

Οχήματα Υδρογόνου στις Οδικές Μεταφορές Πολυκριτηριακή Βελτιστοποίηση Κόστους και Εκπομπών

Ιούνιος 2026

Περίληψη

Η παρούσα προοπτική εξετάζει τεchnοοικονομικά και περιβαλλοντικά τα οχήματα υδρογόνου κυψελών καυσίμου (Fuel Cell Electric Vehicles, FCEVs) σε σύγκριση με οχήματα ντίζελ, βενζίνης και ηλεκτρικά οχήματα μπαταρίας (Electric Vehicles, EVs) για την περίοδο 2026–2060. Το μοντέλο βελτιστοποίησης συνδυάζει το Συνολικό Κόστος Κτήσης (Total Cost of Ownership, TCO) και τις Εκπομπές από την Πηγή έως τον Τροχό (Well-to-Wheel, WTW), ώστε να προσδιορίσει πότε το υδρογόνο γίνεται ταυτόχρονα οικονομικά και περιβαλλοντικά ανταγωνιστικό για τις οδικές μεταφορές. Τα πιο πρόσφατα αποτελέσματα μοντελοποίησης δείχνουν ότι:

- **Σήμερα**, τα FCEVs έχουν TCO περίπου €275,000
- **Σήμερα**, τα EVs έχουν το χαμηλότερο TCO, περίπου €75,000–€90,000, ενώ οι επιλογές με κινητήρα εσωτερικής καύσης κινούνται στο ίδιο περίπου εύρος
- **Περίπου το 2037**, τα FCEVs γίνονται φθηνότερα από τα οχήματα εσωτερικής καύσης
- **Περίπου το 2046**, τα FCEVs επιτυγχάνουν πλήρη ισοτιμία TCO με τα EVs
- **Σε όλο τον ορίζοντα**, τα FCEVs και τα EVs διαμορφώνουν το μέτωπο ελαχιστοποίησης εκπομπών, με τα FCEVs να επιτυγχάνουν περίπου τετραπλάσια μείωση των εκπομπών WTW σε σχέση με το diesel το 2026

Επισκόπηση Υπολογιστικού Μοντέλου

Το μοντέλο βελτιστοποίησης ενσωματώνει:

- **Τεχνολογίες:** Οχήματα FCEV υδρογόνου, οχήματα ντίζελ, οχήματα βενζίνης και EVs για τυπικό επιβατικό όχημα ελαφρού τύπου με 15,000 km/έτος και διάρκεια ζωής 15 ετών
- **TCO:** Συνδυασμός κόστους CAPEX οχήματος με ετήσιο λειτουργικό κόστος (καύσιμο, ενέργεια, απόδοση, συντήρηση, ασφάλιση, άδεια κυκλοφορίας, φορολογία)
- **Καμπύλες μάθησης CAPEX, τιμών καυσίμου και ηλεκτρισμού:** Εκθετικές μειώσεις κόστους για τις τεχνολογίες FCEV υδρογόνου και EV
- **Μοντελοποίηση εκπομπών WTW:** Χρονικά μεταβαλλόμενες εντάσεις εκπομπών WTW για κάθε καύσιμο/τεχνολογία, με εκθετική μείωση προς χαμηλούς, συμβατούς με την απανθρακοποίηση, συντελεστές
- **Πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση:** Ταυτόχρονη ελαχιστοποίηση TCO και εκπομπών WTW για κάθε έτος αγοράς και υπολογισμός τιμής υδρογόνου (σε €/kg) που απαιτείται για ισοδυναμία TCO έναντι κάθε εναλλακτικής

Προοπτικές 2026–2060

Οι προοπτικές TCO και WTW σε βάθος χρόνου δείχνουν ότι:

