάτω από το 2%, και συνεπώς δεν αντιπροσωπεύουν σημαντική αύξηση του κινδύνου
- **Ποιοτικά οφέλη:** αυτή η πορεία απαιτεί ελάχιστη επαυξητική επένδυση και μπορεί να αντιμετωπίσει την άμεση ανάγκη αποθήκευσης ενέργειας. Επιπλέον, μπορεί να μειώσει την ανάγκη απόρριψης ή πώλησης ενέργειας με μη συμφέροντες όρους



✓ **Power to Renewable Content In Petroleum Fuel:**

- Οι εταιρείες πετρελαίου αναμειγνύουν βιοκαύσιμα, συνήθως αιθανόλη, στην διανεμόμενη βενζίνη σε εύρος 5-10% (προώθηση της βιομηχανίας ανανεώσιμων καυσίμων)
- Με τον τρόπο αυτό μειώνεται οι ανάγκες κατανάλωσης ορυκτών καυσίμων και μειώνονται οι εκπομπές άνθρακα που εκλύονται από τα αυτοκίνητα κατά την καύση βενζίνης
- Ωστόσο, η αιθανόλη έχει χαμηλότερη ενεργειακή απόδοση. Επομένως, το ανανεώσιμο ηλεκτρολυτικό υδρογόνο μπορεί να αναγνωριστεί ως μια πιθανή μέθοδος για την αύξηση της ανανεώσιμης ενέργειας στα τρέχοντα καύσιμα μεταφοράς χωρίς να αλλάξει η ποιότητα ή η σύνθεση του ίδιου του καυσίμου
- **Ποιοτικά οφέλη:** Αυτή η αλυσίδα μειώνει το ανθρακικό αποτύπωμα των καυσίμων πετρελαίου μέσω της χρήσης της διαδικασίας μετατροπής ηλεκτρικής ενέργειας σε αέριο για διύλιση πετρελαίου, αυξάνει την ανανεώσιμη περιεκτικότητα σε καύσιμα πετρελαίου και μειώνει το ανθρακικό αποτύπωμα στον τομέα των μεταφορών. Αυτό το «μονοπάτι» είναι επίσης συμπληρωματικό με την προσθήκη αιθανόλης στη βενζίνη, οπότε τα οφέλη και των δύο μεθόδων μπορούν να εφαρμοστούν ταυτόχρονα



✓ **Power to Power:**

- Η πλεονάζουσα ηλεκτρική ενέργεια μπορεί να μετατραπεί σε H_2 μέσω ηλεκτρόλυσης, να συμπιεστεί και να αποθηκευτεί σε συστήματα αποθήκευσης, και στη συνέχεια να χρησιμοποιηθεί όταν χρειάζεται μέσω κυψελών καυσίμου ή αεριοστροβίλων H_2 για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας
- Η κύρια ανησυχία για αυτό το μονοπάτι είναι ότι οι πρόσθετες τεχνολογίες που απαιτούνται αυξάνουν τις απώλειες ενέργειας και το κόστος (απαιτούνται π.χ. κυψέλες καυσίμου). Επιπλέον, η συνολική απόδοση είναι χαμηλότερη από την αποθήκευση ενέργειας σε μπαταρίες. Ωστόσο, αυτό το μονοπάτι μπορεί να είναι ευνοϊκό σε απομακρυσμένες περιοχές ή σε καταστάσεις έκτακτης ανάγκης καθώς μπορεί να παρέχει εκτεταμένη εφεδρεία
- **Ποιοτικά οφέλη:** Αυτή η αλυσίδα είναι ευεργετική για νησιδοποιημένα δίκτυα. Θα ήταν μια καλή επιλογή για την αξιοποίηση πλεονάζουσας ενέργειας από ΑΠΕ και τη χρήση σε μεταγενέστερο χρόνο για εξισορρόπηση φορτίου



