



## **ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ**

Σχολή Χημικών Μηχανικών και Μηχανικών Περιβάλλοντος,  
Πολυτεχνειούπολη, Χανιά 73100

---

ΔΙΑΣΤΑΣΙΟΛΟΓΗΣΗ ΣΤΑΘΜΟΥ ΑΝΕΦΟΔΙΑΣΜΟΥ  
ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ ΑΠΟ ΗΛΕΚΤΡΟΛΥΣΗ ΜΕ ΧΡΗΣΗ Φ/Β ΣΕ  
ΛΕΩΦΟΡΕΙΟ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΚΥΨΕΛΙΔΑΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ ΓΙΑ  
ΤΗ ΔΙΑΔΡΟΜΗ ΚΕΝΤΡΟ ΧΑΝΙΩΝ- ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟΥΠΟΛΗ

---

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ ΤΟΥ ΚΩΝΣΤΑΝΤΊΝΟΥ ΑΝΤΩΝΊΔΗ**

ΔΙΑΣΤΑΣΙΟΛΟΓΗΣΗ ΣΤΑΘΜΟΥ ΑΝΕΦΟΔΙΑΣΜΟΥ  
ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ ΑΠΟ ΗΛΕΚΤΡΟΛΥΣΗ ΜΕ ΧΡΗΣΗ Φ/Β ΣΕ  
ΛΕΩΦΟΡΕΙΟ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΚΥΨΕΛΙΔΑΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ ΓΙΑ  
ΤΗ ΔΙΑΔΡΟΜΗ ΚΕΝΤΡΟ ΧΑΝΙΩΝ- ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟΥΠΟΛΗ

---

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ ΤΟΥ ΚΩΝΣΤΑΝΤΪΝΟΥ ΑΝΤΩΝΙΪΔΗ

Τριμελής Επιτροπή : Καθηγητής Τσούτσος Θεοχάρης (Επιβλέπων)

Καθηγήτρια Παναγιωτοπούλου Παρασκευή

Αν. Ερευνητής ΙΤΕ Εμμανουήλ Σταματάκης

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για μη κερδοσκοπικό σκοπό, εκπαιδευτικού ή ερευνητικού χαρακτήρα, με την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για άλλη χρήση θα πρέπει να απευθύνονται προς το συγγραφέα. Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Πολυτεχνείου Κρήτης".

## Πρόλογος - Ευχαριστίες

Η συγκεκριμένη διπλωματική εργασία έγινε υπό το πρίσμα του εργαστηρίου Βιώσιμων και Ανανεώσιμων Ενεργειακών Συστημάτων της σχολής Χημικών Μηχανικών και Μηχανικών Περιβάλλοντος του Πολυτεχνείου Κρήτης.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή Θεοχάρη Τσούτσο, ο οποίος μου έδωσε το έρεισμα και την ευκαιρία να ασχοληθώ και να εκπονήσω την συγκεκριμένη εργασία η οποία όχι μόνο με έκανε να ανακαλύψω την τεχνολογία του Υδρογόνου αλλά και με έφερε σε επαφή με ανθρώπους οι οποίοι ασχολούνται και είναι ειδικευμένοι πάνω στο αντικείμενο.

Ιδιαίτερες ευχαριστίες θα ήθελα επιπλέον να απονείμω στον Νίκο Χαλκιαδάκη, ο οποίος εκπονεί την διδακτορική του διατριβή επιβλέποντας μια εγκατάσταση παρόμοια με αυτή που περιγράφεται στα επόμενα, η οποία βρίσκεται στο κέντρο ερευνών ΕΚΕΦΕ ΔΗΜΟΚΡΙΤΟΣ, και αφιέρωσε αρκετό από τον προσωπικό του χρόνο στο να με καθοδηγεί και να με βοηθάει στην εκπόνηση της συγκεκριμένης εργασίας

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω την καθηγήτρια Παναγιωτοπούλου Παρασκευή και τον αναπληρωτή ερευνητή του ΙΤΕ κύριο Εμμανουήλ Σταματάκη για την συμμετοχή τους στην τριμελή επιτροπή.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω τους φίλους μου, την κοπέλα μου και κυρίως τους γονείς μου οι οποίοι με στήριξαν με κάθε δυνατό τρόπο καθ' όλη την διάρκεια των σπουδών μου.

## Περίληψη

Τα τελευταία 100 χρόνια η ραγδαία εξέλιξη της τεχνολογίας και της βιομηχανίας βελτίωσαν και άλλαξαν ολοκληρωτικά τον τρόπο ζωής και το βιοτικό επίπεδο των ανθρώπων. Ειδικότερα στον τομέα των μεταφορών, ένας μέσος άνθρωπος που ζει σε μια ανεπτυγμένη χώρα έχει υπό την ιδιοκτησία του τουλάχιστον ένα αυτοκίνητο ενώ όλες οι μεγάλες πόλεις διαθέτουν σύνθετα δίκτυα συγκοινωνιών για να εξυπηρετούν τους πολίτες. Όμως στην πλειοψηφία τους, αυτά τα μέσα τροφοδοτούνται από ορυκτά καύσιμα και συνεπώς παράγουν αέριους ρύπους που επηρεάζουν αρνητικά την υγεία των ανθρώπων και συμβάλλουν στο φαινόμενο του θερμοκηπίου. Αυτό αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα σύγχρονα περιβαλλοντικά προβλήματα, το οποίο αν δεν αντιμετωπιστεί μπορεί να καταστήσει την ζωή στην Γη μη εφικτή πριν το τέλος του 21<sup>ου</sup> αιώνα. Μια πιθανή λύση είναι η χρήση του υδρογόνου που μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν εναλλακτικό καύσιμο. Στην συγκεκριμένη εργασία εξετάζεται η βιώσιμη παραγωγή και χρήση αυτού για την τροφοδοσία υδρογονοκίνητων βαρέων οχημάτων. Συγκεκριμένα σχεδιάστηκε μονάδα παραγωγής υδρογόνου από ηλεκτρόλυση της οποίας η απαίτηση σε ενέργεια θα καλύπτεται από φωτοβολταϊκά πλαίσια. Στην συνέχεια το υδρογόνο θα χρησιμοποιείται για την τροφοδοσία δύο λεωφορείων στο δρομολόγιο Κέντρο Χανίων – Πολυτεχνείο Κρήτης. Ως τοποθεσία της εγκατάστασης επιλέχθηκε το μηχανοστάσιο του ΚΤΕΛ Χανίων, ενώ εξετάστηκε μια πληθώρα λεωφορείων υδρογόνου τεχνολογίας κυψελίδας καυσίμου για την αντικατάσταση των συμβατικών. Η έρευνα έδειξε ότι ένα τέτοιο εγχείρημα είναι εφικτό καθώς η εγκατάσταση μπορεί να τοποθετηθεί σε έναν σχετικά μικρό χώρο και να εξυπηρετήσει την ανάγκη υδρογόνου ώστε αντικαταστήσει πλήρως τα συμβατικά λεωφορεία για το συγκεκριμένο δρομολόγιο. Επίσης θα μειωθεί σημαντικά το περιβαλλοντικό αποτύπωμα της διαδρομής αφού τα λεωφορεία θα παράγουν νερό ως αποτέλεσμα της χρήσης του υδρογόνου αποσβώντας έτσι κάθε χρόνο 10,02 TN CO<sub>2</sub>, 44,9 kg NO<sub>x</sub> και 8,8 kg NO<sub>2</sub> που παράγουν τα συμβατικά λεωφορεία της διαδρομής. Τέλος όσο αφορά στο οικονομικό σκέλος του εγχειρήματος, η εταιρία θα πρέπει να επενδύσει περίπου 1.400.000 € για την εγκατάσταση και 1.300.000 € για τα λεωφορεία ενώ θα εξοικονομεί 125.000 € από την μη χρήση υδρογονανθράκων ετησίως. Χωρίς μεταβολή των υπαρχόντων τιμών των εισιτηρίων και με τα παραπάνω δεδομένα για ορίζοντα σχεδιασμού 25 χρόνων, η επένδυση θεωρείται αποδοτική χρησιμοποιώντας την μέθοδο της καθαρής παρούσας αξίας. Ωστόσο παράγοντες όπως η αύξηση του κόστους των ορυκτών καυσίμων και η μείωση του κόστους παραγωγής υδρογόνου στο μέλλον θα δεν εξετάζονται στην παρούσα εργασία.

## Abstract

Throughout the past 100 years the rapid development of technology and industry improved the standard of living of humans. Especially in the field of transportation, an average citizen of a developed country owns at least one car, while the majority of cities have complex transportation networks. The main source of energy used for the above comes from fossil fuels, and thus vast amounts of air pollutants are produced, with negative effects on public health and a large contribution to the greenhouse effect. This constitutes one of the most important modern environmental problems and can make planet earth uninhabitable by the end of the 21<sup>st</sup> century, if it is not addressed. A solution that can contribute to the alleviation of the aforementioned problem, is the use of hydrogen as an alternative fuel for transportation. The topic of this thesis is the sustainable production and use of hydrogen fuel for heavy-duty vehicles. More specifically, it covers the design of a hydrogen refueling station for such vehicles. The design includes a hydrogen production unit, using the technology of PV electrolysis. The hydrogen produced will then be used to fuel two fuel-cell electric busses for the route of Chania center- TUC. The place in which the station will be located is the main bus depot of the company KTEL-Chania. For the purposes of this project, a variety of FCEBs were examined for the replacement of the conventional ones which are currently being used. The results of this research showed that this task is technically feasible since the unit could be installed in a small area and produce enough hydrogen for the fueling of the FCEBs which would potentially replace the conventional busses for this particular route. Furthermore, the environmental impact of the vehicles used will be minimized, because fuel-cell busses produce only water during their operation (instead of the pollutants produced by conventional vehicles), as a result of the use of hydrogen, and every year the production of 10,02 tn CO<sub>2</sub>, 44,9 kg NO<sub>x</sub> and 8,8 kg NO<sub>2</sub> will be avoided. In economic terms the company will have to invest about 1.400.000 € for the construction of the unit and 1.300.000 € for the purchase of the FCEBs, while it will save about 125.000 € yearly from the fossil fuels not used. Without changing the ticket prices, for the 25-year lifetime of the project, the investment seems profitable for the company. However, factors such as the increase in fossil fuel costs and the reduction in hydrogen production costs in the future will not be considered in this thesis.

## **Περιεχόμενα**

Περιεχόμενα Διαγραμμάτων .....	7
Περιεχόμενα Πινάκων .....	7
1.Εισαγωγή .....	8
2. Θεωρητικό υπόβαθρο .....	9
2.1 Το υδρογόνο ως χημικό στοιχείο .....	9
2.2 Το υδρογόνο ως καύσιμο .....	9
2.3 Κατηγοριοποίηση μεθόδων παραγωγής υδρογόνου .....	11
2.4 Μέθοδοι παραγωγής υδρογόνου [18] .....	12
2.4.1 Ηλεκτρολυτικές μέθοδοι .....	12
2.4.2 Θερμοχημικές μέθοδοι .....	13
2.4.3 Φωτοχημικές μέθοδοι.....	15
2.4.4 Ζυμώσεις .....	16
2.4.5 Αεριοποιήσεις και αναμορφώσεις.....	17
2.5 Συμπίεση υδρογόνου .....	20
2.5.1 Μηχανική συμπίεση .....	20
2.5.2 Μη Μηχανική Συμπίεση.....	21
2.6 Αποθήκευση υδρογόνου .....	22
2.7 Τεχνολογία κυψελίδας καυσίμου .....	23
2.8 Οχήματα τεχνολογίας κυψελίδας PEM.....	24
3. Μεθοδολογία .....	29
3.1 Εισαγωγή .....	29
3.2 Επιλογή του βέλτιστου οχήματος .....	30
3.3 HomerPro .....	31
3.3.1 Γενικά.....	31
3.3.2 Τρόπος λειτουργίας του HOMER .....	31
3.3.3 Ορισμός της εγκατάστασης στο HOMER.....	32
4.Αποτελέσματα .....	36
4.1 Φορτίο υδρογόνου .....	36
4.2 Φωτοβολταϊκά πάνελ.....	36
4.3 Μετατροπείς .....	40
4.4 Ηλεκτρόλυση .....	42
4.6 Συμπίεση .....	46
4.5 Δεξαμενές αποθήκευσης υδρογόνου .....	46
4.7 Συσσωρευτές Μόλυβδου – Οξέος.....	48
4.8 Οικονομική ανάλυση.....	51

5.Συζήτηση .....	56
6.Συμπεράσματα .....	58
6.1 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα .....	58
7.Βιβλιογραφία .....	59

## **Περιεχόμενα εικόνων**

Εικόνα 1:Δεξιά φλόγα προπανίου Αριστερά φλόγα υδρογόνου [69].....	10
Εικόνα 2: Ηλεκτρόλυση σε βιομηχανική κλίμακα [68] .....	12
Εικόνα 3: Φωτοκαταλύτη σε πειραματική διάταξη [70] .....	15
Εικόνα 4: Δεξαμενή ζύμωσης αποβλήτων φαγητού για παραγωγή υδρογόνου .....	16
Εικόνα 5: Εργοστάσιο αναμόρφωσης κάρβουνου (BBC) .....	17
Εικόνα 6: Μηχανικός συμπιεστής της εταιρίας HOWDEN.....	20
Εικόνα 7: Συμπιεστής μεταλλοϋδριδίων της Cyrus [66] .....	21
Εικόνα 8: Αρχή λειτουργίας κυψέλης καυσίμου PEM .....	24
Εικόνα 9: Mercedes Citaro Αστικού ΚΤΕΛ Χανίων .....	25
Εικόνα 10: Van Hool A330.....	26
Εικόνα 11: Solaris Urbino 12 Sasa Bolzano Italy.....	26
Εικόνα 12: Wrightbus VDL Pulsar FC .....	27
Εικόνα 13: Caetano H2.City Gold στην Κολωνία .....	27
Εικόνα 14: Λεωφορεία FCEB στον σταθμό ανεφοδιασμού BALLARD POWER .....	28
Εικόνα 15: Χάρτης της διαδρομής.....	29
Εικόνα 16: Καρτέλα HOME.....	32
Εικόνα 17: Καρτέλα LOAD .....	32
Εικόνα 18: Καρτέλα RESOURCES .....	33
Εικόνα 19: Τιμές ημερήσιας πυκνότητας ηλεκτρικής ισχύος Χανίων.....	33
Εικόνα 20: Καρτέλα COMPONENTS.....	33
Εικόνα 21: Σκαρίφημα εγκατάστασης.....	35
Εικόνα 22: Πλήκτρο έναρξης προσομοίωσης .....	35
Εικόνα 23: Καρτέλα ορισμού του απαιτούμενου φορτίου υδρογόνου .....	36
Εικόνα 24: Καρτέλα ορισμού τεχνικών χαρακτηριστικών των Φ/Β.....	37
Εικόνα 25: Πιθανοί χώροι εγκατάστασης Φ/Β.....	38
Εικόνα 26: Αποτελέσματα προσομοίωσης των Φ/Β σενάριο 1 .....	38
Εικόνα 27: Συνολική παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας ανά έτος .....	39
Εικόνα 28: Καρτέλα ορισμού τεχνικών χαρακτηριστικών του μετατροπέα .....	40
Εικόνα 29: Αποτελέσματα προσομοίωσης για τον μετατροπέα. ....	41
Εικόνα 30: Καρτέλα ορισμού τεχνικών χαρακτηριστικών της συσκευής ηλεκτρόλυσης .....	42
Εικόνα 31: Αποτελέσματα προσομοίωσης για την συσκευή ηλεκτρόλυσης.....	42
Εικόνα 32: Παραγωγή υδρογόνου ανά έτος .....	43
Εικόνα 33: Καρτέλα ορισμού του ηλεκτρικού φορτίου του συμπιεστή .....	46
Εικόνα 34: Καρτέλα ορισμού τεχνικών χαρακτηριστικών των δεξαμενών .....	47
Εικόνα 35: Αποτελέσματα προσομοίωσης για τις δεξαμενές .....	47
Εικόνα 36: Καρτέλα ορισμού τεχνικών χαρακτηριστικών των συσσωρευτών .....	48
Εικόνα 37: Αποτελέσματα προσομοίωσης για τους συσσωρευτές .....	48
Εικόνα 38: Καρτέλα SUMMARY.....	49

## **Περιεχόμενα Διαγραμμάτων**

Διάγραμμα 1: Κατανομή παγκόσμιου πρωτογενούς ενεργειακού αποθέματος 2018 [5] .....	8
Διάγραμμα 2: Θερμογόνος δύναμη διάφορων καυσίμων [11] .....	10
Διάγραμμα 3: Κατανομή παραγωγής υδρογόνου 2050 [22] .....	19
Διάγραμμα 4: Κατανομή παραγωγής υδρογόνου 2021[22] .....	19
Διάγραμμα 5: Εκπομπές CO <sub>2</sub> /kg H <sub>2</sub> ανά μέθοδο παραγωγής [18] .....	19
Διάγραμμα 6: Διάγραμμα ροής εγκατάστασης .....	50
Διάγραμμα 7: Αθροιστικές ΠΚΤΡ για σενάριο 1 .....	54
Διάγραμμα 8: Αθροιστικές ΠΚΤΡ για σενάριο 2 .....	55
Διάγραμμα 9: Αθροιστικές ΠΚΤΡ για σενάριο 3 .....	55

## **Περιεχόμενα Πινάκων**

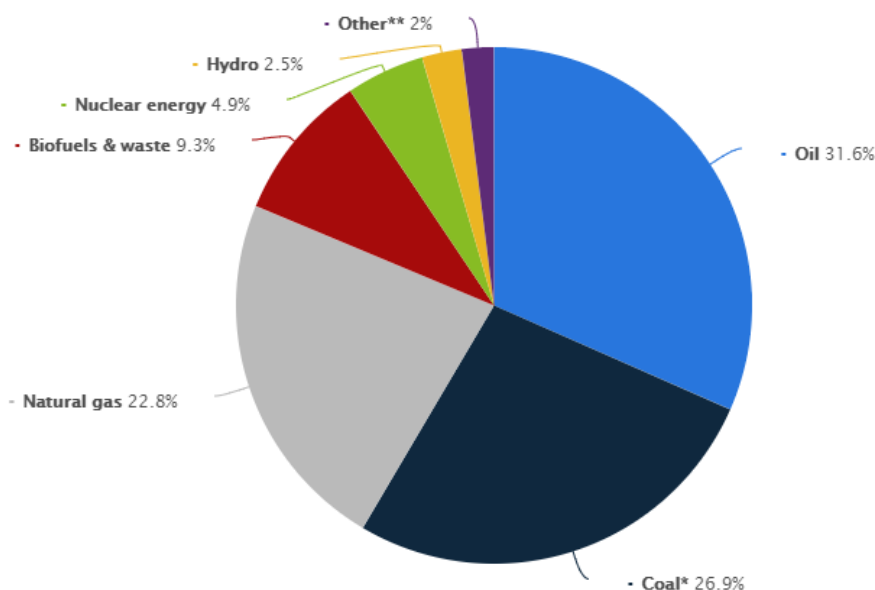
Πίνακας 1: Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα τεχνολογιών αναμόρφωσης .....	18
Πίνακας 2: Πίνακας σύγκρισης λεωφορείων .....	30
Πίνακας 3: LCOE/LCOH για κάθε σενάριο .....	45
Πίνακας 4: Διαστάσεις εξοπλισμού για κάθε σενάριο .....	49
Πίνακας 5: Πίνακας εύρεσης καθαρού παρόντος κόστους για το σενάριο 1 .....	51
Πίνακας 6: Πίνακας εύρεσης καθαρού παρόντος κόστους για το σενάριο 2 .....	51
Πίνακας 7: Πίνακας εύρεσης καθαρού παρόντος κόστους για το σενάριο 3 .....	51
Πίνακας 8: Πίνακας υπολογισμού NPV για το σενάριο 1 .....	53
Πίνακας 9: Πίνακας υπολογισμού NPV για το σενάριο 2 .....	53
Πίνακας 10: Πίνακας υπολογισμού NPV για το σενάριο 3 .....	54
Πίνακας 11: Κριτήρια αξιολόγησης σεναρίων .....	55



## 1.Εισαγωγή

Στον 21<sup>ο</sup> αιώνα οι ενεργειακές ανάγκες στον τομέα των μεταφορών ικανοποιούνται στο μεγαλύτερο ποσοστό τους από ορυκτά καύσιμα. Η αμόλυβδη βενζίνη, το πετρέλαιο κίνησης και το φυσικό αέριο είναι τα καύσιμα που χρησιμοποιούνται στα περισσότερα αυτοκίνητα ιδιωτικής χρήσης αλλά και στα μέσα μαζικής μεταφοράς. Ωστόσο, η χρήση αυτών αποτελεί ένα από τα μεγαλύτερα περιβαλλοντικά προβλήματα της σύγχρονης εποχής, καθώς κατά την καύση τους παράγονται αέρια που συμβάλλουν στο φαινόμενο του θερμοκηπίου ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{N}_2\text{O}$ ) και άλλα τοξικά παραπροϊόντα ( $\text{CO}$ ,  $\text{NO}_x$ ,  $\text{SO}_x$ ). Αξίζει να αναφερθεί ότι στον τομέα των μεταφορών καταναλώνεται το 40% των συνολικών αποθεμάτων των ορυκτών καυσίμων [1] και ευθύνεται για το 23% των συνολικών εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου [2].