- **Τιμές ορυκτών καυσίμων:** Το TCO των οχημάτων ντίζελ και βενζίνης αυξάνεται έντονα, με τη βενζίνη να ανεβαίνει από €100,000 το 2026 σε σχεδόν €250,000 έως το 2046, η αύξηση οφείλεται στην τιμολόγηση άνθρακα μέσω ETS2, στα διόδια CO₂ της Eurovignette και στον πληθωρισμό
- **Τιμή FCEVs υδρογόνου:** Το TCO των FCEVs μειώνεται σταδιακά, καθώς το CAPEX υποχωρεί και το κόστος του υδρογόνου μειώνεται, βραχυπρόθεσμα παραμένουν μη ανταγωνιστικά χωρίς στήριξη, αλλά το χάσμα TCO περιορίζεται
- **Τιμή EVs:** Τα EVs διατηρούν το χαμηλότερο TCO για το μεγαλύτερο μέρος του ορίζοντα, αλλά μετά το 2030 εμφανίζουν μικρή αύξηση κόστους λόγω ταχυφόρτισης και ενίσχυσης του δικτύου

Σημαντικά ορόσημα

Ορόσημο	Έτος	Περιγραφή
Οικονομικά αποδοτικό vs ICE	2037	Τα FCEVs υδρογόνου γίνονται πιο οικονομικά σε σχέση με τα οχήματα βενζίνης και ντίζελ
Ισοτιμία TCO vs EVs	2046	Τα FCEVs υδρογόνου επιτυγχάνουν ισοδυναμία TCO με τα EVs, περίπου στα €100,000