✓ **Power to Seasonal Energy Storage to Electricity:**

- Το H_2 που παράγεται από το πλεόνασμα ηλεκτρικής ενέργειας μπορεί να αποθηκευτεί υπόγεια για μεγάλο χρονικό διάστημα για να χρησιμοποιηθεί όταν χρειάζεται. Η αποθήκευση H_2 μαζί με την αποθήκευση φυσικού αερίου μπορούν να χρησιμοποιηθούν για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας σε μεγάλης κλίμακας σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με βάση το φυσικό αέριο, όπως αεριοστρόβιλοι ή σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής συνδυασμένου κύκλου, ή μπορεί να διαχωριστεί από άλλα αέρια για κατανάλωση σε κυψέλες καυσίμου για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας
- **Ποιοτικά οφέλη:** Αυτή η αλυσίδα είναι μια πλεονεκτική εναλλακτική λύση για τη σωστή διαχείριση πλεονασμάτων ΑΠΕ που σε συγκεκριμένες περιόδους του χρόνου παρουσιάζουν σημαντική αύξηση. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εξισορρόπηση της παραγωγής ισχύος και της ζήτησης



✓ **Power to H₂ for Zero Emission Transportation:**

- Το H₂ συμπιέζεται και αποθηκεύεται σε σταθμούς ανεφοδιασμού σε υψηλή πίεση που κυμαίνονται από 300 έως 700 bar. Χρησιμοποιείται στη συνέχεια ως καύσιμο σε οχήματα
- Τα οχήματα με κυψέλες καυσίμου H₂ μπορούν πραγματικά να έχουν μηδενικές εκπομπές αέριων ρύπων όταν αυτά τροφοδοτούνται με H₂ που έχει παραχθεί από ηλεκτρική ενέργεια που προέρχεται από πυρηνικές, υδροηλεκτρικές, αιολικές ή ηλιακές πηγές. Ωστόσο, ακόμη και όταν οι κυψέλες καυσίμου χρησιμοποιούν H₂ που παράγεται από φυσικό αέριο, οι εκπομπές των αερίων του θερμοκηπίου είναι σημαντικά μικρότερες σε σχέση με τα οχήματα κινητήρων εσωτερικής καύσης
- **Ποιοτικά οφέλη:** Αυτή η αλυσίδα είναι πολλά υποσχόμενη καθώς μπορεί να ενοποιήσει τους τομείς της ηλεκτρικής ενέργειας και της μεταφοράς. Επιπλέον, δεν απαιτείται η αναβάθμιση των συστημάτων διανομής ηλεκτρικής ενέργειας (σε αντίθεση με τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα που λειτουργούν με μπαταρίες)



✓ **Power to Seasonal Storage for Transportation:**

- Το H_2 που παράγεται από πλεονάζουσα ενέργεια ΑΠΕ μπορεί να συμπιεστεί και να αποθηκευτεί σε υπόγειες εγκαταστάσεις αποθήκευσης, όπως σπήλαια αλατιού ή εξαντλημένες δεξαμενές πετρελαίου και φυσικού αερίου
- Αυτή η αλυσίδα είναι πρακτικά ίδια με την προηγούμενη. Ένα επιπλέον πλεονέκτημα είναι ότι το H_2 αποθηκεύεται σε μεγάλες ποσότητες και μπορεί να χρησιμοποιηθεί όλο το χρόνο σε εφαρμογές μεταφοράς (μακροπρόθεσμη διαχείριση διαθέσιμων πόρων)
- **Ποιοτικά οφέλη:** Ίδια με αυτά της προηγούμενης αλυσίδας. Επιπρόσθετα, εξασφαλίζεται μακροπρόθεσμη διαχείριση των διαθέσιμων πόρων