Επιπλέον, παρόλο που η ταχύτατη εξέλιξη της τεχνολογίας έχει αναβαθμίσει το επίπεδο ζωής, αυτό συνοδεύεται συνήθως και από αυξημένες ενεργειακές καταναλώσεις, κάτι που σε συνδυασμό με την αύξηση του πληθυσμού της γης οδηγεί στην ραγδαία αύξηση των παγκόσμιων ενεργειακών αναγκών. Για παράδειγμα, το 2020 καταναλώθηκαν 27.000 TWh παγκοσμίως, ενώ υπολογίζεται από την παγκόσμια επιτροπή ενέργειας ότι μέχρι το 2040 η αντίστοιχη κατανάλωση θα αγγίζει τις 40.000 TWh ενέργειας [3]. Έτσι τα ορυκτά καύσιμα καθίστανται μη βιώσιμα, αν αναλογιστεί κανείς το γεγονός ότι αφενός δεν ανανεώνονται, αφετέρου τα αποθέματά τους είναι περιορισμένα. Αν και δεν υπάρχει ακριβής πρόβλεψη για το πότε ακριβώς τα αποθέματα θα εξαντληθούν, εκτιμάται όμως ότι με τους υπάρχοντες ρυθμούς κατανάλωσης θα διαρκέσουν μέχρι το 2060 [4]. Στο διάγραμμα 1 παρουσιάζεται η κατανομή του παγκόσμιου πρωτογενούς ενεργειακού αποθέματος για το έτος 2018.



Διάγραμμα 1:Κατανομή παγκόσμιου πρωτογενούς ενεργειακού αποθέματος 2018 [5]

Στο διάγραμμα 1 φαίνεται ότι το πετρέλαιο, το φυσικό αέριο και ο λιγνίτης είναι τα πιο διαδεδομένα καύσιμα για την παραγωγή ενέργειας, καταλαμβάνοντας αθροιστικά ποσοστό της τάξεως του 81,3 %. Συνεπώς, για να επέλθει ανεξαρτητοποίηση από τα ορυκτά καύσιμα και ελαχιστοποίηση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος που αυτά αφήνουν στον πλανήτη, πρέπει να αναπτυχθούν και να αξιοποιηθούν τεχνολογίες οι οποίες θα είναι βιώσιμες και

αιεφόρες ώστε η παγκόσμια οικονομία να στραφεί γύρω από την ανάπτυξη τους. Αν και τα επόμενα 9 χρόνια αναμένεται αύξηση στην χρήση Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας για την παραγωγή ενέργειας σε ποσοστό τουλάχιστον 32% σύμφωνα με τις οδηγίες της ευρωπαϊκής ένωσης [6], ένα καύσιμο το οποίο μπορεί να υποκαταστήσει την χρήση των ορυκτών καυσίμων και ειδικότερα στον τομέα των μεταφορών είναι το υδρογόνο. Το υδρογόνο είναι ένα καθαρό καύσιμο το οποίο όταν χρησιμοποιείται σε κυψελίδα καυσίμου παράγει σαν απόβλητο μόνο νερό. Μπορεί να παραχθεί με ποικίλους τρόπους όπως από το φυσικό αέριο, μέσω πυρηνικής ενέργειας και βιομάζα. Ωστόσο για να μπορεί να θεωρηθεί βιώσιμο, με μηδενικό περιβαλλοντικό αποτύπωμα πρέπει να έχει παραχθεί με τεχνολογίες οι οποίες δεν εκπέμπουν καθόλου ρύπους. Στην συγκεκριμένη εργασία εξετάζεται η παραγωγή υδρογόνου με χρήση ΑΠΕ και η χρήση του σαν καύσιμο το οποίο θα τροφοδοτεί λεωφορεία τα οποία είναι τεχνολογίας κυψελίδας καυσίμου (FCEB).

## **2. Θεωρητικό υπόβαθρο**

### **2.1 Το υδρογόνο ως χημικό στοιχείο**

Το υδρογόνο συμβολίζεται με το γράμμα H, είναι το ελαφρύτερο ατομικό στοιχείο, βρίσκεται στην πρώτη θέση του περιοδικού πίνακα και έχει ατομικό αριθμό 1. Σε κανονικές συνθήκες θερμοκρασίας και πίεσης (STP) είναι αέριο διατομικής μορφής και έχει τύπο  $H_2$ . Είναι άοσμο, άχρωμο, μη τοξικό και ιδιαίτερα εύφλεκτο. Το μονοατομικό υδρογόνο είναι το επικρατέστερο στοιχείο στο σύμπαν αποτελώντας το 75% της συνολικής βαρυατομικής μάζας [7]. Λόγω της ύπαρξης ενός ηλεκτρονίου στην εξωτερική στοιβάδα στο μόριό του, το υδρογόνο έχει την ιδιότητα να σχηματίζει γρήγορα ομοιοπολικές ενώσεις με τα περισσότερα αμέταλλα, αρκετά μέταλλα, καθώς και μεταλλοειδή. Εξ αιτίας αυτού το περισσότερο υδρογόνο στη Γη υπάρχει σε μοριακές μορφές, όπως στη μορφή του νερού ή στη μορφή οργανικών ενώσεων όπως οι υδρογονάνθρακες. Ωστόσο η πυκνότητα του υδρογόνου είναι περίπου το 7% της πυκνότητας του αέρα σε συνθήκες περιβάλλοντος, και συνεπώς έχει την ιδιότητα να διαχέεται με μεγάλη ευκολία, καθιστώντας έτσι την αποθήκευση του πολύ δύσκολη αφού έχει την τάση να διαφεύγει από τις δεξαμενές.

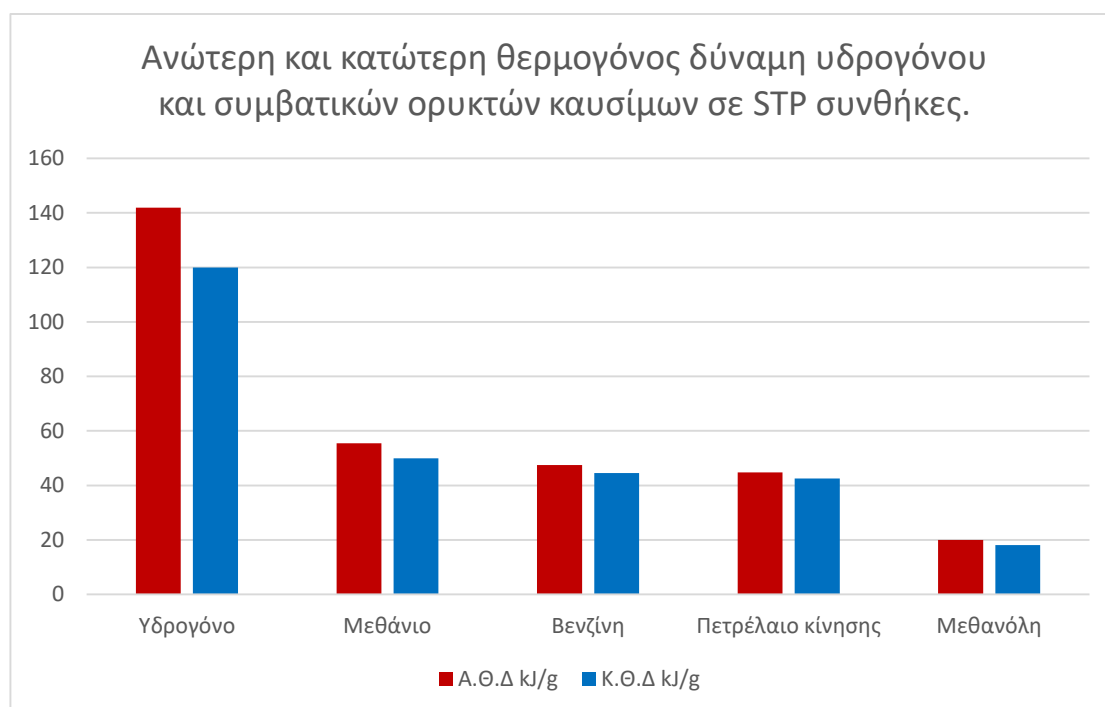
### **2.2 Το υδρογόνο ως καύσιμο**

Το υδρογόνο δεν είναι πρωτογενής πηγή ενέργειας, αλλά μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως φορέας ενέργειας και συνεπώς να υποκαταστήσει τα ορυκτά καύσιμα σε μια μεγάλη γκάμα εφαρμογών [8]. Η παραγωγή ενέργειας με χρήση υδρογόνου μπορεί να επιτευχθεί με διάφορους τρόπους. Αυτοί είναι [9]:

- Απευθείας καύση (Direct Combustion)
- Καταλυτική καύση (Catalytic Combustion)
- Παραγωγή ατμού (Steam Production)
- Λειτουργία κυψελίδων καυσίμου (Fuel Cell Operation)

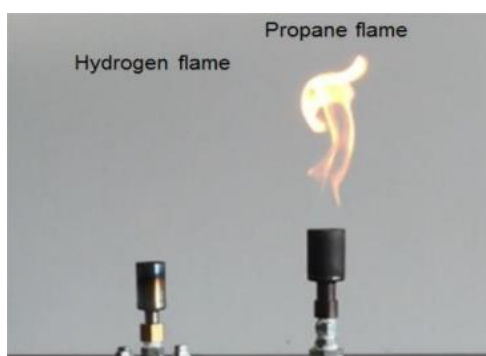
Από τις παραπάνω μεθόδους η χρήση υδρογόνου σε κυψελίδες καυσίμου είναι η πιο αποδοτική και καθαρή τεχνολογία για την αξιοποίηση του ενεργειακού περιεχομένου του υδρογόνου [10]. Σε μια κυψελίδα καυσίμου, οξυγόνο και υδρογόνο ενώνονται με μια καταλυτική ηλεκτροχημική αντίδραση όπου παράγεται ηλεκτρικό ρεύμα, νερό και θερμότητα. Η συγκεκριμένη διεργασία μπορεί να επιτύχει αποδόσεις κοντά στο 85% έως και δύο με τρεις φορές καλύτερες σε σύγκριση με τις παραδοσιακές μηχανές εσωτερικής καύσης οι οποίες κυμαίνονται κοντά στο 30% [10], ενώ δεν παράγει ρύπους. Στο παρακάτω

διάγραμμα παρουσιάζεται η ανώτερη και κατώτερη θερμογόνος δύναμη του Υδρογόνου σε σύγκριση με τα πιο διαδεδομένα ορυκτά καύσιμα[11].



Διάγραμμα 2:Θερμογόνος δύναμη διάφορων καυσίμων [11]

Η μετάβαση συνεπώς σε ένα μέλλον το οποίο θα έχει επίκεντρο την χρήση υδρογόνου ως καύσιμο σε αυτοκίνητα και μέσα μαζικής μεταφοράς, μπορεί να συμβάλει στην μείωση των εκπομπών άνθρακα στον τομέα των μεταφορών μακροπρόθεσμα [12].



Εικόνα 1:Δεξιά φλόγα προπάνιου Αριστερά φλόγα υδρογόνου [69]

Ωστόσο, η μεγαλύτερη ανησυχία απέναντι στην χρήση του υδρογόνου αφορά κυρίως θέματα ασφάλειας, αξίζει όμως να σημειωθεί ότι ανάλογος σκεπτικισμός υπήρξε και στα πρώτα χρόνια της χρήσης της βενζίνης και του πετρελαίου κίνησης [13]. Όπως προαναφέρθηκε το αέριο υδρογόνο είναι μη τοξικό, περιβαλλοντικά ασφαλές, και το γεγονός ότι διαχέεται γρήγορα μειώνει το ρίσκο δημιουργίας φλόγας. Ως εκ τούτου, είναι εξαιρετικά απίθανο να υπάρξει έκρηξη σε ανοιχτούς χώρους[15]. Παρά όλα αυτά όταν καίγεται παράγει μια αδιαφανή φλόγα (εικόνα 1) και για αυτό πρέπει να λαμβάνονται περισσότερα μέτρα προστασίας. Το υδρογόνο έχει γρήγορη ταχύτητα φλόγας (2,37 m/s) και λιγότερη ενέργεια ανάφλεξης (0,02 mJ) σε σχέση με την βενζίνη (0,24 mJ) ή το μεθάνιο (0,29 mJ) [14]. Η θερμοκρασία αυτανάφλεξης του υδρογόνου (585 °C) είναι αρκετά μεγαλύτερη από αυτή της βενζίνης (228-501 °C) και του φυσικού αερίου (540 °C) [14]. Εφόσον το υδρογόνο είναι 14

φορές ελαφρύτερο από τον αέρα, ανυψώνεται στην ατμόσφαιρα σε ταχύτητα 20 m/s όταν ελευθερώνεται [13]. Συνεπώς το υδρογόνο είναι συνήθως ασφαλέστερο σε σχέση με άλλα καύσιμα σε περιπτώσεις διαρροών.

### 2.3 Κατηγοριοποίηση μεθόδων παραγωγής υδρογόνου

Αέριο υδρογόνο μπορεί να παραχθεί από διάφορες πηγές και με αρκετές διαφορετικές μεθόδους. Όπως αναφέρθηκε και στην παράγραφο 2.1 το υδρογόνο βρίσκεται στον πλανήτη σε χημικές ενώσεις όπως το νερό, υδρογονάνθρακες, υδρίδια διάφορων ειδών και σε μεγάλη ποικιλία οργανικών μετάλλων. Το καύσιμο υδρογόνο πρέπει δηλαδή να παράγεται από ενώσεις που περιέχουν υδρογόνο όπως ορυκτά καύσιμα, νερό, βιομάζα ή άλλες βιολογικές πηγές. Για πάνω από 100 χρόνια, το υδρογόνο είχε χρησιμότητα κυρίως για διάφορες βιομηχανικές εφαρμογές [16].

Αν και υπάρχει πληθώρα τρόπων παραγωγής υδρογόνου, δεν θεωρούνται όλοι φιλικόι προς το περιβάλλον. Ανάλογα με τον τρόπο παραγωγής το υδρογόνο κατατάσσεται στις εξής κατηγορίες:

- Πράσινο  $H_2$ : Υδρογόνο από ηλεκτρόλυση με ενέργεια από ΑΠΕ
- Κίτρινο  $H_2$ : Υδρογόνο από ηλεκτρόλυση με ενέργεια από υβριδικά συστήματα ΑΠΕ και ορυκτών καυσίμων
- Ροζ  $H_2$ : Υδρογόνο από ηλεκτρόλυση με χρήση πυρηνικής ενέργειας
- Μπλε  $H_2$ : Υδρογόνο από αναμόρφωση φυσικού αερίου με χρήση συστημάτων ανάκτησης και αποθήκευσης του παραγόμενου άνθρακα.
- Γκρι  $H_2$ : Υδρογόνο από αναμόρφωση φυσικού αερίου χωρίς χρήση συστημάτων ανάκτησης και αποθήκευσης του παραγόμενου άνθρακα.
- Γαλάζιο  $H_2$ : Υδρογόνο από πυρόλυση μεθανίου.
- Καφέ/Μαύρο  $H_2$ : Υδρογόνο από αεριοποίηση άνθρακα. [17]

Το πιο καθαρό υδρογόνο θεωρείται το πράσινο καθώς η μέθοδος παραγωγής του δεν παράγει καθόλου ρύπους. Το μπλε υδρογόνο, αν και υπάρχουν μέσα για την ελαχιστοποίηση των ρύπων κατά την παραγωγή του, δεν μπορεί να θεωρηθεί εξ ολοκλήρου καθαρή μέθοδος. Τα γκρι, γαλάζιο, καφέ και κίτρινο δεν θεωρούνται καθαρές μέθοδοι, καθώς κατά την διαδικασία της παραγωγής  $H_2$  παράγονται και ρύποι όπως μονοξείδιο του άνθρακα και διοξείδιο του άνθρακα. Τέλος το ροζ υδρογόνο είναι αμφιλεγόμενο ως προς την καθαρότητα του, καθώς αν και η πυρηνική ενέργεια δεν παράγει ρύπους, τα πυρηνικά απόβλητα απαιτούν ειδική διαχείριση ώστε να μην μολύνουν το περιβάλλον αφού θεωρούνται ξεχωριστή κατηγορία αποβλήτων.

## 2.4 Μέθοδοι παραγωγής υδρογόνου [18]

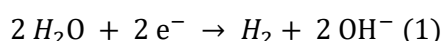
### 2.4.1 Ηλεκτρολυτικές μέθοδοι

#### Ηλεκτρόλυση

Αποτελεί την πιο βασική μέθοδο παραγωγής καθαρού  $H_2$  και η συχνότητα της χρήσης της αναμένεται να αυξηθεί στο άμεσο μέλλον. Η ηλεκτρόλυση του νερού βασίζεται στην κίνηση των ηλεκτρονίων η οποία προκαλείται από ένα εξωτερικό κύκλωμα. Μια πηγή ηλεκτρικής ενέργειας συνεχούς ρεύματος συνδέεται με δύο ηλεκτρόδια ή δύο πλάκες (συνήθως κατασκευασμένες από ένα αδρανές μέταλλο όπως η πλατίνα ή το ιρίδιο) που τοποθετούνται στο νερό. Το υδρογόνο θα εμφανιστεί στην κάθοδο (όπου τα ηλεκτρόνια εισέρχονται στο νερό) και το οξυγόνο θα εμφανιστεί στην άνοδο. Η απόδοση μιας μονάδας ηλεκτρόλυσης υπολογίζεται βάσει της ιδανικής και πραγματικής ενέργειας που χρειάζεται για να λάβει χώρα η αντίδραση της ηλεκτρόλυσης:



Εικόνα 2: Ηλεκτρόλυση σε βιομηχανική κλίμακα [68]



Καταλύτες χρησιμοποιούνται για να αυξηθεί η πυκνότητα του ρεύματος και ο ρυθμός της ηλεκτρόλυσης. Ο πιο διαδεδομένος καταλύτης είναι η πλατίνα και τοποθετείται στην επιφάνεια των ηλεκτροδίων της μονάδας ηλεκτρόλυσης.