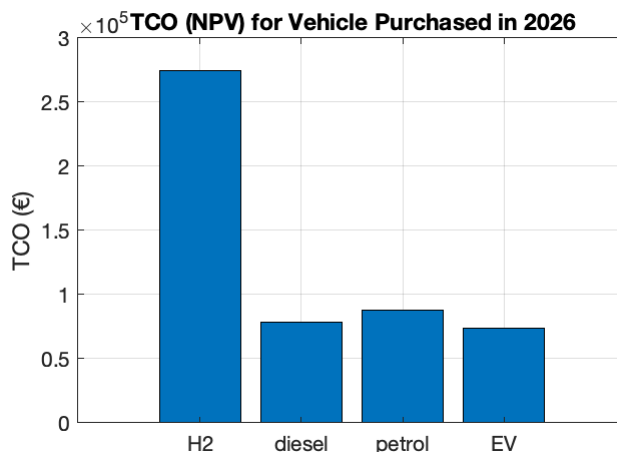
Κύρια Αποτελέσματα

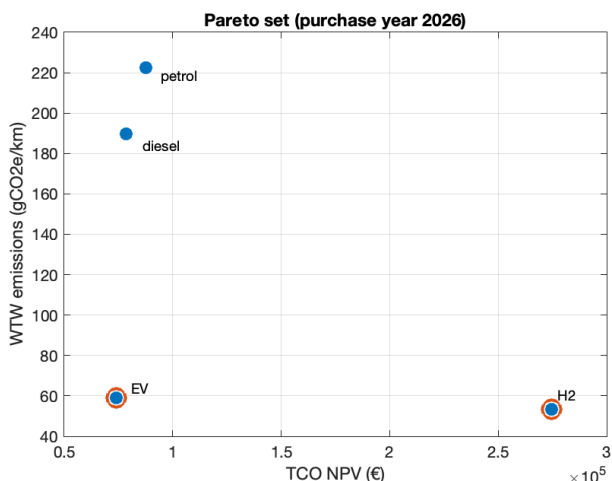
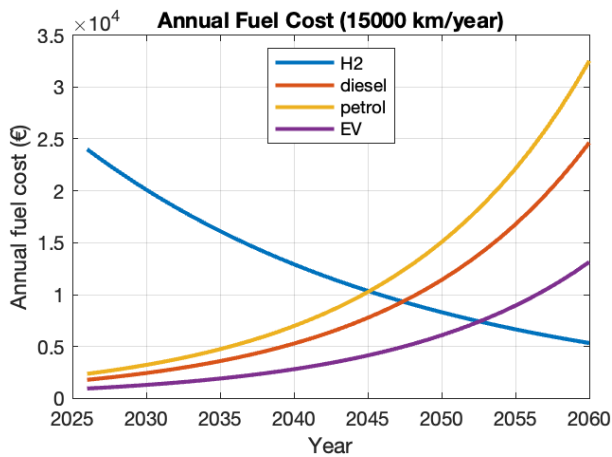
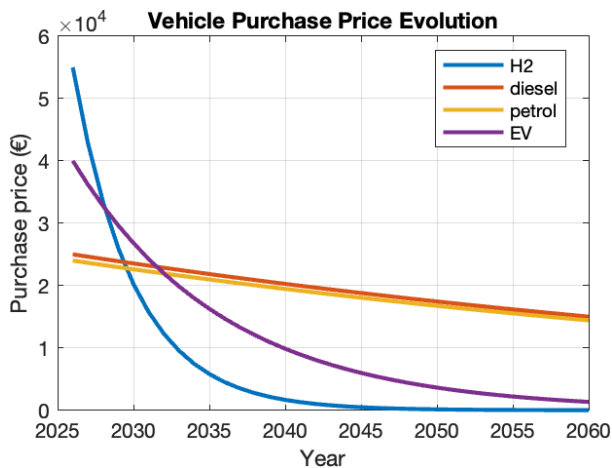
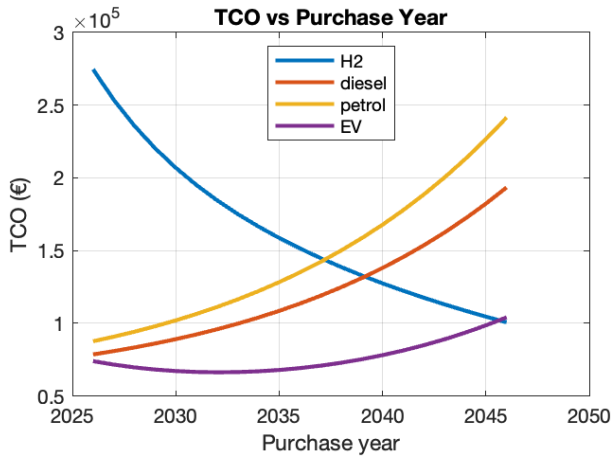
Έτος βάσης 2026

Για οχήματα που αγοράζονται το 2026, η μοντελοποίηση δείχνει:

- **TCO:** Τα FCEVs υδρογόνου έχουν TCO περίπου €275,000, έναντι €75,000–€90,000 για ντίζελ, βενζίνη και EVs, τα EVs είναι σήμερα η οικονομικά βέλτιστη επιλογή
- **Κόστος FCEVs:** Το υψηλό CAPEX, οι ακριβές δεξαμενές 700 bar και οι υψηλές τιμές πράσινου υδρογόνου διατηρούν το κόστος των FCEVs υψηλό
- **Εκπομπές:** Τα FCEVs υδρογόνου και τα EVs βρίσκονται στο μέτωπο χαμηλών εκπομπών, με τα FCEVs να εμφανίζουν περίπου τετραπλάσια χαμηλότερες WTW εκπομπές από τα οχήματα ντίζελ το 2026

Λεπτομερή Αποτελέσματα





Οικονομικές Επιπτώσεις

Ο συνδυασμός μοντελοποίησης TCO και WTW δείχνει ότι:

- **Κόστος άνθρακα:** Το ETS2 μετακυλίζει σταδιακά το κόστος άνθρακα στις τιμές ντίζελ και βενζίνης, καθιστώντας τις χρεώσεις άνθρακα βασικό παράγοντα του TCO για τα ορυκτά καύσιμα
- **Υδρογόνο έναντι EV:** Παρότι η αλυσίδα υδρογόνου είναι λιγότερο αποδοτική ενεργειακά από τα EVs, τα FCEVs μπορούν να γίνουν ανταγωνιστικά όταν συνυπολογιστούν οι υψηλότερες τιμές άνθρακα και η μείωση του κόστους του υδρογόνου
- **Λειτουργικά πλεονεκτήματα των FCEVs:** Οι γρήγοροι χρόνοι ανεφοδιασμού και η μικρότερη μάζα του συστήματος ενισχύουν τη χρησιμότητα των FCEVs, ιδιαίτερα σε επαγγελματικούς και βαρείς στόλους μεγάλων αποστάσεων

Τιμή Υδρογόνου και Ανάλυση Σημείου Ισοδυναμίας

Κατηγορία	Κύριο εύρος τιμής H ₂	Συνέπεια
Κατάσταση 2026	6–8€/kg	Η βασική τιμή του υδρογόνου παραμένει σημαντικά υψηλότερη από τα επίπεδα ισοδυναμίας που απαιτούνται για να ανταγωνιστεί το ντίζελ, τη βενζίνη ή τα EVs, συνεπώς, απαιτούνται ουσιαστικές επιδοτήσεις ή άλλα μέτρα στήριξης ώστε τα FCEVs να καταστούν βιώσιμα
Απαιτούμενο παράθυρο ισοδυναμίας	2–4€/kg	Για βαρέα και μεγάλων αποστάσεων οχήματα, τα FCEVs χρειάζονται λιανικές τιμές υδρογόνου σε αυτό το εύρος ώστε να επιτύχουν ισχυρή ισοδυναμία TCO· το εύρος αυτό συνάδει με τις αναδυόμενες βιομηχανικές στοχοθεσίες για ανταγωνιστικές εφαρμογές υδρογόνου στις οδικές μεταφορές

Προτάσεις Πολιτικής

Με βάση τα αποτελέσματα της πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης, προτείνονται:

1. **Ισχυρή και προβλέψιμη τιμολόγηση άνθρακα:** Διατήρηση αυστηρών και προβλέψιμων τροχιών ETS2 και CO₂-διαφοροποιημένων διοδίων, ώστε να εσωτερικεύεται το κοινωνικό κόστος του άνθρακα
2. **Στοχευμένη στήριξη της τιμής υδρογόνου:** Εστίαση των συμβολαίων επί της διαφοράς, δημοπρασιών και φορολογικών κινήτρων στη μείωση της τιμής του πράσινου υδρογόνου στο εύρος 2–4€/kg
3. **Υποδομές ανεφοδιασμού σε κόμβους:** Ανάπτυξη μονάδων ηλεκτρόλυσης και ανεφοδιασμού, ώστε να περιορίζονται οι παρεκκλίσεις διαδρομών και να αυξάνεται η αξιοποίηση των σταθμών
4. **Κίνητρα βάσει WTW:** Σχεδιασμός επιδοτήσεων με βάση το WTW, ώστε να επιβραβεύονται πραγματικά οι χαμηλών εκπομπών λύσεις υδρογόνου και ηλεκτρισμού

Συμπεράσματα

Η μοντελοποίηση επιβεβαιώνει ότι:

- Από το 2026, τα FCEVs υδρογόνου έχουν σημαντικά υψηλότερο TCO από τα οχήματα ντίζελ, βενζίνης και EVs
- Με σταθερή τιμολόγηση άνθρακα και μείωση του κόστους υδρογόνου, τα FCEVs γίνονται φθηνότερα από τα οχήματα εσωτερικής καύσης περίπου το 2037
- Περίπου το 2046, τα FCEVs επιτυγχάνουν ισοδυναμία TCO με τα EVs, άρτοντας το οικονομικό εμπόδιο για την υιοθέτησή τους
- Σε όλο τον ορίζοντα, τα FCEVs υδρογόνου και τα EVs παραμένουν οι χαμηλότερες επιλογές εκπομπών για τις οδικές μεταφορές.