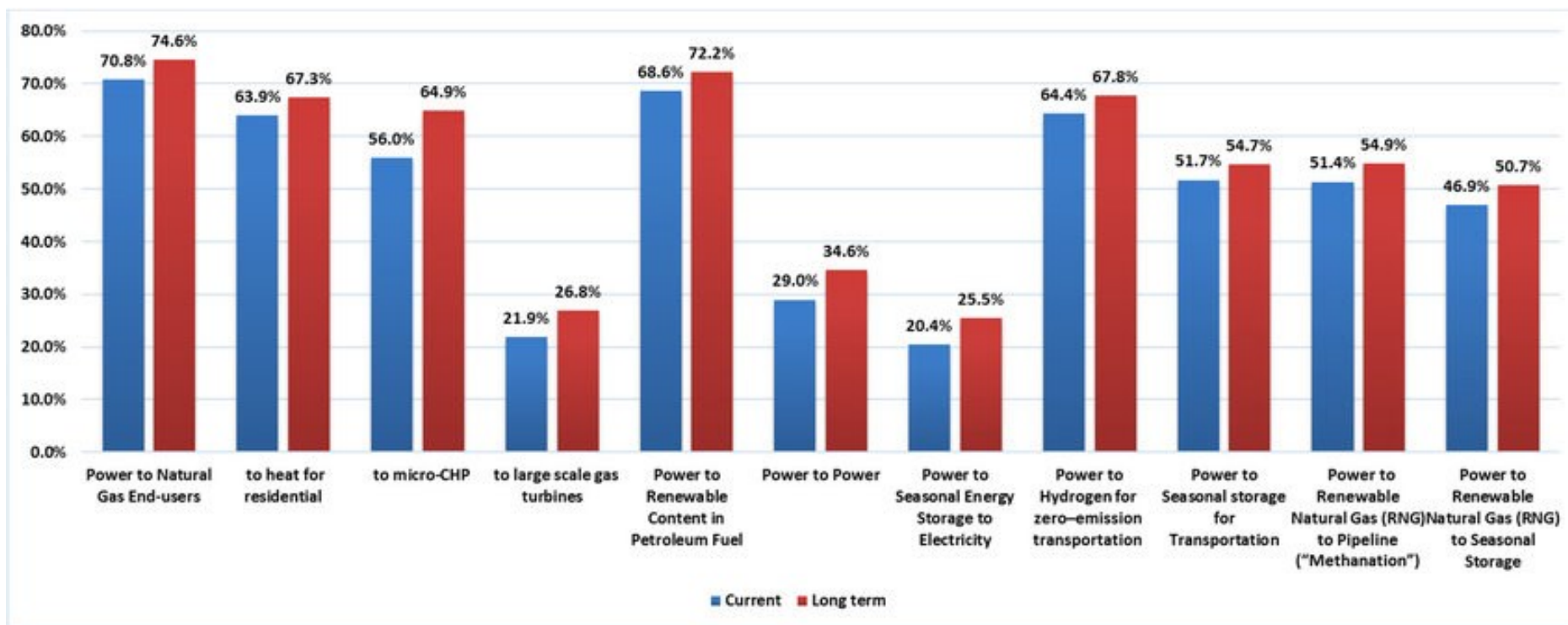
✓ **Power to Renewable Natural Gas -RNG- to Pipeline (Methanation):**

- Το H_2 σε συνδυασμό με το CO_2 μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη δημιουργία ανανεώσιμου φυσικού αερίου το οποίο μπορεί να εγχυθεί στο σύστημα διανομής φυσικού αερίου
- Αυτή η διαδικασία έχει υψηλότερη απώλεια ενέργειας και κόστος σε σύγκριση με την απλή παραγωγή και έγχυση H_2 . Ωστόσο, το σαφές όφελος του ανανεώσιμου μεθανίου είναι ότι δεν υπάρχουν περιορισμοί στην ποσότητα ανάμειξης στο σύστημα διανομής φυσικού αερίου. Επιπλέον, υπάρχει ένα βήμα δέσμευσης άνθρακα που μετατρέπει το διοξείδιο του άνθρακα (CO_2) σε ανανεώσιμο φυσικό αέριο
- Αυτή η εναλλακτική λύση μπορεί ακόμη και να είναι συμπληρωματική με την πρώτη αλυσίδα στην οποία το H_2 μπορεί να εγχυθεί στον αγωγό φυσικού αερίου μέχρι το επιτρεπόμενο όριο και το υπόλοιπο υδρογόνο μπορεί να μετατραπεί σε μεθάνιο μέσω μεθανοποίησης
- **Ποιοτικά οφέλη:** Δέσμευση άνθρακα από παραγωγή βιοαερίου ή βιομηχανικές διεργασίες και περαιτέρω αξιοποίηση του, ελαχιστοποιώντας παράλληλα τις εκπομπές αέριων ρύπων