Το νερό που χρησιμοποιείται στις μονάδες πρέπει να έχει υψηλή καθαρότητα καθώς παρουσιάζουν μεγάλη ευαισθησία σε άλατα και μέταλλα. Για αυτό το λόγο όταν κρίνεται απαραίτητο διαδικασίες αφαλάτωσης και απομετάλλωσης λαμβάνουν χώρα πριν το νερό εισαχθεί στην μονάδα.

Στην συγκεκριμένη εργασία χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος της ηλεκτρόλυσης με χρήση Φ/Β. Πρόκειται για την κλασική ηλεκτρόλυση, με την διαφορά ότι η ενέργεια που απαιτείται για την διεργασία καλύπτεται από Φ/Β. Εκτός από Φ/Β το σύστημα περιέχει διάλυο συνεχούς ρεύματος, πλέγμα εναλλασσόμενου ρεύματος, μπαταρίες λιθίου, ηλεκτρολύτη και φιάλες αποθήκευσης υδρογόνου. Αποτελεί μια από τις πιο ακριβές μεθόδους παραγωγής, όντας 25 φορές πιο ακριβή από εναλλακτικές ορυκτών καυσίμων. Ωστόσο το κόστος αυτής μειώνεται συνεχώς και ο παραπάνω συντελεστής αναμένεται να φτάσει τις 6 φορές [19]. Ταυτόχρονα, είναι η μόνη μέθοδος που έχει μηδενικό περιβαλλοντικό αποτύπωμα και μπορεί να εφαρμοστεί τόσο σε μικρή όσο και βιομηχανική κλίμακα.

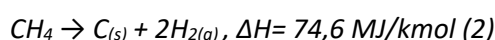
### **Ηλεκτρόλυση σε υψηλή θερμοκρασία**

Η μέθοδος αυτή αποτελεί μια μέθοδο ηλεκτρόλυσης κατά την οποία ατμός διαχωρίζεται σε  $H_2$  και  $O_2$  με θερμοκρασίες ανάμεσα στους 700 και 1000 °C. Συγκεκριμένα το νερό μετατρέπεται σε ατμό χρησιμοποιώντας θερμική ενέργεια. Το σύστημα θερμαίνεται από τον ατμό και από διάφορα συστήματα ανάκτησης θερμότητας. Έτσι η απαίτηση σε ηλεκτρική ενέργεια για αυτό τον τύπο ηλεκτρόλυσης είναι χαμηλότερος σε σχέση με άλλες μεθόδους. Ένα άλλο πλεονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι ότι έχει την δυνατότητα να μην παράγει καθόλου αέρια του θερμοκηπίου όταν η πηγή που παρέχει θερμότητα στο σύστημα είναι καθαρή (ηλιοθερμική, γεωθερμική, πυρηνική). Ωστόσο λόγω της απαίτησης υψηλών θερμοκρασιών ο εξοπλισμός του συστήματος έχει ειδικές προδιαγραφές για να επιτευχθεί αποτελεσματική παραγωγή υδρογόνου. Αυτό αποτελεί και την μεγαλύτερη δυσκολία στην εφαρμογή αυτής της μεθόδου.

#### **2.4.2 Θερμοχημικές μέθοδοι**

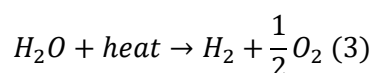
##### **Αποσύνθεση τόξου πλάσματος**

Το πλάσμα είναι η κατάσταση της ύλης στην οποία αυτή δεν έχει συγκεκριμένο όγκο και σχήμα, ενώ τα ηλεκτρικά φορτισμένα σωματίδια βρίσκονται ελεύθερα και όχι σε μοριακούς δεσμούς. Λόγω αυτών των σωματιδίων το πλάσμα έχει την ιδιότητα να χρησιμοποιείται για την δημιουργία ηλεκτρικού ρεύματος μέτριας ή υψηλής τάσης. Το φυσικό αέριο μπορεί να διασπαστεί σε υδρογόνο και άνθρακα (τέφρα) ως αποτέλεσμα της θερμικής δραστηριότητας του πλάσματος. Ο άνθρακας συλλέγεται σε στερεή φάση ενώ το υδρογόνο σε αέρια. Η αντίδραση αποσύνθεσης του μεθανίου περιγράφεται ως:



##### **Θερμική διάσπαση νερού (θερμόλυση)**

Μια διαδικασία κατά την οποία το νερό διασπάται στα άτομά του με την επίδραση θερμότητας. Η αντίδραση θερμόλυσης γράφεται ως εξής:



Για την επίτευξη του επιθυμητού βαθμού διάσπασης η αντίδραση απαιτεί μια πηγή θερμότητας η οποία έχει την δυνατότητα να παρέχει θερμοκρασίες μεγαλύτερες των 2500 K. Για παράδειγμα στους 3000 K και πίεση μίας ατμόσφαιρας ο βαθμός διάσπασης είναι περίπου 64%. Επιπλέον πρόκληση στην συγκεκριμένη μέθοδο αποτελεί η μέθοδος διαχωρισμού του  $H_2$  και του  $O_2$ . Η διαδικασία γίνεται με την χρήση ημιπερατών μεμβρανών οι οποίες λειτουργούν σε θερμοκρασίες μέχρι 2500 K. Συνεπώς μετά την αντίδραση το μείγμα των προϊόντων πρέπει να ψυχθεί πριν ξεκινήσει η διαδικασία διαχωρισμού.

Όλα τα παραπάνω συντελούν ώστε αυτή η διαδικασία να χρειάζεται αρκετά μεγάλα ποσά ενέργειας. Για αυτό η εν λόγω μέθοδος βρίσκεται ακόμα σε πειραματικό στάδιο, όπου ηλιακή ενέργεια χρησιμοποιείται για την κάλυψη των ενεργειακών απαιτήσεων.

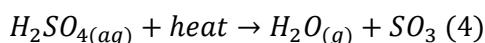
### Θερμοχημική διάσπαση νερού

Παρόμοια με την προηγούμενη μέθοδο, με την διαφορά ότι στην συγκεκριμένη περίπτωση γίνεται αξιοποίηση θερμοχημικών κύκλων για την διάσπαση του νερού. Οι θερμοχημικοί κύκλοι συνδυάζουν πηγές θερμότητας σε συνδυασμό με χημικές αντιδράσεις για την επίτευξη της διάσπασης του νερού στα άτομα που το αποτελούν. Το μεγαλύτερο προτέρημα αυτής της μεθόδου είναι πως δεν χρειάζεται κατάλυση για την επίτευξη των χημικών αντιδράσεων. Εκτός του νερού, όλα τα χημικά που χρησιμοποιούνται στον θερμοχημικό κύκλο μπορούν να ανακυκλωθούν. Άλλα προτερήματα είναι:

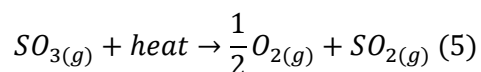
1. Δεν χρειάζονται μεμβράνες διαχωρισμού  $O_2$ - $H_2$  όπως στην θερμόλυση
2. Οι αντιδράσεις απαιτούν σχετικά χαμηλότερες θερμοκρασίες- μεταξύ 600 K και 1200 K
3. Μικρή μέχρι μηδενική απαίτηση σε ηλεκτρική ενέργεια

Ένας από τους πιο διαδεδομένους κύκλους είναι ο κύκλος S-I (θείου ιωδίου) και περιγράφεται ως εξής:

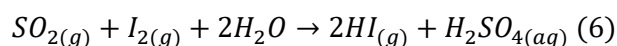
1. Αρχικά υγρό θειικό οξύ ( $H_2SO_4$ ) διασπάται με την επίδραση θερμότητας στους 300 – 500°C, σε αέριο  $H_2O$  και  $SO_3$ :



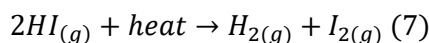
2. Στην συνέχεια τα παραγόμενα αέρια διαχωρίζονται και θερμαίνονται στους 800-900 °C. Έπειτα το αέριο  $SO_3$  αποσυντίθεται θερμικά σε αέριο  $SO_2$  σύμφωνα με την αντίδραση:



3. Το αέριο  $SO_2$  υφίσταται μια εξώθερμη αστραπιαία αντίδραση σε χαμηλή θερμοκρασία με ιώδιο και νερό όπου παράγονται αέριο υδροϊώδιο και υγρό θειικό οξύ:



4. Τέλος το HI αποσυντίθεται θερμικά στους 425-450 °C σε αέριο  $H_2$  και  $I_2$  σύμφωνα με την αντίδραση:



Λόγω της απουσίας δευτερευόντων αντιδράσεων κατά την διάρκεια του κύκλου θείου-ιωδίου, είναι πολύ εύκολος ο διαχωρισμός και η επαναχρησιμοποίηση των στοιχείων των αντιδράσεων. Ωστόσο, λόγω των υψηλών απαιτήσεων των αντιδράσεων σε θερμότητα, σε συνδυασμό με την έλλειψη διαθέσιμων βιώσιμων πηγών θερμικής ενέργειας, η μέθοδος αυτή περιορίζεται σε πειραματικό επίπεδο.

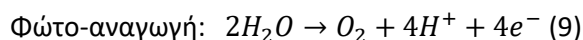
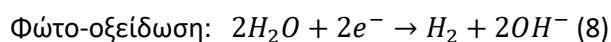
## Υβριδικοί θερμοχημικοί κύκλοι

Η τεχνολογία πίσω από αυτή την μέθοδο είναι ίδια με αυτή που αναφέρθηκε και παραπάνω στους θερμοχημικούς κύκλους. Ο όρος υβριδικοί προκύπτει από το γεγονός ότι συνδυάζεται τόσο θερμική όσο και ηλεκτρική ενέργεια για την κάλυψη των θερμικών αναγκών. Το κύριο πλεονέκτημα της μεθόδου είναι ότι έχει χαμηλότερες απαιτήσεις σε θερμική ενέργεια και έτσι μπορούν να χρησιμοποιηθούν και άλλες βιώσιμες πηγές θερμότητας εκτός από την ηλιακή, όπως καύση βιομάζας, πυρηνική θερμότητα, καύση αστικών στερεών απόβλητων κ.α. Ένας από τους πιο αποδοτικούς τέτοιους κύκλους είναι ο κύκλος Cu-Cl (χαλκού-χλωρίου).

### 2.4.3 Φωτοχημικές μέθοδοι

#### Φωτοκατάλυση

Η φωτοκατάλυση μετατρέπει την ενέργεια των φωτονίων (από ηλιακή ακτινοβολία) σε χημική ενέργεια (υδρογόνο). Η ενέργεια που μεταφέρεται από το φωτόνιο είναι ανάλογη με την ακτινοβολία και δίνεται από το γινόμενο της σταθεράς του Planck με την συχνότητα ( $E=h*\nu$ ). Όταν ένα φωτόνιο εισέλθει στον φωτοκαταλύτη, δημιουργείται ένα ηλεκτρικό δίπολο και το ηλεκτρικό φορτίο που περιέχει χρησιμοποιείται για να διασπάσει το νερό. Για να μπορέσει ένας φωτοκαταλύτης να διασπάσει το νερό και να παράγει υδρογόνο πρέπει να είναι κατάλληλα σχεδιασμένος ώστε να επιτυγχάνονται οι αντιδράσεις οξειδοαναγωγής στο νερό. Αυτές είναι :



Η φωτοκατάλυση είναι ακόμα μια μέθοδος η οποία περιορίζεται σε πειραματικό επίπεδο.

#### Φωτοηλεκτροχημική μέθοδος

Σε αυτή την περίπτωση χρησιμοποιούνται φωτοηλεκτροχημικές κυψελίδες (PEC). Αυτές απορροφούν το ηλιακό φως με παρόμοια τεχνολογία όπως ένα Φ/Β πλαίσιο. Περιέχουν ένα ή περισσότερα ζευγάρια ηλεκτροδίων όπου τουλάχιστον το ένα είναι ημιαγωγός. Το ηλεκτρικό ρεύμα που παράγεται χρησιμοποιείται για την οξειδοαναγωγή του νερού. Στην `πραγματικότητα ένα PEC συνδυάζει απορρόφηση ενέργειας και ηλεκτρόλυση νερού σε μια ενιαία μονάδα. Αυτό αποτελεί και το κυριότερο πλεονέκτημα αυτής της μεθόδου εν συγκρίσει με τις άλλες μεθόδους ηλεκτρόλυσης καθώς δεν απαιτείται ξεχωριστή πηγή ενέργειας.

#### Τεχνητή φωτοσύνθεση

Η τεχνητή φωτοσύνθεση είναι μια χημική διεργασία η οποία μιμείται την φυσική διεργασία της φωτοσύνθεσης για να μετατρέψει το ηλιακό φως σε νερό και το διοξείδιο του άνθρακα σε υδατάνθρακες και οξυγόνο. Στη συνέχεια μπορεί να παραχθεί υδρογόνο με ηλεκτρολυτική αποσύνθεση του νερού.

Η συγκεκριμένη τεχνολογία δεν είναι αρκετά ανεπτυγμένη για να χρησιμοποιηθεί σε βιομηχανική κλίμακα ακόμα όντας αμιγώς πειραματική, ωστόσο αξίζει να αναφερθεί καθώς έχει την δυνατότητα να μειώσει την παγκόσμια χρήση νερού και να υποστηρίξει την



Εικόνα 3:  
Φωτοκαταλύτη σε  
πειραματική διάταξη  
[70]



ανάπτυξη καθαρών ενεργειακών συστημάτων μελλοντικά, παράγοντας ηλεκτρισμό και υδρογόνο από φωτονική ενέργεια.

#### 2.4.4 Ζυμώσεις

##### **Ζύμωση σε σκοτάδι**

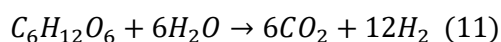
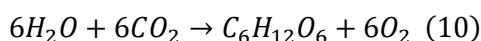
Στην συγκεκριμένη μέθοδο η βιοχημική ενέργεια που είναι αποθηκευμένη στην οργανική ύλη καταναλώνεται από μικροοργανισμούς για να εξαχθεί υδρογόνο απουσία φωτός. Η συγκεκριμένη μέθοδος μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εξαγωγή υδρογόνου από οργανικά απόβλητα και συμβάλλει στην σταθεροποίηση βιολογικών αποβλήτων. Για αυτό το λόγο αυτή η μέθοδος μπορεί να βρει ευρεία χρήση σε εγκαταστάσεις επεξεργασίας λυμάτων για παραγωγή υδρογόνου από τα λύματα.



Εικόνα 4: Δεξαμενή ζύμωσης αποβλήτων φαγητού για παραγωγή υδρογόνου

##### **Βιοφωτόλυση και φωτοζύμωση**

Στις συγκεκριμένες διεργασίες το υδρογόνο παράγεται μέσω του νερού, το οποίο λειτουργεί σαν αντιδρών σε βιοχημικές αντιδράσεις παραγωγής υδρογόνου. Στην βιοφωτόλυση, χρησιμοποιούνται κάποιοι φωτοευαίσθητοι μικροοργανισμοί, οι οποίοι λειτουργούν σαν βιολογικοί μετατροπείς σε ειδικά σχεδιασμένους βιοαντιδραστήρες. Μέσα στους αντιδραστήρες οι μικροοργανισμοί διασπούν το νερό σε υδρογόνο και οξυγόνο παρουσία φωτός. Οι προτιμότεροι και καταλληλότεροι μικροοργανισμοί είναι τα μικροφύκη καθώς είναι εύκολο να καλλιεργηθούν και επιπλέον έχουν την δυνατότητα να παράγουν υδρογόνο σε κλειστά συστήματα όπου η δυνατότητα εξαγωγής υδρογόνου είναι περιορισμένη. Το μεγάλο πλεονέκτημα της βιοφωτόλυσης είναι η δυνατότητα παραγωγής υδρογόνου σε από νερό σε υδάτινα περιβάλλοντα σε πρότυπες συνθήκες θερμοκρασίας και πίεσης. Ωστόσο βρίσκεται ακόμα σε πειραματικό στάδιο και δεν υπάρχει τεχνολογία για βιομηχανική χρήση. Οι γενικές αντιδράσεις παραγωγής υδρογόνου με την βοήθεια φωτο-ενεργοποιημένων ενζύμων είναι:



## 2.4.5 Αεριοποιήσεις και αναμορφώσεις

### Αεριοποίηση κάρβουνου

Στην αεριοποίηση, το κάρβουνο οξειδώνεται μερικώς με ατμό και οξυγόνο σε έναν αντιδραστήρα όπου επικρατούν συνθήκες υψηλής θερμοκρασίας και πίεσης και τα προϊόντα αυτής της αντίδρασης είναι κυρίως υδρογόνο ( $H_2$ ), μονοξείδιο του άνθρακα ( $CO$ ) αναμιγμένα με ατμό και διοξείδιο του άνθρακα  $CO_2$ . Το μίγμα αυτό ονομάζεται syngas. Το syngas στην συνέχεια υφίσταται μια ταχεία αντίδραση έτσι ώστε να αυξηθεί η παραγωγή υδρογόνου. Μέρος αυτού μπορεί να υποστεί περεταίρω επεξεργασία και να χρησιμοποιηθεί στην συνέχεια σε αεροστροβίλους για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

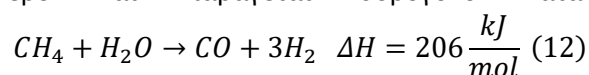


Εικόνα 5: Εργοστάσιο αναμόρφωσης κάρβουνου (BBC)

Βάσει της υπάρχουσας τεχνολογίας και των παγκοσμίων αποθεμάτων άνθρακα, αυτή η μέθοδος αποτελεί τον πιο οικονομικό και πρακτικό τρόπο παραγωγής υδρογόνου σε μεγάλη κλίμακα. Συγκρινόμενη με άλλες υπάρχουσες μεθόδους όπως η ηλεκτρόλυση, η αεριοποίηση είναι ο αποδοτικότερος τρόπος για την μετατροπή άνθρακα σε υδρογόνο. Ωστόσο, παρά την ύπαρξη των πλεονεκτημάτων αυτών η συγκεκριμένη μέθοδος, λόγω της μεγάλης περιεκτικότητας του κάρβουνου σε άνθρακα, παράγει το περισσότερο  $CO_2$  σε σχέση με όλες τις υπόλοιπες διαθέσιμες τεχνολογίες παραγωγής. Τεχνολογίες δέσμευσης και αποθήκευσης άνθρακα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την αντιμετώπιση του συγκεκριμένου προβλήματος.

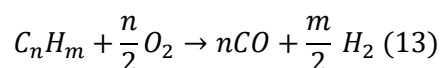
### Αναμόρφωση ορυκτών καυσίμων

Για την παραγωγή υδρογόνου υπάρχουν 3 κύριες τεχνολογίες αναμόρφωσης ορυκτών καυσίμων. Αυτές είναι η αναμόρφωση ατμού, η μερική οξείδωση και η αυτόθερμη αναμόρφωση. Κατά την αναμόρφωση ατμού, υδρογονάνθρακες και συνήθως μεθάνιο, αντιδρούν με νερό και παράγεται υδρογόνο κατά την αντίδραση:



Η αναμόρφωση φυσικού αερίου παράγει το περισσότερο υδρογόνο σήμερα. Περίπου 50% της παγκόσμιας ζήτησης υδρογόνου εξυπηρετείται από την αναμόρφωση του φυσικού αερίου, η οποία είναι και η πιο οικονομική μέθοδος σήμερα [67]. Η παραγωγή γίνεται με την τεχνολογία της αυτόθερμης αναμόρφωσης, η οποία λαμβάνει χώρα σε έναν αντιδραστήρα, ο οποίος περιέχει μια ζώνη καύσης και μια καθορισμένη κλίνη καταλύτη ανάμεσα σε ένα πυρίμαχο κέλυφος πίεσης. Κατά την διεργασία, ατμός και κάποιο αέριο που περιέχει υδρογόνο προστίθενται στον αντιδραστήρα και παράγεται μεθάνιο [20], το οποίο στην συνέχεια υπόκειται στην παραπάνω αντίδραση. Μέσω της μερικής οξείδωσης παράγεται

υδρογόνο λόγω της οξείδωσης υδρογονανθράκων ακολουθώντας την παρακάτω αντίδραση [21] :



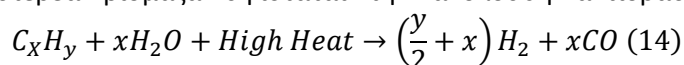
Τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα της κάθε μεθόδου παρουσιάζονται στον πίνακα 1:

*Πίνακας 1: Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα τεχνολογιών αναμόρφωσης*

Τεχνολογία	Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
Αναμόρφωση ατμού	Περισσότερο ανεπτυγμένη βιομηχανική διεργασία Καμία απαίτηση σε οξυγόνο Χαμηλή θερμοκρασία λειτουργίας Καλύτερη αναλογία H <sub>2</sub> /CO	Υψηλές εκπομπές αέριων ρύπων
Αυτόθερμη αναμόρφωση	Χαμηλότερη απαιτούμενη θερμοκρασία σε σχέση με την οξείδωση Μικρές απώλειες μεθανίου	Μικρή εμπειρία εφαρμογής Υψηλή απαίτηση σε αέρα/οξυγόνο
Μερική οξείδωση	Μικρή απαίτηση σε αποθείωση Καμία απαίτηση σε καταλύτες Μικρές απώλειες μεθανίου	Κακή αναλογία H <sub>2</sub> /CO Υψηλές θερμοκρασίες λειτουργίας Περίπλοκη διεργασία

### **Αεριοποίηση και αναμόρφωση βιομάζας**

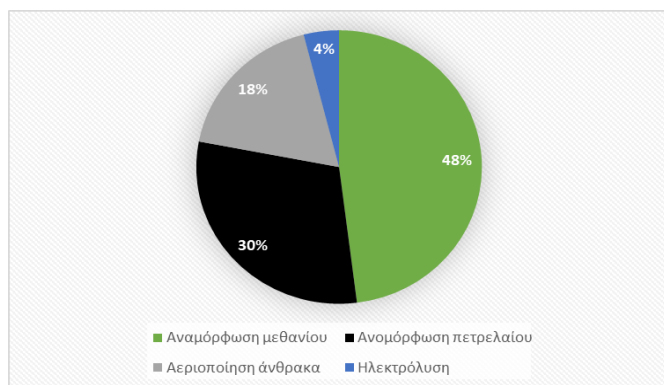
Στην συγκεκριμένη μέθοδο συνήθως γίνεται χρήση αποβλήτων ξύλου. Για την παραγωγή υδρογόνου, η στέρεα βιομάζα υφίσταται την ακόλουθη αντίδραση αεριοποίησης:



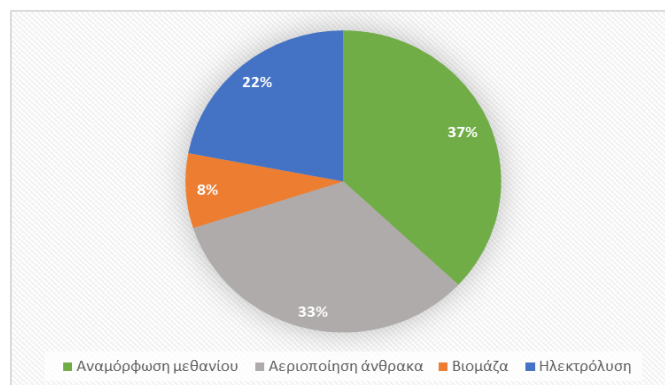
Οι πιο διαδεδομένοι τύποι αεριοποιητών που χρησιμοποιούνται σε αυτή την διαδικασία είναι σταθερής, κινούμενης και ρευστοποιημένης κλίνης. Ανάλογα με την ποσότητα της θερμότητας που παρέχεται η διεργασία ονομάζεται είτε αυτόθερμη είτε θερμική αεριοποίηση. Στην πρώτη η απαιτούμενη θερμότητα παρέχεται με μερική οξείδωση μέσα στον αεριοποιητή ενώ στη δεύτερη δίνεται από μια εξωτερική πηγή. Για την παραγωγή υδρογόνου από βιοκαύσιμα χρησιμοποιούνται θερμοχημικές αντιδράσεις

### **Σύνοψη**

Αν και οι μέθοδοι που υπάρχουν για την παραγωγή υδρογόνου είναι αρκετές, λίγες είναι αυτές οι οποίες βρίσκονται στο επιθυμητό επίπεδο εμπορικής χρήσης. Η αναμόρφωση φυσικού αερίου είναι αυτή την στιγμή η πιο διαδεδομένη μέθοδος ενώ ακολουθεί η αναμόρφωση πετρελαίου και η αεριοποίηση άνθρακα[22]. Το βασικό τους μειονέκτημα είναι ότι παράγουν μεγάλες ποσότητες αέριων ρύπων. Ωστόσο μέχρι το 2050 προβλέπεται ότι η αναμόρφωση πετρελαίου θα έχει εξαλειφθεί σαν μέθοδος ενώ η ηλεκτρόλυση θα καταλαμβάνει περίπου το ένα τέταρτο της συνολικής παραγωγής και η χρήση βιομάζας θα αποτελεί από τις κύριες μεθόδους παραγωγής[22]. Παρακάτω παρουσιάζονται δυο διαγράμματα με την τωρινή και την πιθανή μελλοντική κατανομή μεθόδων παραγωγής υδρογόνου[22].

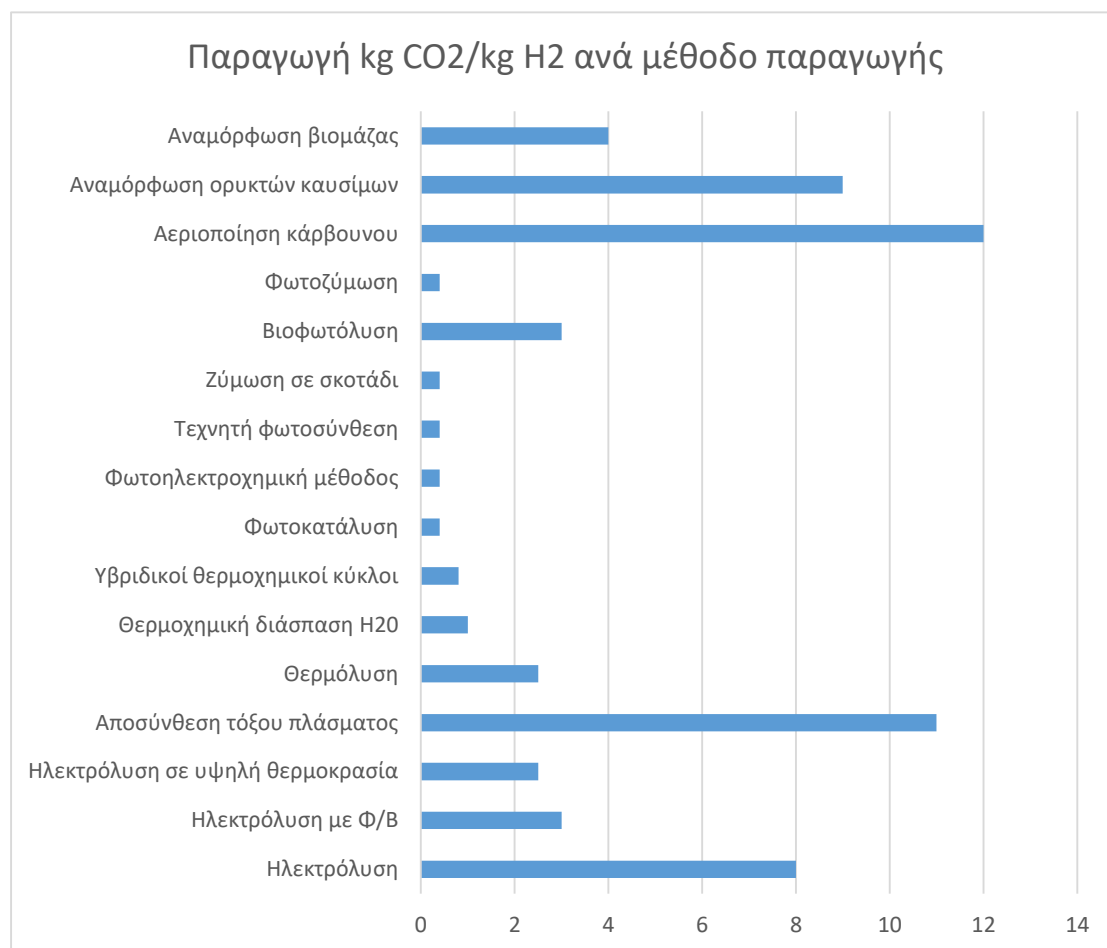


Διάγραμμα 4: Κατανομή παραγωγής υδρογόνου 2021[22]



Διάγραμμα 3: Κατανομή παραγωγής υδρογόνου 2050 [22]

Παρακάτω παρουσιάζεται διάγραμμα που απεικονίζει την παραγωγή CO<sub>2</sub>/kg H<sub>2</sub> για κάθε μέθοδο παραγωγής που αναφέρθηκαν.



Διάγραμμα 5: Εκπομπές CO<sub>2</sub>/kg H<sub>2</sub> ανά μέθοδο παραγωγής [18]

Οι μέθοδοι που περιλαμβάνουν αναμορφώσεις και αεριοποιήσεις είναι οι περισσότερες ρυπογόνες με την αεριοποίηση κάρβουνου να βρίσκεται στην κορυφή. Η μέθοδος της ηλεκτρόλυσης με Φ/Β έχει σχετικά μικρές εκπομπές CO<sub>2</sub> οι οποίες οφείλονται στην κατασκευή των Φ/Β. Είναι αξιοσημείωτο ότι υπάρχει πληθώρα μεθόδων οι οποίες έχουν

σχεδόν μηδενικές εκπομπές (Φωτοζύμωση, ζύμωση σε σκοτάδι, τεχνητή φωτοσύνθεση, φωτοκατάλυση), ωστόσο όλες βρίσκονται ακόμα σε πειραματικό επίπεδο και είναι αδύνατον να χρησιμοποιηθούν για την κάλυψη των αναγκών του προβλήματος που εξετάζεται.

Συνεπώς στην παρούσα εργασία επιλέχθηκε η μέθοδος της ηλεκτρόλυσης με Φ/Β καθώς είναι η μόνη μέθοδος αυτή την στιγμή η οποία μπορεί να καλύψει τις ενεργειακές ανάγκες οχημάτων και ταυτόχρονα να έχει χαμηλό περιβαλλοντικό αποτύπωμα. Ίσως στο μέλλον αυτή η μέθοδος να αντικατασταθεί με τεχνολογίες οι οποίες βρίσκονται σε πειραματικό στάδιο αλλά παρουσιάζουν μεγάλη προοπτική και καλύτερη βιωσιμότητα.

## 2.5 Συμπίεση υδρογόνου

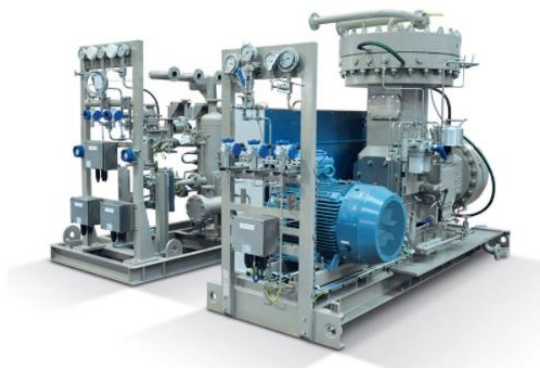
Τα δυο σημαντικότερα χαρακτηριστικά του υδρογόνου που το καθιστούν ιδανικό ως καύσιμο είναι η ειδική ενέργεια και η πυκνότητα ενέργειας που περιέχει [23]. Σε σύγκριση με τους υδρογονάνθρακες, το υδρογόνο έχει υψηλή ενεργειακή πυκνότητα ανά βάρος ( $30,12 \text{ kg/m}^3$ ), αλλά χαμηλή ενεργειακή πυκνότητα ανά όγκο ( $11,9 \text{ m}^3/\text{kg}$ )[24].

Για να μπορέσει το υδρογόνο να χρησιμοποιηθεί ως καύσιμο, πρέπει να αυξηθεί η πυκνότητά του. Για την επίτευξη αυτού, απαιτείται η συμπίεση του υδρογόνου. Το υδρογόνο εξέρχεται από την ηλεκτρόλυση σε πίεση 2-3 MPa, ωστόσο για να την χρήση σε οχήματα πρέπει να βρίσκεται σε πίεση τουλάχιστον 20 με 25 MPa. Όπως θα φανεί παρακάτω, συμπίεση μπορεί να γίνει είτε με μηχανικούς, είτε με μη μηχανικούς συμπιεστές.

### 2.5.1 Μηχανική συμπίεση

Κατά τη μέθοδο αυτή το υδρογόνο συμπιέζεται μέσω μηχανικών συμπιεστών παρόμοιων με αυτούς που χρησιμοποιούνται στην συμπίεση φυσικού αερίου. Οι μηχανικοί συμπιεστές αποτελούν τον πλέον διαδεδομένο τύπο συμπιεστή και η λειτουργία τους βασίζεται στην άμεση μετατροπή της μηχανικής ενέργειας σε ενέργεια συμπίεσης αερίου. Οι τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται περιλαμβάνουν:

- Συμπιεστές εμβόλου
- Συμπιεστές διαφράγματος
- Γραμμικούς συμπιεστές [26]
- Συμπιεστές υγρού



Εικόνα 6: Μηχανικός συμπιεστής της εταιρίας HOWDEN

Οι συμπιεστές που χρησιμοποιούνται κατά κόρων και συνεπώς εξετάστηκαν στην συγκεκριμένη εργασία είναι οι συμπιεστές εμβόλου.

Αυτοί λειτουργούν χρησιμοποιώντας διατάξεις εμβόλου κυλίνδρου. Το υδρογόνο εισέρχεται στους κυλίνδρους και στην συνέχεια συμπιέζεται από τα έμβολα [25]. Αποτέλεσμα είναι η επίτευξη υψηλότερης πίεσης αερίου. Η συγκεκριμένη μέθοδος συμπίεσης συνήθως επιτυγχάνει τιμές πίεσης υδρογόνου μεταξύ 20 και 45 MPa. Το γεγονός ότι είναι η πιο διαδεδομένη μέθοδος σημαίνει ότι υπάρχει μεγάλη εμπειρία στην χρήση και εφαρμογή της. Επίσης είναι μια απλή τεχνολογία και έτσι δεν απαιτείται εξειδικευμένο προσωπικό για την λειτουργία της.



### 2.5.2 Μη Μηχανική Συμπίεση

Παρά το γεγονός ότι οι μηχανικοί συμπιεστές χρησιμοποιούνται ευρέως σε διάφορες εφαρμογές υδρογόνου, έχουν το μειονέκτημα ότι απαιτούν πολύ μεγάλες ποσότητες ενέργειας για να συμπιέσουν το υδρογόνο σε αέρια ή υγρή κατάσταση. Το έργο συμπίεσης που παράγεται από τους μηχανικούς συμπιεστές αποτελεί περίπου το ένα τρίτο της συνολικής ενέργειας που αποθηκεύεται στο συμπιεσμένο αέριο που προκύπτει.

Συγκεκριμένα μειονεκτήματα που προκύπτουν από την λειτουργία των μηχανικών συμπιεστών μπορούν πιθανώς να λυθούν από εναλλακτικές μεθόδους συμπίεσης τις οποίες επιτυγχάνουν μη μηχανικοί συμπιεστές. Οι τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται περιλαμβάνουν:

- την κρυογενή συμπίεση,
- την ηλεκτροχημική συμπίεση,
- τους συμπιεστές προσρόφησης και
- τους συμπιεστές μέταλλο-υδριδίων.

Από τις παραπάνω μεθόδους αυτή που παρουσιάζει το μεγαλύτερο ενδιαφέρον, είναι η συμπίεση με χρήση μέταλλο-υδριδίων. Η αρχή λειτουργίας των εν λόγω συμπιεστών βασίζεται στις ιδιότητες των μεταλλικών υδριδίων. Σε αυτά, το υδρογόνο υπό συγκεκριμένες συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας είτε απορροφάται, είτε εκροφάται. Ο μηχανισμός της απορρόφησης του υδρογόνου εξαρτάται από το μέταλλο, καθώς η φύση του δεσμού τους μπορεί να είναι ιοντική, ομοιοπολική ή μεταλλική. Ουσιαστικά, το υδρογόνο αφού διασπαστεί



Εικόνα 7: Συμπιεστής μεταλλοϋδριδίων της Cyrus [66]

σε άτομα περνώντας μέσα από την επιφάνεια του υλικού, διεισδύει στο κρυσταλλικό πλέγμα του μετάλλου και καταλαμβάνει ακαθόριστο αριθμό συγκεκριμένων πλεγματικών θέσεων.

Οι δεξαμενές συνήθως έχουν σωληνοειδές σχήμα, καθώς διευκολύνει τις ανταλλαγές μάζας και θερμότητας και τοποθετούνται σε συστοιχίες δύο βαθμίδων. Ουσιαστικά μετά την έξοδο από την ηλεκτρόλυση, το υδρογόνο οδηγείται στην πρώτη βαθμίδα του συμπιεστή, όπου απορροφάται υπό χαμηλή θερμοκρασία και πίεση από τα μεταλλικά υδρίδια που βρίσκονται εντός της βαθμίδας αυτής. Μετά την πρόσδοση θερμότητας στη βαθμίδα αυτή, το υδρογόνο θα εξέλθει αυτής σε υψηλότερη πίεση και θα οδηγηθεί στην επόμενη βαθμίδα όπου θα επαναληφθεί η ίδια διαδικασία, μέχρι το υδρογόνο να φτάσει στην επιθυμητή πίεση. Μπορεί να γίνει αντιληπτό ότι οι διάφορες βαθμίδες του συμπιεστή πρέπει να περιέχουν διαφορετικής σύστασης μεταλλικά υδρίδια, τα οποία θα είναι κατάλληλα για συμπίεση μόνο στο εύρος πιέσεων και θερμοκρασιών που υπαγορεύεται από τις επιθυμητές συνθήκες της εκάστοτε βαθμίδας[47].