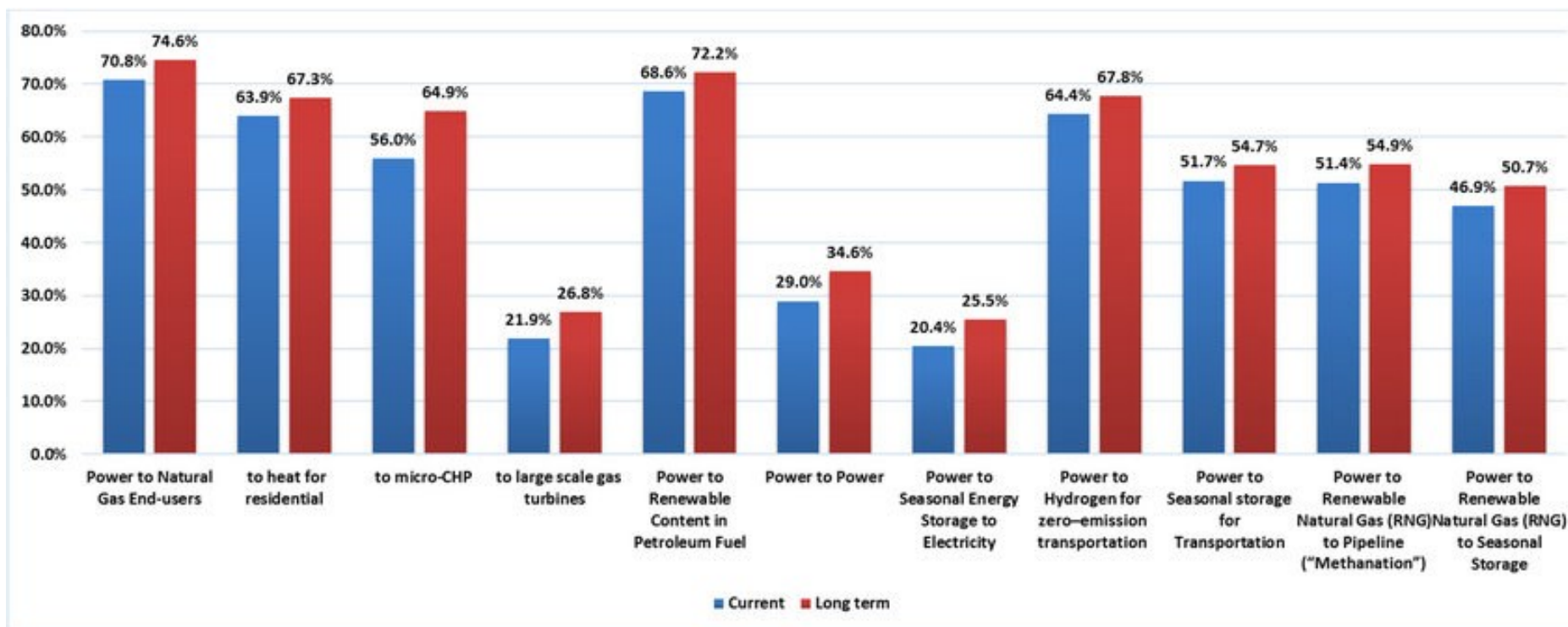


✓ **Power to Renewable Natural Gas to Seasonal Storage:**

- Μόλις το ανανεώσιμο μεθάνιο παράγεται από πλεόνασμα ηλεκτρικής ενέργειας, μπορεί να αποθηκευτεί σε υπόγεια αποθήκευση και να χρησιμοποιηθεί όταν χρειάζεται
- Έτσι, η μεθανοποίηση μπορεί να συνδυαστεί με μια συνεχιζόμενη βιομηχανική ή γεωργική λειτουργία για δέσμευση άνθρακα και δεν εξαρτάται από τη ζήτηση φυσικού αερίου
- **Ποιοτικά οφέλη:** Ίδια με αυτά της προηγούμενης αλυσίδας. Επιπρόσθετα, εξασφαλίζεται μακροπρόθεσμη διαχείριση των διαθέσιμων πόρων



- ✓ Η χρήση H_2 για θέρμανση σε κατοικίες έχει μέση απόδοση 63%, ενώ η χρήση σε συστήματα συμπαραγωγής ηλεκτρισμού και θερμότητας (micro-CHP) έχει ως αποτέλεσμα απόδοση 56%. Επιπλέον, η άμεση χρήση H_2 στον αγωγό φυσικού αερίου έχει υψηλότερη απόδοση σε σύγκριση με την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από H_2 που έχει συνολική απόδοση περίπου 25%



- ✓ Η καλύτερη επιλογή για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από H_2 είναι μέσω κυψελών καυσίμου που είναι περίπου 30%, ενώ η απόδοση του H_2 για μεταφορά είναι περίπου 64%. Η εποχική αποθήκευση μπορεί να μειώσει τη συνολική απόδοση του P2G, αλλά όχι περισσότερο από 10% χαμηλότερη. Η ενέργεια για ανανεώσιμο περιεχόμενο στα καύσιμα πετρελαίου έχει μέση απόδοση 68% (τρέχουσα) και 72% (μελλοντική)