Συνοψίζοντας, η συμπίεση υδρογόνου είναι το αποτέλεσμα της διαδοχικής ψύξης και θέρμανσης της δομής του μέταλλο-υδριδίου και για αυτό οι συμπιεστές ελέγχονται σχεδόν εξ ολοκλήρου από τη μεταφορά θερμότητας.

Οι συμπιεστές αυτοί έχουν το πλεονέκτημα του να απουσιάζει από αυτούς οποιοδήποτε κινούμενο μέρος, κάτι το οποίο έχει ως αποτέλεσμα την σχεδόν αθόρυβη λειτουργία τους, γεγονός που τους καθιστά ιδανικούς για εγκατάσταση σε κατοικημένες περιοχές. Οι συμπιεστές αυτοί μπορούν να χαρακτηριστούν σαν θερμικοί συμπιεστές καθώς επιτυγχάνουν την συμπίεση αξιοποιώντας μόνο θερμοκρασιακές μεταβολές χωρίς να απαιτούν επιπλέον εξωτερική πρόσδοση ισχύος. Αν θεωρήσουμε ότι η απαιτούμενη θερμότητα για τη συμπίεση είναι η απορριπτόμενη θερμότητα κάποιας βιομηχανικής διεργασίας, μπορεί να γίνει αντιληπτό ότι οι ενεργειακές απαιτήσεις μιας τέτοιας συσκευής είναι ελάχιστες και περιορίζονται μόνο στην ενέργεια που απαιτείται για την λειτουργία διαφόρων ηλεκτροβαλβίδων. Τέλος, οι συσκευές αυτές δεν κάνουν χρήση κρίσιμων πρώτων υλών (critical raw materials), κάτι το οποίο οδηγεί στην περεταίρω μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων του συστήματος[47].

### **Σύνοψη**

Τόσο οι μηχανικοί όσο και οι μη μηχανικοί συμπιεστές μπορούν να αποφέρουν ικανοποιητική συμπίεση υδρογόνου. Για την συγκεκριμένη εργασία εξετάστηκε το ενδεχόμενο χρήσης είτε συμπιεστή μέταλλο-υδριδίων ή μηχανικό συμπιεστή εμβόλου. Αν και ο πρώτος εμφανίζει σημαντικά πλεονεκτήματα όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, η διαστασιολόγηση του είναι ιδιαίτερα απαιτητική και θα μπορούσε να αποτελεί ξεχωριστή επιστημονική εργασία. Συνεπώς επιλέχθηκε συμπιεστής εμβόλου καθώς είναι η πιο διαδεδομένη μέθοδος συμπίεσης αυτή τη στιγμή, ενώ η τεχνολογία της είναι απλή χωρίς να χρειάζεται ειδικευμένο προσωπικό για την λειτουργία της. Οι υπόλοιπες μέθοδοι συμπίεσης παρουσιάζουν ενδιαφέρον, ωστόσο, μια εκτεταμένη αναφορά σε αυτές ξεφεύγει από τις ανάγκες τις εργασίας και συνεπώς δεν εξετάστηκαν.

## **2.6 Αποθήκευση υδρογόνου**

Οι διεργασίες αποθήκευσης μπορούν να εκτελεσθούν με:

- Συμπίεση
- Υγροποίηση
- Φυσική αποθήκευση σε υδρίδια
- Χημική αποθήκευση σε υδρίδια

Οι μέθοδοι χωρίζονται ανάμεσα σε φυσικές αποθηκευτικές μεθόδους (συμπίεση, υγροποίηση, κρυσσυμπίεση) και σε χημικές (μεταλλικά υδρίδια, χημικά υδρίδια).

### **Αποθήκευση με συμπίεση**

Είναι η πιο διαδεδομένη μέθοδος αποθήκευσης σήμερα. Το υδρογόνο συμπιέζεται και αποθηκεύεται σε δεξαμενές, χρησιμοποιώντας μεθόδους συμπίεσης όπως αναλύθηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο. Οι τιμές πίεσης στην αποθήκευση του υδρογόνου τυπικά ποικίλουν μεταξύ 20 και 25 MPa. Βέβαια ο στόχος για το μέλλον είναι η επίτευξη πιέσεων 70 MPa που είναι η απαιτούμενη πίεση για την λειτουργία των συμβατικών Ι.Χ τα οποία χρησιμοποιούν υδρογόνο ως καύσιμο. Ωστόσο για βαρέα οχήματα όπως λεωφορεία η πίεση που απαιτείται κυμαίνεται μεταξύ 30 και 35 MPa γεγονός που συμβάλλει θετικά στην εμπορική εφαρμογή τους βραχυπρόθεσμα.

### **Υγροποίηση**

Το υδρογόνο μπορεί να αποθηκευτεί σε υγρή μορφή, όντας μη διαβρωτικό. Οι δεξαμενές οι οποίες μπορούν να αποθηκεύσουν το υδρογόνο ως συμπιεσμένο υγρό το διατηρούν σε

πυκνότητα (0,070 kg/L) σε σύγκριση με τις δεξαμενές συμπιεσμένου αερίου (0,030 kg/L) [27]. Συνεπώς, το κύριο πλεονέκτημα της αποθήκευσης με υγροποίηση είναι η πυκνότητα του υγρού και ως εκ τούτου την αποθήκευση περισσότερης ενέργειας στον ίδιο όγκο [28]. Ωστόσο η υγροποίηση και η διατήρηση του υδρογόνου σε αυτή την κατάσταση απαιτεί κρυογονικές θερμοκρασίες, κάτω από τους  $-253^{\circ}\text{C}$  [29], ενώ η δεξαμενή αποθήκευσης πρέπει να είναι θερμικά μονωμένη και επιπλέον πρέπει να διατηρεί κατάσταση κενού στο εσωτερικό της [30].

Για αυτόν τον λόγο με την σημερινή κατάσταση της τεχνολογίας δημιουργούνται σημαντικές δυσκολίες για να μπορέσει αυτή η μέθοδος να είναι βιώσιμη:

- Λόγω των πολύ χαμηλών θερμοκρασιών που απαιτούνται, περίπου το 30 με 33% της συνολικής ενέργειας που μπορεί να δώσει το υδρογόνο χρησιμοποιείται για την υγροποίηση [30].
- Τα υλικά τα οποία απαιτούνται για την κατασκευή των δεξαμενών έχουν πολύ υψηλό κόστος, λόγω των προδιαγραφών που πρέπει να πληρούν [31].
- Οι δεξαμενές έχουν υψηλές απώλειες λόγω εξάτμισης. Ανάλογα με το μέγεθος της δεξαμενής αυτές μπορεί να ποικίλουν μεταξύ 0,1 με 1% ανά μέρα [32].
- Δεν έχουν ακόμα λυθεί όλα τα ζητήματα που αφορούν την ασφάλεια της συγκεκριμένης διαδικασίας [30].

Για τους παραπάνω λόγους η χρήση υγρού υδρογόνου είναι απίθανο να συμβεί σε μεγάλη κλίμακα για τα οχήματα, ωστόσο υπάρχει χώρος για εξέλιξη.

### **Φυσική αποθήκευση σε υδρίδια**

Σε αυτή τη μέθοδο γίνεται χρήση δεξαμενών με μεταλλικά υδρίδια, οι ιδιότητες των οποίων φαίνονται ιδιαίτερα χρήσιμες. Πιο συγκεκριμένα, όπως και στην περίπτωση της συμπίεσης μέσω μεταλλικών υδριδίων, γίνεται χρήση της ιδιότητας να απορροφούν υδρογόνο υπό σχετικά χαμηλή θερμοκρασία και πίεση. Γίνεται λοιπόν αντιληπτό ότι στην περίπτωση που μια δεξαμενή μεταλλικών υδριδίων παραλάβει μια ποσότητα υδρογόνου, αυτό θα αποθηκευτεί εντός του κρυσταλλικού του πλέγματος στην περίπτωση που βρίσκεται στην απαιτούμενη θερμοκρασία. Τα μέταλλα τα οποία μπορούν να αποθηκεύσουν το υδρογόνο συνήθως είναι κράματα τα οποία αποτελούνται κυρίως από λανθάνιο, νικέλιο και αλουμίνιο, ενώ σε πιο μικρές συγκεντρώσεις εντός του κράματος βρίσκονται κάλιο, νάτριο, ασβέστιο, κ.α.[34]. Όπως είναι λογικό, αναλόγως την εφαρμογή, γίνεται χρήση μεταλλικών υδριδίων διαφορετικής σύστασης, ώστε τελικά επιτυγχάνεται η αποθήκευση σε διαφορετικές συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας [35].

### **2.7 Τεχνολογία κυψελίδας καυσίμου**

Οι κυψελίδες καυσίμου υδρογόνου FCs είναι μικρές, αλλά ταυτόχρονα σύνθετες ηλεκτροχημικές συσκευές οι οποίες παράγουν ηλεκτρική ενέργεια μετατρέποντας την χημική που παράγεται κατά τη διάρκεια της αντίδρασης οξείδωσης-αναγωγής του υδρογόνου με το οξυγόνο, σε ηλεκτρική [37]. Μια κυψελίδα καυσίμου αποτελείται από ένα ηλεκτρόδιο στο οποίο διέρχεται το καύσιμο (άνοδος), ένα ηλεκτρόδιο το οποίο πραγματοποιεί την αντίδραση της οξείδωσης (κάθοδος) και έναν ηλεκτρολύτη ο οποίος τοποθετείται ανάμεσα στα δυο ηλεκτρόδια [38]. Αυτή η τεχνολογία αποτελεί εναλλακτική στις κλασσικές μηχανές εσωτερικής καύσης καθώς έχει χαμηλές εκπομπές και υψηλή απόδοση [39] ενώ μπορεί να φτάσει μέχρι 60 με 70% απόδοση [40]. Ένα άλλο πλεονέκτημα είναι ότι δεν παράγεται καθόλου θόρυβος κατά την λειτουργία της.



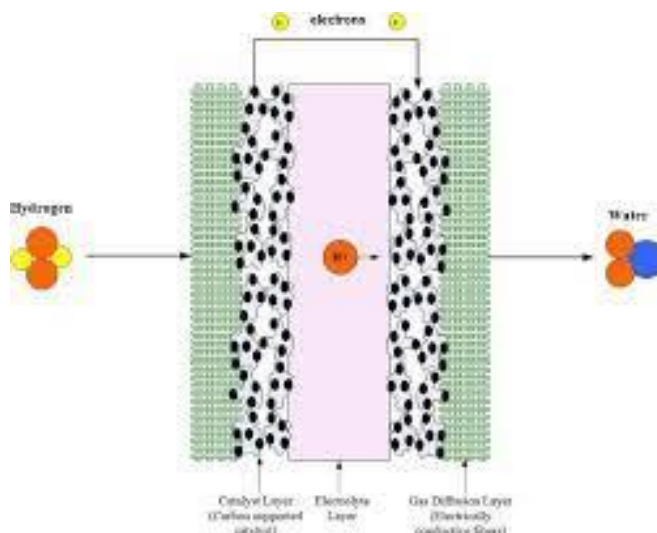
Υπάρχουν αρκετοί τύποι κυψελίδων καυσίμων υπό ανάπτυξη με την κάθε μια να έχει τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματά της. Οι κύριοι τύποι κυψελίδων καυσίμου είναι οι ακόλουθοι [41]:

- Κυψελίδα μεμβράνης εναλλαγής πρωτονίων (PEM)
- Αλκαλικές κυψελίδες (AFC)
- Κυψελίδες μεθανόλης
- Κυψελίδες φωσφορικού οξέος (PAFC)
- Κυψελίδες στερεού οξειδίου (SOFC)
- Κυψελίδες λιωμένου ανθρακικού άλατος (MCFC)

Οι κυψελίδες PEM αποτελούνται από μια μεμβράνη, ένα ηλεκτρόδιο, ένα στρώμα όπου διαχέεται αέριο και διπολικές πλάκες [42]. Είναι από τις πλέον διαδεδομένες τεχνολογίες για την εκμετάλλευση της εσωτερικής ενέργειας του υδρογόνου, και χρησιμοποιείται τόσο στον τομέα των μεταφορών όσο και σε σταθερές εγκαταστάσεις.

Αυτό συμβαίνει λόγω της ποσότητας ενέργειας που μπορεί να παράγει σε χαμηλή θερμοκρασία [43], υψηλή

πυκνότητα ισχύος, καλή απόδοση και χαμηλές εκπομπές [44]. Η απόδοση της μπορεί να φτάσει και το 60%. Η θερμοκρασία λειτουργίας τους είναι συνήθως στους 80 °C και κατασκευάζονται σε ένα ευρύ φάσμα ισχύος. Ακόμη και με αυτά τα πολλά πλεονεκτήματα η εμπορική αξιοποίηση της καθυστερήσει λόγω του υψηλού κόστους κατασκευής των διπολικών πλακών, οι οποίες αποτελούν περισσότερο από το 38% του συνολικού κόστους της κυψελίδας [45].



Εικόνα 8: Αρχή λειτουργίας κυψέλης καυσίμου PEM

## 2.8 Οχήματα τεχνολογίας κυψελίδας PEM

Τα οχήματα τεχνολογίας κυψελίδας καυσίμου μπορούν να αποτελέσουν μια αξιόπιστη λύση στο πρόβλημα της υπερθέρμανσης του πλανήτη καθώς παράγουν νερό ως αποτέλεσμα της λειτουργίας της κυψελίδας. Αν και η εισαγωγή τέτοιων οχημάτων έχει ξεκινήσει ήδη σε πολλές χώρες παγκοσμίως, υπάρχει περιορισμένος αριθμός δημοσιεύσεων για την λειτουργία και συντήρησή τους. Αξίζει να σημειωθεί ότι η περιοχή της μεσογείου ενδείκνυται για την ανάπτυξη υποδομών πράσινου υδρογόνου για αυτά τα οχήματα λόγω της συχνής ηλιοφάνειας και του μεγάλου αιολικού δυναμικού. [65]

Παραδείγματα οχημάτων που χρησιμοποιούν αυτή την τεχνολογία είναι το Hyundai Tucson, το Toyota Mirai, το Honda FCX clarity και το Mercedes-Benz GLC. Τα αυτοκίνητα που κάνουν χρήση κυψελίδας καυσίμου έχουν μεγαλύτερο κόστος από τα συμβατικά και τα ηλεκτροκίνητα αυτή τη στιγμή. Επιπλέον η έλλειψη υποδομών για τον ανεφοδιασμό τέτοιων οχημάτων, αποτελεί αποτρεπτικό παράγοντα για αγορά στον μέσο καταναλωτή. Αυτή τη στιγμή οι περισσότεροι σταθμοί ανεφοδιασμού βρίσκονται στην Ιαπωνία (113 μονάδες) ενώ ακολουθούν η Γερμανία (81) και οι ΗΠΑ (64) [3]. Ταυτόχρονα η ταχεία εξέλιξη και ανάπτυξη

υποδομών για τα αμιγώς ηλεκτρικά αυτοκίνητα τα κάνει πιο ελκυστικά στην αγορά αυτή την στιγμή.

Ωστόσο η χρήση μπαταριών για βαρέα οχήματα δεν είναι πολύ αποτελεσματική, καθώς λόγω των μεγάλων απαιτήσεων ενέργειας χρειάζονται μπαταρίες αυξημένου βάρους και όγκου, οι οποίες δρουν αρνητικά ως προς την χρησιμότητα των οχημάτων αφού μειώνεται ο ωφέλιμος όγκος τους. Επιπλέον οι μπαταρίες παρουσιάζουν γρήγορες απώλειες ισχύος σε ακραίες καιρικές συνθήκες, όντας έτσι αναξιόπιστες για μεγάλες διαδρομές. Έτσι είναι προτιμότερη η χρήση κυψελίδων καυσίμου.

Το λεωφορείο τεχνολογίας κυψελίδας καυσίμου (FCEB) είναι ένα ηλεκτρικό λεωφορείο με υβριδικό ηλεκτρικό σύστημα κίνησης μπαταρίας-κυψελίδας καυσίμου. Τα FCEBs μοιράζονται το ίδιο σχέδιο και κύρια μέρη με τα ηλεκτρικά λεωφορεία μπαταρίας. Η διαφορά βρίσκεται στο γεγονός ότι η μπαταρία είναι σημαντικά μικρότερη και η κυψελίδα καυσίμου αυξάνει την αυτονομία, παρέχοντας την απαραίτητη ηλεκτρική ενέργεια τόσο για τον ηλεκτρικό κινητήρα, όσο και για την επαναφόρτιση των μπαταριών.

Τα λεωφορεία της τεχνολογίας αυτής μπορούν να λειτουργήσουν σε όλες τις αστικές διαδρομές χωρίς να υστερούν σε σχέση με τα συμβατικά ή τα ηλεκτρικά. Έτσι με τις κατάλληλες υποδομές τα συμβατικά λεωφορεία μπορούν να αντικατασταθούν πλήρως.

Συνεπώς τα λεωφορεία αυτά παρέχουν όλα τα πλεονεκτήματα ενός λεωφορείου με μπαταρία: μηδενικές εκπομπές, χαμηλός θόρυβος, υψηλές επιδόσεις και επιπλέον:

- Έχουν μεγαλύτερη αυτονομία
- Σημαντική μείωση στο βάρος λόγω μικρότερης μπαταρίας και συνεπώς δυνατότητα για την μεταφορά περισσότερων επιβατών
- Γρηγορότερος ανεφοδιασμός
- Ευελιξία διαδρομών. Δεν χρειάζονται επιπλέον οδικές υποδομές

Ένα άλλο μεγάλο πλεονέκτημα είναι ότι τα συμβατικά λεωφορεία μπορούν να τροποποιηθούν και να γίνουν FCEB χωρίς έτσι να χρειάζεται να γίνει αγορά εξ ολοκλήρου καινούριων οχημάτων [46].

Τα υπάρχοντα λεωφορεία που χρησιμοποιούνται για την διαδρομή ως επί το πλείστον σήμερα είναι τα Mercedes Citaro. Με διαστάσεις 12 m μήκος, 2,5 m πλάτος και 3 m ύψος, μπορεί να φιλοξενήσει 106 επιβάτες. Έχει κινητήρα euro 4 OEM936, 4.800 cc, ο οποίος τροφοδοτείται με πετρέλαιο diesel. Η κατανάλωση του ανέρχεται στα 38,7 L ανά 100 km, γεγονός που σημαίνει



Εικόνα 9: Mercedes Citaro Αστικού ΚΤΕΛ Χανίων

ότι καταναλώνει περίπου 40 TN καυσίμου τον χρόνο. Σε κόστος αυτό μεταφράζεται σε 60.000€ δεδομένου ότι το πετρέλαιο κίνησης έχει τιμή 1,475 €/L στον Δήμο Χανίων (11/2021) [48]. Ωστόσο το γεγονός ότι υπάρχει μεγάλη εμπειρία και τεχνογνωσία πάνω στους κινητήρες εσωτερικής καύσης, σε συνδυασμό με την αξιοπιστία και σχετικά οικονομική συντήρησή τους, καθιστά πιο ελκυστικά τα συμβατικά λεωφορεία για αγορά από τις εταιρείες.

### **Van Hool a330 Fuel Cell hydrogen**

Το συγκεκριμένο όχημα κατασκευάζεται από την βελγική εταιρία Van Hool η οποία εξειδικεύεται αποκλειστικά στην παραγωγή λεωφορείων. Έχει σχεδιαστεί για να μπορεί να εξυπηρετήσει την Ευρωπαϊκή αγορά.

Έχει μήκος 13 m, πλάτος 2,5 m και ύψος 3,5 m με δυνατότητα εξυπηρέτησης 74 επιβατών. Το σύστημα κίνησης αποτελείται από την PEM κυψελίδα καυσίμου FCVelocity HD-7 85 kW της εταιρίας Ballard, μια μπαταρία LTO (Lithium-Titanat-Oxyd) με χωρητικότητα ενέργειας 36 kWh και έναν μαγνητικό κινητήρα της Siemens με ονομαστική ισχύ 200 kW. Καταναλώνει 8 kg H<sub>2</sub> ανά 100 km ενώ το ντεπόζιτο του έχει συνολική χωρητικότητα 35 kg και αποτελείται από φιάλες οι οποίες είναι τοποθετημένες στην



Εικόνα 10: Van Hool A330

οροφή του οχήματος. Αυτό σημαίνει ότι μπορεί να εξυπηρετήσει τις ανάγκες της διαδρομής με λιγότερο από ένα γέμισμα καθημερινά, καθιστώντας το έτσι πολύ αποδοτικό. Το κόστος του ανέρχεται στα 650.000 € το 2021, ωστόσο αυτό το κόστος αναμένεται να πέσει κάτω από τα 500.000 € μέχρι το 2030 σύμφωνα με την Ε.Ε. [49].

### **Solaris Urbino 12 hydrogen**

Το συγκεκριμένο μοντέλο κατασκευάζεται από την πολωνική εταιρία Solaris η οποία είναι γνωστή στην ελληνική αγορά από τα λεωφορεία φυσικού αερίου που εξυπηρετούν αρκετές αστικές διαδρομές στο λεκανοπέδιο Αττικής.

Παρόμοιο σε διαστάσεις με το a330 έχει μήκος 12 m, πλάτος 2,5 m και ύψος 3,1 m [50], έχει δυνατότητα εξυπηρέτησης 82 επιβατών. Το σύστημα κίνησης περιλαμβάνει PEM κυψελίδα FCmove-HD 70 kW της Ballard, μπαταρία LTO και 2 ηλεκτρικές μηχανές ZF AVE130 ισχύος 125 kW έκαστη. Το ντεπόζιτο όπως και στο προηγούμενο μοντέλο αποτελείται από 5 φιάλες υδρογόνου



Εικόνα 11: Solaris Urbino 12 Sasa Bolzano Italy

στην οροφή του οχήματος και έχει συνολική χωρητικότητα 37,5 kg. Σύμφωνα με την εταιρία μπορεί να διανύσει πάνω 400 km με ένα γέμισμα (περίπου 10 kg H<sub>2</sub>/100 km) γεγονός που του παρέχει την δυνατότητα ικανοποιητικής εξυπηρέτησης του εξεταζόμενου δρομολογίου. Ωστόσο είναι λιγότερο αποδοτικό από το a330 στην κατανάλωση καυσίμου. Όσον αφορά στο κόστος, η εταιρία SASA Bolzano απέκτησε 12 οχήματα έναντι 12.800.000 €, ενώ μέσα στην τιμή περιλαμβάνεται συντήρηση και αποκατάσταση των οχημάτων για 8 χρόνια. Συνεπώς η τιμή για 1 λεωφορείο κυμαίνεται κοντά στο 1.000.000 €. [50]



### **Wrightbus VDL SB200 pulsar Fuell Cell**

Πρόκειται για ένα όχημα της βρετανικής εταιρίας Wrightbus το οποίο τροποποιήθηκε από την εταιρία Ballard. Εξυπηρετεί την πόλη του Λονδίνου σε διάφορες αστικές διαδρομές υποκαθιστώντας τα συμβατικά λεωφορεία.



Εικόνα 12: Wrightbus VDL Pulsar FC

Με μήκος 12 m και πλάτος 2,5 m έχει χωρητικότητα 44 επιβατών το οποίο είναι και το βασικό του μειονέκτημα συγκριτικά με τα άλλα οχήματα. Χρησιμοποιεί την PEM κυψελίδα FCVelocity HD-6 75 kW. Έχει κατανάλωση 9 kg H<sub>2</sub> ανά 100 km με ντεπόζιτο χωρητικότητας 42 kg [51]. Αν και το συγκεκριμένο λεωφορείο μπορεί να εξυπηρετήσει την διαδρομή που εξετάζεται, είναι λιγότερο αποδοτικό από το Van Hool όσο αφορά την κατανάλωση καυσίμου και παράλληλα έχει περίπου την μισή χωρητικότητα, γεγονός που το καθιστά υποδεέστερο.

### **Caetano H<sub>2</sub>.City Gold**

Είναι λεωφορείο της πορτογαλικής εταιρίας Caetano η οποία έχει εξειδικεύσει την παραγωγή της σε λεωφορεία φιλικά προς το περιβάλλον. Η δημοτικότητα της έχει γνωρίσει ραγδαία άνοδο τα τελευταία χρόνια με χώρες όπως η Ισπανία και η Γερμανία να αγοράζουν μεγάλο αριθμό των λεωφορείων H<sub>2</sub>.City Gold, προκειμένου να αντικαταστήσουν τα συμβατικά λεωφορεία σε πληθώρα δρομολογίων.



Εικόνα 13: Caetano H<sub>2</sub>.City Gold στην Κολωνία

Σε συνεργασία με την Toyota η οποία παρέχει την τεχνογνωσία πάνω στις κυψελίδες καυσίμου το H<sub>2</sub>.City Gold είναι εξοπλισμένο με μια PEM κυψελίδα 60 kW, η οποία σε αντίθεση με τα άλλα λεωφορεία που εξετάστηκαν βρίσκεται στην οροφή του οχήματος και όχι κάτω από αυτό. Έχει μπαταρία LTO και μαγνητικό κινητήρα 180 kW της Siemens. Επιπλέον έχει 4 φιάλες για αποθήκευση υδρογόνου συνολικής χωρητικότητας 37,5 kg και η ελάχιστη κατανάλωση υδρογόνου ανέρχεται στα 6 kg ανά 100 km, άρα αποτελεί το πιο αποδοτικό λεωφορείο από όλα αναφορικά με την κατανάλωση καυσίμου. Ωστόσο σε απαιτητικές διαδρομές όπως η εξεταζόμενη αυτής ο αριθμός αγγίζει περίπου τα 10 kg αφού σύμφωνα με την εταιρία η μέγιστη αυτονομία είναι 400 km. Οι διαστάσεις του είναι παρόμοιες με τα υπόλοιπα οχήματα έχοντας 12 m μήκος, 2,5 m πλάτος και 3,5 m ύψος [53]. Μπορεί να εξυπηρετήσει μέχρι και 87 επιβάτες, ενώ όσον αφορά στο κόστος ο Δήμος Βαρκελώνης πρόσφατα αγόρασε 8 μοντέλα έναντι 6.400.000 €, δηλαδή το κόστος ανέρχεται στα 800.000€ ανά μοντέλο [54].



Εικόνα 14: Λεωφορεία FCEV στον σταθμό ανεφοδιασμού BALLARD POWER

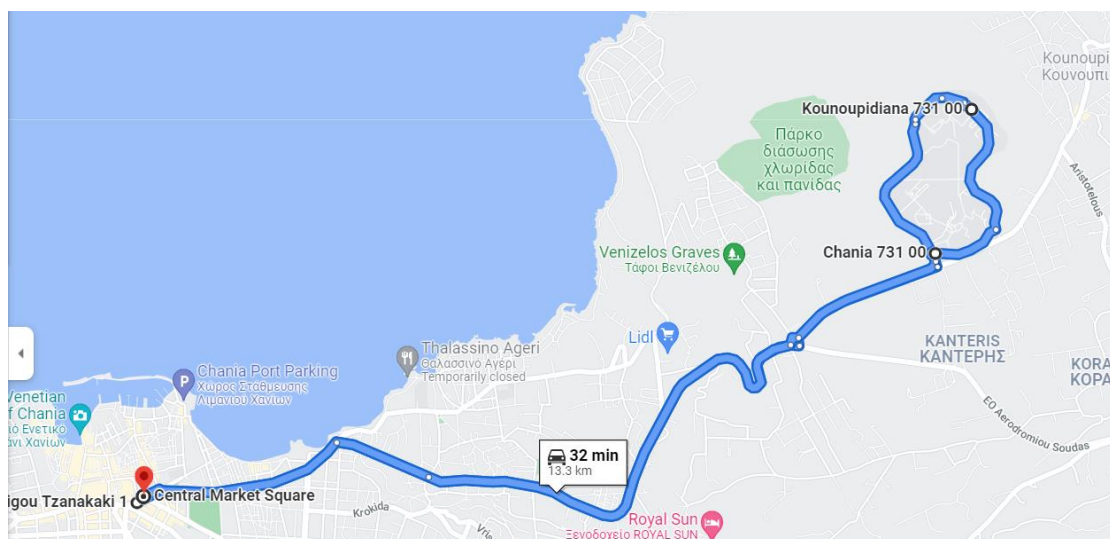
### 3. Μεθοδολογία

#### 3.1 Εισαγωγή

Στην παρούσα εργασία διαστασιολογήθηκε σταθμός παραγωγής υδρογόνου τεχνολογίας ηλεκτρόλυσης από ΑΠΕ ούτως ώστε να καλυφθούν οι ανάγκες δύο υδρογονοκίνητων λεωφορείων (FCEB) τα οποία θα εξυπηρετούν την διαδρομή κέντρο Χανίων - Πολυτεχνείο Κρήτης. Σκοπός είναι τόσο η ελαχιστοποίηση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος της συγκεκριμένης διαδρομής όσο και η εξοικονόμηση χρημάτων μακροπρόθεσμα μέσω της ιδιοπαραγωγής του απαιτούμενου υδρογόνου.

Η μεθοδολογία η οποία ακολουθήθηκε έχει ως εξής:

- Αρχικά υπολογίστηκε το συνολικό μήκος της διαδρομής σύμφωνα με τα υπάρχοντα δρομολόγια που επιτελούνται. Η συχνότητα αυτών είναι 1 κάθε ώρα, ξεκινώντας από τις 9 π.μ. και τελειώνοντας στις 9 μ.μ. Έτσι συνολικά γίνονται 12 δρομολόγια καθημερινά, ενώ στις ώρες αιχμής (9 π.μ. – 1 μ.μ.) ένα επιπλέον λεωφορείο χρησιμοποιείται σε περίπτωση ανάγκης. Το δρομολόγιο είναι κυκλικού τύπου και έχει μήκος 13,3 km όπως υπολογίστηκε από τους χάρτες της Google.



Εικόνα 15: Χάρτης της διαδρομής

Έτσι τα συνολικά χιλιόμετρα που διανύονται στην διάρκεια μιας ημέρας είναι περίπου 200. Ωστόσο ο σταθμός διαστασιολογήθηκε να εξυπηρετεί μέχρι και 300 km καθημερινά, για την εξασφάλιση της απαραίτητης δυναμικότητας.

- Στην συνέχεια έγινε σύγκριση στα μοντέλα λεωφορείων που αναφέρθηκαν παραπάνω, ούτως ώστε να επιλεγεί το βέλτιστο για τις ανάγκες της διαδρομής. Τα κριτήρια που τέθηκαν ήταν:
  1. Κατανάλωση  $H_2$ /100 km
  2. Χωρητικότητα ντεπόζιτου  $H_2$  σε kg
  3. Αριθμός επιβατών
  4. Κόστος αγοράς

Σύμφωνα με αυτά επιλέχθηκε το καταλληλότερο όχημα και ορίστηκε η ημερήσια απαίτηση παραγωγής υδρογόνου. Αναλυτικότερη αναφορά στα λεωφορεία που εξετάστηκαν θα γίνει παρακάτω.

- Τέλος για την διαστασιολόγηση του σταθμού χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό HomerPro, το οποίο βασιζόμενο στα παραπάνω δεδομένα υπολόγισε τις βέλτιστες διαστάσεις του μηχανολογικού/ ηλεκτρολογικού εξοπλισμού της εγκατάστασης και ταυτόχρονα παρουσίασε τα δεδομένα οικονομικής ανάλυσης.

### 3.2 Επιλογή του βέλτιστου οχήματος

Για την επιλογή του οχήματος που θα εξυπηρετεί την διαδρομή, εξετάστηκε μια πληθώρα μοντέλων από τις επικρατέστερες εταιρίες στον χώρο αυτή την στιγμή. Όλα τα εξεταζόμενα λεωφορεία χρησιμοποιούνται σε διαδρομές σε χώρες του εξωτερικού και συνεπώς είναι αποδεδειγμένη η αξιοπιστία τους. Τα κριτήρια αξιολόγησης αναφέρθηκαν και παραπάνω. Επιπλέον όλα τα μοντέλα αξιολογήθηκαν για την ικανότητα τους να υποκαταστήσουν τα υπάρχοντα συμβατικά λεωφορεία που χρησιμοποιούνται για την εν λόγω διαδρομή.

Παρακάτω παρουσιάζεται ένας συγκεντρωτικός πίνακας με τα χαρακτηριστικά των λεωφορείων:

Πίνακας 2: Πίνακας σύγκρισης λεωφορείων

Μοντέλο	Κατανάλωση H <sub>2</sub> kg/100km	Χώρος αποθήκευσης kg	Αριθμός Επιβατών	Κόστος €
Van Hool a330	8	35	74	650.000
Solaris Urbino 12	10	37,5	82	1.000.000
Wrightbus VDL SB200 FC	9	42	44	Δεν διατίθεται εκτός Η.Β
Caetano H <sub>2</sub> .City Gold	10	37,5	87	800.000

Όλα τα λεωφορεία που εξετάστηκαν, με εξαίρεση αυτό της Wrightbus (λόγω μη διαθεσιμότητας), έχουν την δυνατότητα να καλύψουν τις ανάγκες του δρομολογίου καθώς έχουν παρόμοιες διαστάσεις και επιδόσεις με το συμβατικό Citaro. Το μόνο σημείο στο οποίο υπερέχει έναντι όλων των λεωφορείων FCEB είναι η χωρητικότητα επιβατών, καθώς έχει την δυνατότητα να εξυπηρετεί μέχρι και 110. Ωστόσο το γεγονός ότι θα χρησιμοποιηθούν δυο λεωφορεία έναντι του ενός που χρησιμοποιείται τώρα για την γραμμή σημαίνει ότι οι ανάγκες του δρομολογίου μπορούν να εξυπηρετηθούν.

Έτσι η επιλογή του τελικού οχήματος βασίστηκε εξολοκλήρου στο κόστος απόκτησης και στην κατανάλωση υδρογόνου. Το μοντέλο της Van Hool υπερτερεί των υπολοίπων σε αυτές τις κατηγορίες και συνεπώς επιλέχθηκε. Αξίζει να αναφερθεί ότι αρκετά ανταγωνιστικό είναι και το λεωφορείο της Solaris καθώς μέσα στην τιμή περιλαμβάνονται και υπηρεσίες αποκατάστασης, που αποτελούν σημαντικό παράγοντα επειδή στα Χανιά δεν υπάρχει καμία τέτοια υποδομή αυτή τη στιγμή. Ωστόσο αυτές οι υπηρεσίες δεν είναι γνωστό αν προσφέρονται και σε μικρότερες παραγγελίες οχημάτων και συνεπώς για λόγους ασφαλείας το Van Hool θεωρήθηκε πιο αξιόπιστη αγορά.

### 3.3 HomerPro

#### 3.3.1 Γενικά

Το HOMER είναι ένα λογισμικό προσομοίωσης ενεργειακών συστημάτων το οποίο έχει την δυνατότητα να τα διαστασιολογεί και να τα βελτιστοποιεί βάσει οικονομικών κριτηρίων. Επίσης έχει τη δυνατότητα να πραγματοποιήσει αναλύσεις ευαισθησίας.

Το λογισμικό παρέχεται από την εταιρία HOMER energy και χρησιμοποιείται παγκοσμίως για βελτιστοποίηση και σχεδιασμό μικροδικτύων τόσο σε μικρή όσο και σε μεγάλη κλίμακα. Το HomerPro του οποίου τα αρχικά αντιπροσωπεύουν Hybrid Optimization of Multiple Electric Renewables (Υβριδική Βελτιστοποίηση Πολλαπλών Ηλεκτρικών Ανανεώσιμων πηγών), απλοποιεί την διαδικασία υπολογισμού διαστάσεων για συστήματα ισχύος, τόσο αυτόνομων όσο και συνδεδεμένων με το δίκτυο ηλεκτρισμού. Διευκολύνει επίσης τον χρήστη στην επιλογή του σωστού εξοπλισμού καθώς αναλύει και εξετάζει τον μεγάλο αριθμό τεχνολογικών επιλογών, τις διακυμάνσεις του κόστους και την διαθεσιμότητα των ενεργειακών πόρων. Η ανάλυση αυτή γίνεται μέσω αλγορίθμων ανάλυσης ευαισθησίας.

Συνεπώς το λογισμικό είναι ιδανικό για την διαστασιολόγηση του σταθμού ανεφοδιασμού καθώς αυτός μπορεί να θεωρηθεί ως μικροδίκτυο, αφού περιλαμβάνει ξεχωριστά κομμάτια ηλεκτρολογικού και μηχανολογικού εξοπλισμού τα οποία αλληλοεπιδρούν για την επίτευξη παραγωγής μιας προκαθορισμένης ποσότητας υδρογόνου.

#### 3.3.2 Τρόπος λειτουργίας του HOMER

Οι αναλύσεις και τα αποτελέσματα που παρουσιάζει το λογισμικό είναι αποτέλεσμα μιας διαδικασίας τριών σταδίων:

##### 1. Προσομοίωση (Simulation)

Το HOMER προσομοιάζει την λειτουργία του συστήματος, υπολογίζοντας ενεργειακά ισοζύγια για ορισμένα χρονικά διαστήματα (intervals) στη διάρκεια ενός έτους. Αναλυτικότερα το λογισμικό συγκρίνει την απαίτηση σε ηλεκτρική και θερμική ενέργεια, με την ενεργεία την οποία μπορεί να παράγει το σύστημα σε κάθε χρονικό διάστημα. Στην συνέχεια υπολογίζει την ροή της ενέργειας από και προς κάθε ξεχωριστό κομμάτι του συστήματος. Για συστήματα που περιλαμβάνουν μπαταρίες ή γεννήτριες, το HOMER επιπλέον αποφασίζει τον τρόπο λειτουργίας των γεννητριών και τότε θα φορτίζονται και θα αποφορτίζονται οι μπαταρίες

##### 2. Βελτιστοποίηση (Optimization)

Το λογισμικό έχει δυο αλγορίθμους βελτιστοποίησης. Ο αρχικός αλγόριθμος προσομοιάζει όλες τις εφικτές συνθέσεις για το σύστημα που έχουν οριστεί στην στήλη Search Space. Ο δεύτερος αλγόριθμος ονομάζεται HOMER Optimizer και σε αντίθεση με τον πρώτο, αναζητά το λιγότερο δαπανηρό σύστημα χωρίς να χρειάζεται την στήλη Search Space.

Στην συνέχεια το HOMER παρουσιάζει μια λίστα πιθανών συνθέσεων για το σύστημα, ταξινομημένες με βάση την καθαρή παρούσα αξία τους, τις οποίες ο χρήστης μπορεί να συγκρίνει προκειμένου να επιλέξει αυτή που επιθυμεί.

##### 3. Ανάλυση Ευαισθησίας (Sensitivity Analysis)

Όταν ο χρήστης ορίσει μεταβλητές ευαισθησίας, το HOMER επαναλαμβάνει την διαδικασία της βελτιστοποίησης για κάθε μεταβλητή ευαισθησίας που έχει οριστεί. Αν για παράδειγμα έχει οριστεί η ταχύτητα ανέμου σαν μια τέτοια μεταβλητή το HOMER παρουσιάζει συνθέσεις για το ορισμένο εύρος ταχυτήτων.



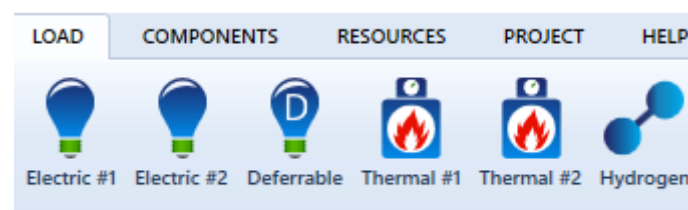
### 3.3.3 Ορισμός της εγκατάστασης στο HOMER

Αρχικά ο χρήστης καλείται να προσδιορίσει την τοποθεσία της εγκατάστασης καθώς και κάποια γενικά οικονομικά στοιχεία, όπως τον ρυθμό πληθωρισμού και έκπτωσης αλλά και τον χρονικό ορίζοντα ζωής του έργου. Αυτά ορίζονται στην καρτέλα HOME του HOMER (εικόνα 16) .

Στην συγκεκριμένη περίπτωση η τοποθεσία που ορίστηκε ήταν η κεντρική στάση του ΚΤΕΛ Χανίων ενώ τα ποσοστά πληθωρισμού και προεξοφλητικού επιτοκίου ορίστηκαν 2% και 5% αντίστοιχα. Τέλος ο χρονικός ορίζοντας ορίστηκε στα 25 χρόνια.

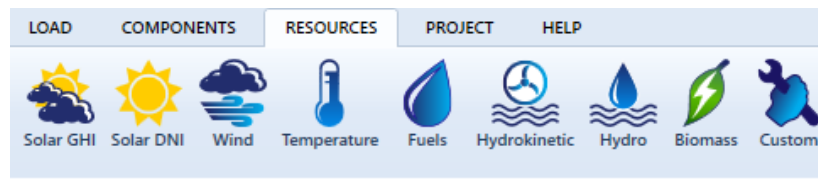
Εικόνα 16: Καρτέλα HOME

Στην συνέχεια ορίζεται το απαιτούμενο φορτίο υδρογόνου που καλείται να εξυπηρετήσει το σύστημα. Από την καρτέλα DESIGN επιλέγεται η καρτέλα LOAD και έπειτα το στοιχείο HYDROGEN (Εικόνα 17).



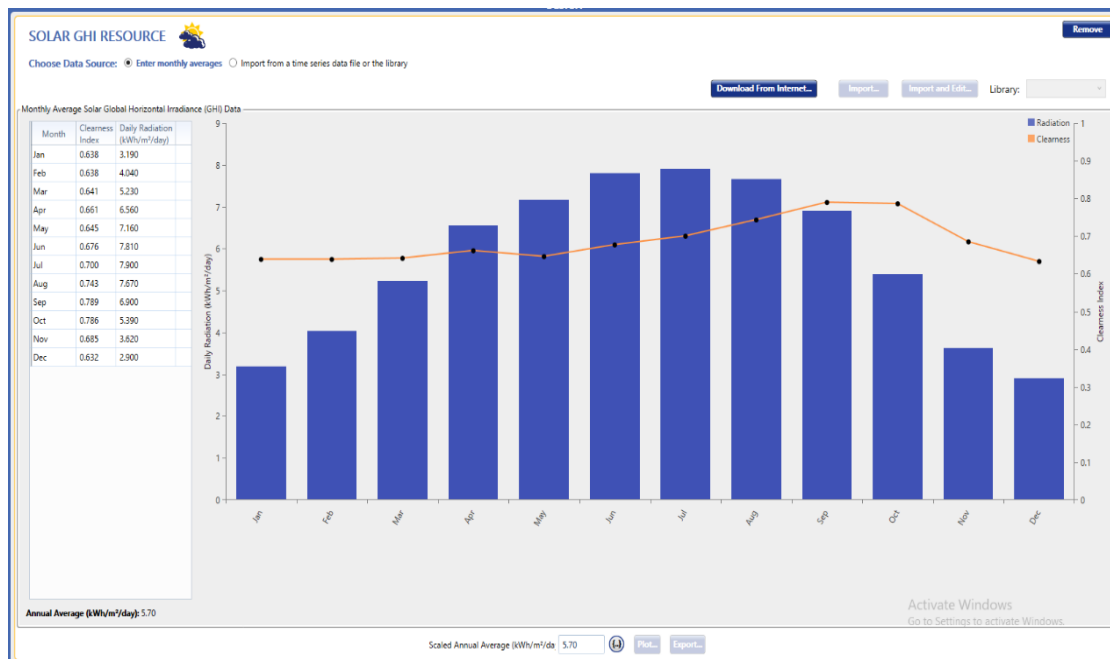
Εικόνα 17: Καρτέλα LOAD

Αφού καθοριστεί το απαιτούμενο φορτίο, επιλέγεται η κύρια πηγή ενέργειας. Εφόσον έχει αποφασιστεί ότι η εγκατάσταση θα λειτουργεί με ενέργεια προερχόμενη από Φ/Β, είναι απαραίτητος ο εντοπισμός των ετήσιων κλιματολογικών δεδομένων ώστε να καταχωρηθούν στο λογισμικό. Από την καρτέλα RESOURCES επιλέγεται η καρτέλα SOLAR GHI RESOURCE (Εικόνα 19).



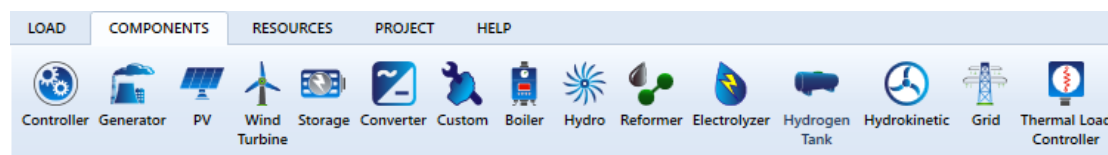
Εικόνα 18: Καρτέλα RESOURCES

Εκεί προσδιορίστηκαν οι τιμές της ετήσιας ηλιακής ακτινοβολίας, με βάση την εθνική μετεωρολογική υπηρεσία για την τοποθεσία όπου θα εγκατασταθεί ο σταθμός (Εικόνα 19).



Εικόνα 19: Τιμές ημερήσιας πυκνότητας ηλιακής ισχύος Χανίων

Στην συγκεκριμένη περίπτωση χρησιμοποιήθηκαν τα φωτοβολταϊκά SG315M της εταιρίας Peimar. Από την καρτέλα COMPONENTS επιλέγεται το PV (Εικόνα 20).



Εικόνα 20: Καρτέλα COMPONENTS

Εκεί ορίζονται τα χαρακτηριστικά του επιλεγμένου πάνελ, το κόστος ανά kW, το κόστος αλλαγής και συντήρησης, ο χρόνος ζωής και ο παράγοντας μείωσης απόδοσης. Τέλος για την προσομοίωση επιλέχθηκε ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης Search Space.

Για την μετατροπή του ρεύματος από συνεχές σε εναλλασσόμενο είναι απαραίτητη η ύπαρξη μετατροπέα. Συγκεκριμένα επιλέχθηκε να τοποθετηθεί ο TRIO-20.0-TL των 22 kW της Power-One SOLAR INVERTERS. Ο συγκεκριμένος μετατροπέας έχει νέα χαρακτηριστικά συμπεριλαμβανομένων έναν ειδικό και ενσωματωμένο απαγωγό θερμότητας και οθόνη στο πρόσθιο τμήμα. Η συσκευή δεν περιέχει ηλεκτρολυτικούς πυκνωτές με αποτέλεσμα τη μεγαλύτερη διάρκεια ζωής. Αντίστοιχα από την καρτέλα COMPONENTS επιλέγεται το CONVERTER.

Η διαστασιολόγηση του συμπιεστή έγινε σύμφωνα με βιβλιογραφικά δεδομένα. Για την επίτευξη συμπίεσης υδρογόνου 350 bar on-site απαιτούνται 2 με 4 kWh ενέργειας για κάθε kg υδρογόνου [60]. Στην παρούσα εργασία, έγινε η παραδοχή της τιμής 4 kWh/kg για τους υπολογισμούς.

Ωστόσο το πρόγραμμα δεν προσφέρει κάποιο συγκεκριμένο COMPONENT για διαστασιολόγηση συμπιεστών. Για αυτό το λόγο και με δεδομένο ότι ο συμπιεστής λειτουργεί με ηλεκτρικό ρεύμα, έγινε η παραδοχή να οριστεί σαν ηλεκτρικό φορτίο. Από την καρτέλα LOAD επιλέχθηκε το Electric #1 και ορίστηκαν τα αντίστοιχα δεδομένα. Το κόστος για την συμπίεση υπολογίστηκε από τον βιβλιογραφικό τύπο:

$$C(\text{€}) = 43872 * P(\text{kW})^{0.5861} \text{ [61]} . \text{ (Εξίσωση 1: υπολογισμός κόστους συμπιεστή)}$$

Για την ηλεκτρόλυση επιλέχθηκε συσκευή της εταιρίας HyProvide, από την σειρά A-series [57]. Σε αυτή υπάρχουν τρία μοντέλα τα οποία διαφέρουν στο μέγεθος τους. Το A30 παρέχει έως και 2,7 kg H<sub>2</sub>/h, το A60 5,4 kg H<sub>2</sub>/h ενώ το A90 8,1 kg H<sub>2</sub>/h. Όλα τα μοντέλα παράγουν υδρογόνο στα 35 bar ενώ η ισχύς τους εξαρτάται από την επιθυμητή παραγωγή υδρογόνου. Στην συγκεκριμένη περίπτωση θα χρησιμοποιηθεί το μοντέλο A90. Η αρχική μέγιστη ισχύς της μονάδας ηλεκτρόλυσης κυμαίνεται από 340-450 kW. Το μοντέλο που θα επιλεγεί τελικά θα εξαρτηθεί από τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων

Όσον αφορά στην αποθήκευση του υδρογόνου, επιλέχθηκαν ειδικές δεξαμενές ικανές να φιλοξενήσουν υδρογόνο πίεσης 350 bar. Ο αλγόριθμος που χρησιμοποιήθηκε για την διαστασιολόγηση ήταν ο Search Space και στόχος των δεξαμενών είναι να μπορούν να καλύψουν την ζήτηση για τουλάχιστον μια εβδομάδα, σε περιπτώσεις περιορισμένης ηλιοφάνειας ή κακοκαιρίας. Στην συγκεκριμένη περίπτωση από την καρτέλα COMPONENTS επιλέγεται το HYDROGEN TANK

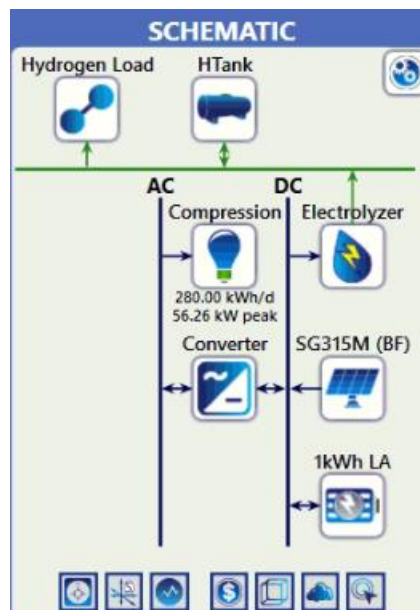
Τέλος για την ανάκτηση της περίσσειας ενέργειας από τα φωτοβολταϊκά τοποθετήθηκαν συσσωρευτές μόλυβδου-οξέος δηλαδή το COMPONENT STORAGE

Τα κόστη για συντήρηση και επισκευή για κάθε μηχανήμα ορίστηκε στα 30€ ετησίως, κόστος που αντιπροσωπεύει τον ελάχιστο μισθό στην Ελλάδα για τους τεχνίτες. Ωστόσο αυτή η τιμή δόθηκε ενδεικτικά, καθώς μπορεί να διαφέρει σημαντικά, αφού εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, όπως την συχνότητα που μπορεί να παρουσιάσουν βλάβη τα συστήματα και την διαθεσιμότητα των ατόμων που έχουν την δυνατότητα να αναλάβουν τις εργασίες.

Αφού ορίστηκαν όλα τα επιμέρους εξαρτήματα της εγκατάστασης, δημιουργήθηκε το παρακάτω σκαρίφημα (Εικόνα 21).

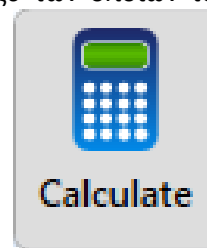
Σε αυτό παρουσιάζονται συγκεντρωτικά όλα τα COMPONENTS και τα LOADS που έχουν οριστεί, καθώς και οι δίαυλοι ρεύματος στους οποίους είναι συνδεδεμένα. Στην συγκεκριμένη περίπτωση, η συσκευή ηλεκτρόλυσης, τα Φ/Β και οι μπαταρίες έχουν τοποθετηθεί στο δίαυλο του συνεχούς ρεύματος, ενώ ο συμπιεστής έχει τοποθετηθεί στο εναλλασσόμενο. Για αυτό το λόγο άλλωστε, στο σύστημα περιλαμβάνεται και ο μετατροπέας.

Από το πλήκτρο στην άνω δεξιά γωνία του σκαριφήματος επιλέγεται ο βασικός αλγόριθμος προσομοίωσης του συστήματος, ενώ από τα πλήκτρα που βρίσκονται στην κάτω θέση, μπορούν να οριστούν διάφοροι παράγοντες της προσομοίωσης, όπως το νόμισμα, το επιθυμητό ποσοστό διείσδυσης Α.Π.Ε, κόστος και ποσότητα εκπομπών αέριων ρύπων κ.α.



Εικόνα 21: Σκαρίφημα εγκατάστασης

Για τις ανάγκες της εργασίας χρησιμοποιήθηκαν δυο αλγόριθμοι, μεταξύ των οποίων το HOMER επιλέγει την βέλτιστη λύση. Ο πρώτος είναι ο HOMER Cycle Charging. Σε αυτόν, το πρόγραμμα δίνει προτεραιότητα στην κάλυψη της ανάγκης του κύριου φορτίου, και έτσι διαστασιολογεί τα βασικά μηχανήματα που παράγουν ενέργεια να λειτουργούν στο μέγιστο της απόδοσης τους. Το πλεόνασμα της παραγωγής αναδιανέμεται στα υπόλοιπα στοιχεία της εγκατάστασης. Ο δεύτερος αλγόριθμος είναι ο HOMER Load Following. Σε αυτόν, τα μηχανήματα που παράγουν ενέργεια διαστασιολογούνται στο ελάχιστο δυνατό, ούτως ώστε να δίνουν ακριβώς την ενέργεια που χρειάζεται το βασικό φορτίο. Τα υπόλοιπα μέρη του συστήματος εξυπηρετούνται από εναλλακτικές πηγές ενέργειας αν υπάρχουν.



Εικόνα 22: Πλήκτρο έναρξης προσομοίωσης

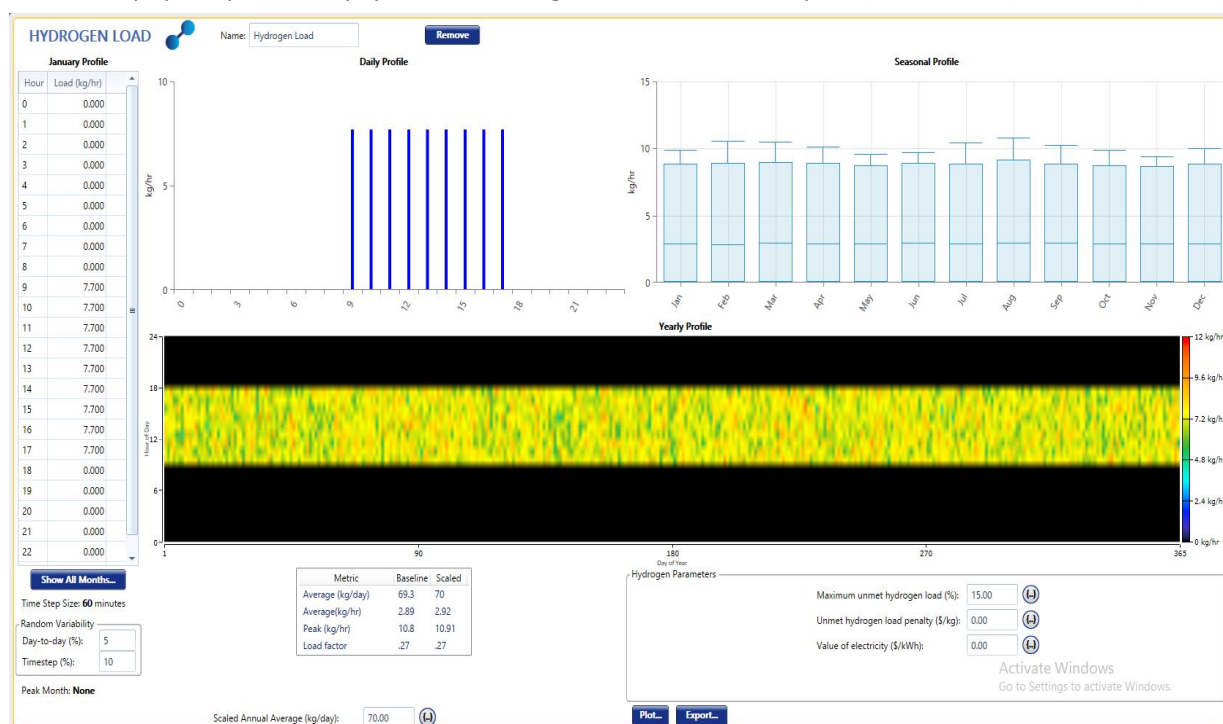
Τέλος για να ξεκινήσει η προσομοίωση χρησιμοποιείται το πλήκτρο Calculate όπως φαίνεται στην Εικόνα 22.

## 4.Αποτελέσματα

Σύμφωνα με τις ανάγκες της διαδρομής και της κατανάλωσης του λεωφορείου που επιλέχθηκε, διαστασιολογήθηκε σταθμός ο οποίος θα μπορεί να παράγει 70 kg υδρογόνου την ημέρα, δηλαδή να γεμίζει το ντεπόζιτο δύο τέτοιων λεωφορείων. Η διαδικασία αυτή έγινε χρησιμοποιώντας το λογισμικό HomerPro όπως προαναφέρθηκε.

### 4.1 Φορτίο υδρογόνου

Ουσιαστικά σε αυτό ορίστηκαν οι ανάγκες που θα έχουν τα δύο λεωφορεία. Όπως προαναφέρθηκε, θα χρησιμοποιηθούν 2 λεωφορεία Van Hool τα οποία έχουν καταναλώνουν 70 kg H<sub>2</sub> καθημερινά. Αυτά θα παράγονται καθημερινά από τις 9 π.μ μέχρι τις 5 μ.μ και τα λεωφορεία θα ανεφοδιάζονται μια φορά είτε πριν είτε μετά την ολοκλήρωση της ημερήσιας υπηρεσίας. Επιπλέον, το HOMER δίνει την δυνατότητα για τον ορισμό ενός ποσοστού υδρογόνου το οποίο θα μπορεί να μην ικανοποιείται. Δεδομένου ότι οι πραγματικές ανάγκες του δρομολογίου καθημερινά είναι 48 kg, το ποσοστό αυτό ορίστηκε στο 15% (Εικόνα 23).



Εικόνα 23: Καρτέλα ορισμού του απαιτούμενου φορτίου υδρογόνου

### 4.2 Φωτοβολταϊκά πάνελ

Τα φωτοβολταϊκά πάνελ που επιλέχθηκαν έχουν απόδοση 19,4 % και είναι μονοκρυσταλλικά. Το κάθε πάνελ έχει ονομαστική ισχύ 315 W και το κόστος ανέρχεται στα 200€ σύμφωνα με την εταιρία. Επομένως το κόστος ανά kW είναι περίπου 650€. Ωστόσο λόγω της αστάθειας που παρουσιάζουν οι ενεργειακές αγορές, και για την καλύτερη αξιοπιστία των αποτελεσμάτων, εξετάστηκαν επιπλέον δύο σενάρια για το κόστος ανά kW, όπου στο πρώτο η τιμή είναι 20% μεγαλύτερη της αρχικής (768€/kW σενάριο 2), και στο δεύτερο 20% (512€/kW σενάριο 3) μικρότερη. Αυτές οι διακυμάνσεις δύνανται να αλλάξουν την διαστασιολόγηση όλων των εξαρτημάτων, καθώς όπως προαναφέρθηκε το Homer κάνει βελτιστοποίηση όλων των συστημάτων με σκοπό την επίτευξη του χαμηλότερου καθαρού παρόντος κόστους (NPC) της εγκατάστασης.

Η εταιρία δίνει εγγύηση καλής λειτουργίας για 30 χρόνια, δηλαδή ότι η απόδοση των πλαισίων θα διατηρηθεί σε αυτή την περίοδο άνω του 80% της αρχικής. Τα Φ/Β παράγουν

συνεχές ρεύμα και επομένως ορίστηκαν στο δίκτυο DC. Τέλος για την προσομοίωση επιλέχθηκε ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης Search Space, με τις τιμές που ορίστηκαν να κυμαίνονται από 625-700 kW συνολικής ισχύος, καθώς εκτιμάται ότι η απαιτούμενη ισχύς θα βρίσκεται ανάμεσα σε αυτές τις τιμές. (Εικόνα 24).

The screenshot shows the 'PV' module configuration window in HOMER software. At the top, there are fields for 'Name' (Peimar SG315M (BF)) and 'Abbreviation' (SG315M). Below this, the 'Properties' section lists module details: Name, Abbreviation, Panel Type (Flat plate), Rated Capacity (700 kW), Temperature Coefficient (-0.4), Operating Temperature (25 °C), Efficiency (19.4%), Manufacturer (Peimar Inc.), and Notes (18 kg, Footprint: 1.627 m<sup>2</sup>). The 'Cost' section has input fields for Capacity (kW), Capital (€), Replacement (€), O&M (€/year), and Lifetime (years). The 'Sizing' section shows the 'HOMER Optimizer™' set to 'Search Space' and a list of power values (kW) from 0 to 700. The 'Site Specific Input' section includes a 'Derating Factor (%)' field and an 'Electrical Bus' selection (AC or DC). An 'Advanced...' button is located at the bottom right.

Εικόνα 24: Καρτέλα ορισμού τεχνικών χαρακτηριστικών των Φ/Β

Η προσομοίωση κατέδειξε ότι τα Φ/Β θα έχουν συνολική ισχύ 625 kW. Αυτά πρόκειται να τοποθετηθούν στον τερματικό σταθμό της εταιρίας ΚΤΕΛ Χανίων, όπως και η υπόλοιπη εγκατάσταση. Ο χώρος αυτός επιλέχθηκε καθώς έχει μεγάλη ελεύθερη έκταση για τα Φ/Β, αλλά επίσης λειτουργεί και ως μηχανοστάσιο για τα λεωφορεία της εταιρίας, οπότε διευκολύνεται ο καθημερινός ανεφοδιασμός.

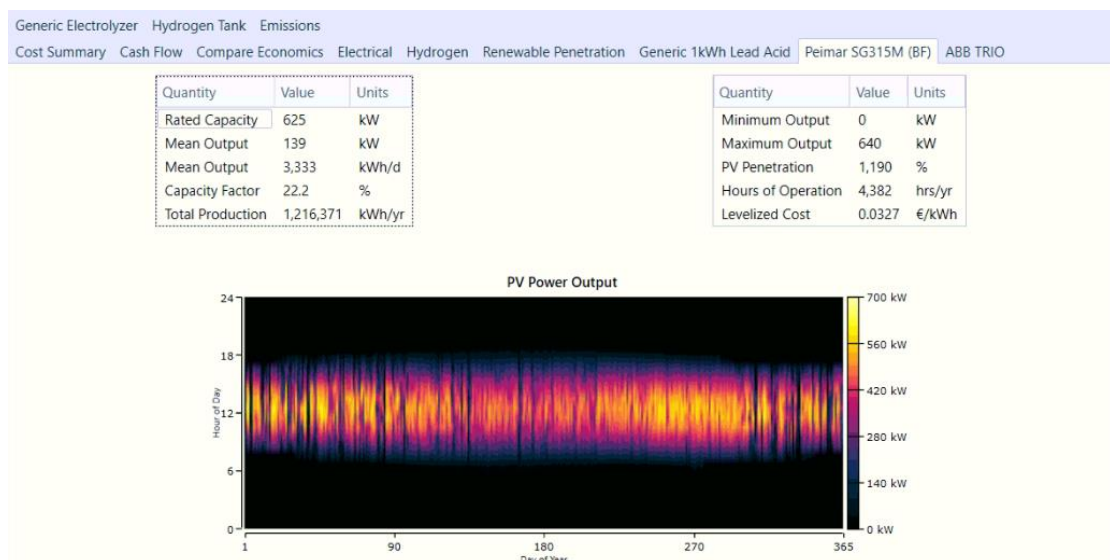
Είναι γνωστό από τα τεχνικά χαρακτηριστικά των πλαισίων ότι οι διαστάσεις τους είναι 1640x992x40 mm, επομένως η επιφάνεια που καταλαμβάνουν είναι 1,63 m<sup>2</sup> [58]. Δεδομένου ότι για κάθε 315W απαιτούνται 1,63 m<sup>2</sup> επιφάνεια, η συνολική επιφάνεια των Φ/Β θα είναι περίπου 3230 m<sup>2</sup>. Η επιφάνεια αυτή μπορεί να δημιουργηθεί, με την κατασκευή στεγάστρων στις θέσεις στάθμευσης των λεωφορείων, και τοποθέτηση των πλαισίων επάνω σε αυτά. Στην παρακάτω αεροφωτογραφία του χώρου παρουσιάζονται τα σημεία τοποθέτησης των στεγαστρών και η συνολική τους επιφάνεια. Με πορτοκαλί χρώμα διακρίνονται οι χώροι όπου δεν χρειάζεται η κατασκευή στεγάστρου, ενώ με μπλε αυτοί που χρειάζονται (εικόνα 25). Ο συνολικός χώρος υπολογίστηκε στα 3235 m<sup>2</sup>.





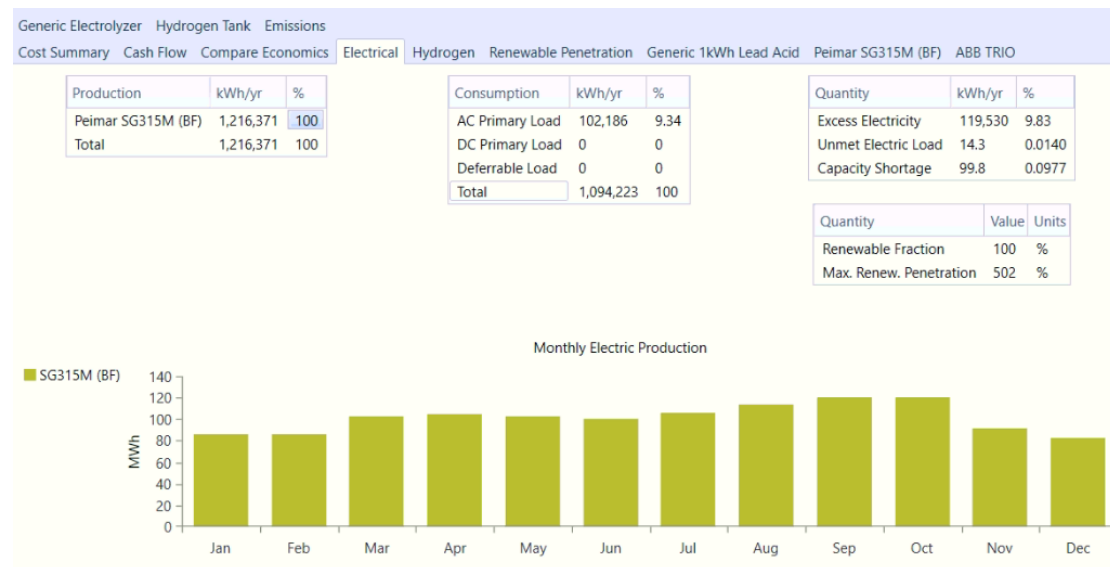
Εικόνα 25: Πιθανοί χώροι εγκατάστασης Φ/Β

Παρακάτω παρουσιάζονται αναλυτικότερα αποτελέσματα της προσομοίωσης για τα Φ/Β (εικόνα 26).



Εικόνα 26: Αποτελέσματα προσομοίωσης των Φ/Β σενάριο 1

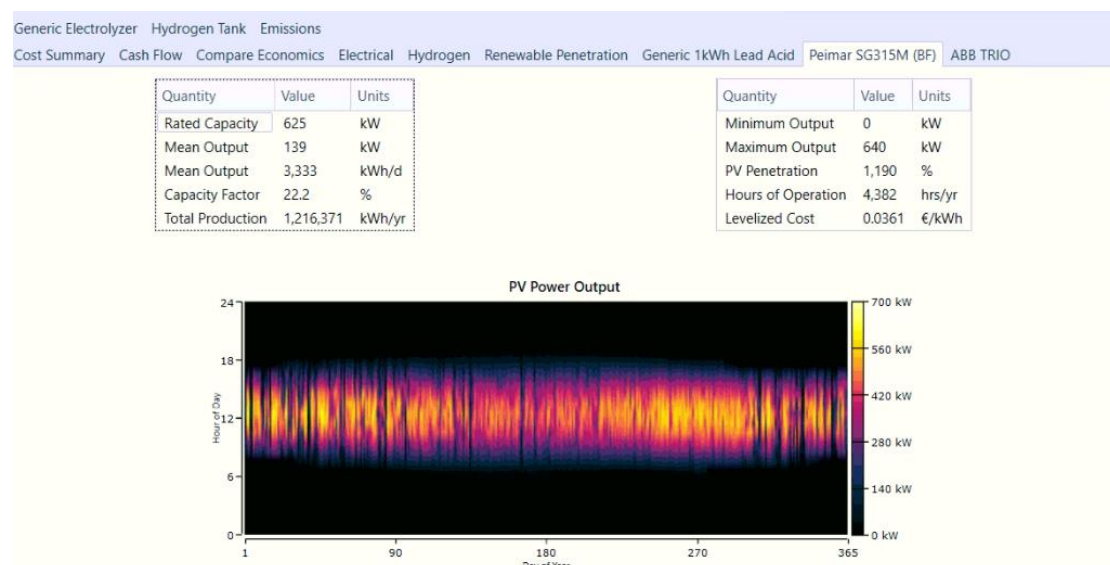
Όπως φαίνεται και στην εικόνα 27, τα Φ/Β θα παράγουν 1.216.371 kWh/year, οι οποίες θα καλύπτουν τις ενεργειακές απαιτήσεις της ηλεκτρόλυσης και της συμπίεσης ενώ ένα μέρος θα αποθηκεύεται στις μπαταρίες. Αυτή η ποσότητα ενέργειας θα παράγεται σε 4382 ώρες κάθε χρόνο, ενώ το ανηγμένο κόστος της ενέργειας LCOE θα ανέρχεται κοντά στα 0,033 €/kWh. Στην συνέχεια παρατίθεται αναλυτικά η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας στο διάστημα ενός έτους (εικόνα 27).



Εικόνα 27: Συνολική παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας ανά έτος

Σε αυτή την εικόνα δεν παρουσιάζεται μόνο η παραγωγή των Φ/Β, αλλά και η κατανάλωση της συμπίεσης στον δίαυλο του εναλλασσόμενου ρεύματος (102.186 kWh/year) και η περίσσεια ενέργειας ανά έτος (119.530 kW/year).

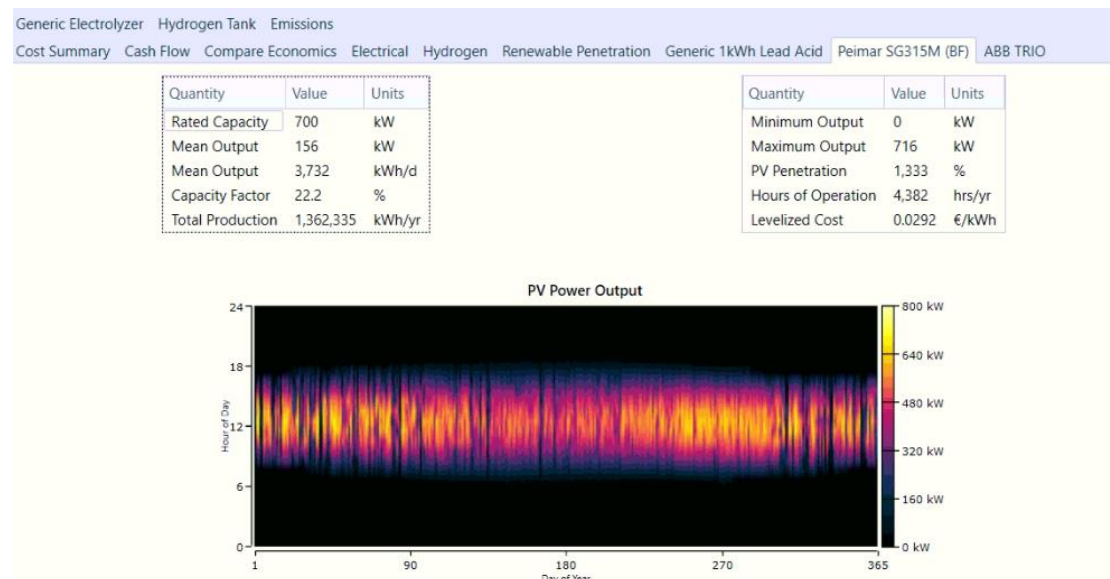
Για το σενάριο 2, η συνολική ισχύς των Φ/Β παρέμεινε ίδια στα 625 kW. Έτσι μεταβολή υπήρξε κυρίως στο LCOE το οποίο διαμορφώθηκε στα 0,036 €/kWh όπως φαίνεται και στην παρακάτω (εικόνα 28).



Εικόνα 28: Αποτελέσματα προσομοίωσης Φ/Β σενάριο 2



Ωστόσο στο σενάριο 3, η προσομοίωση κατέδειξε ότι η ισχύς των Φ/Β ανέρχεται στα 700 kW. Η συνολική παραγωγή ενέργειας ανά έτος διαμορφώθηκε στα 1.362.335 kWh/year και το LCOE στα 0,029 €/kWh (εικόνα 29).



Εικόνα 29: Αποτελέσματα για Φ/Β σενάριο 3

### 4.3 Μετατροπέας

Ο μετατροπέας που επιλέχθηκε είναι τριφασικός με απόδοση 98,2%. Ύστερα από επικοινωνία με την εταιρία έγινε γνωστό πως κοστίζει 3000€, και επομένως η τιμή ανά kW ανέρχεται γύρω στα 150€. Η εταιρία δίνει εγγύηση 5 ετών αλλά αυτή μπορεί να διαμορφωθεί μέχρι και 15 έτη κατά την διάρκεια της χρήσης [55].

CONVERTER+ ABB TRIO Name: ABB TRIO Remove  
 Complete Catalog Abbreviation: Convert Copy To Library

Properties  
 Name: ABB TRIO  
 Abbreviation: Converter  
 www.homerenergy.com  
 Notes:  
 This is a generic system converter.

Costs

Capacity (kW)	Capital (€)	Replacement (€)	O&M (€/year)
1	€150.00	€150.00	€30.00

Click here to add new item

Multiplier: (L) (L) (L)

Inverter Input  
 Lifetime (years): 15.00 (L)  
 Efficiency (%): 98.20 (L)  
☒ Parallel with AC generator?

Rectifier Input  
 Relative Capacity (%): 100.00 (L)  
 Efficiency (%): 98.20 (L)

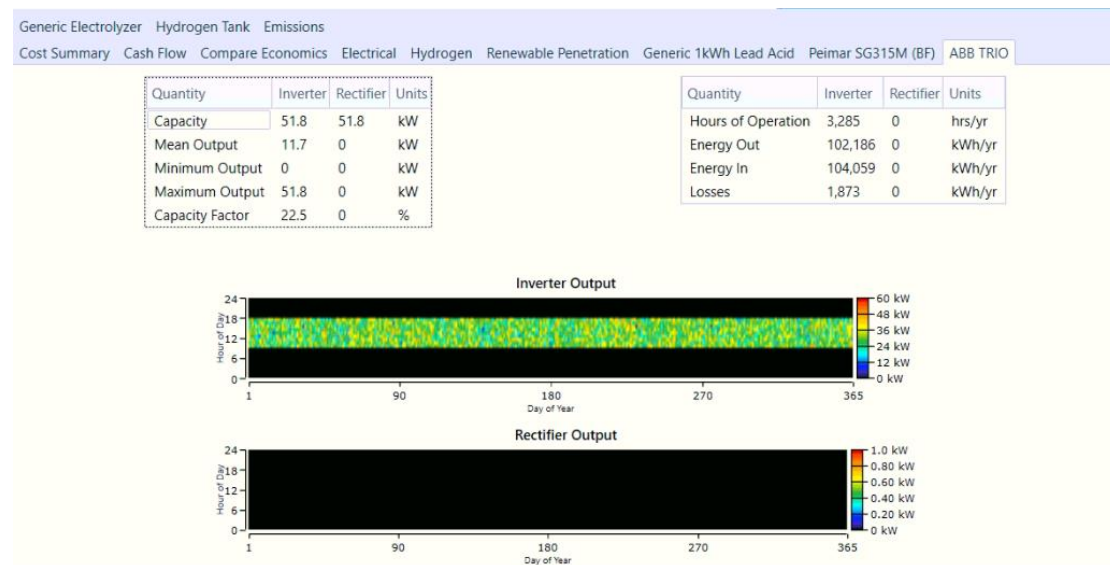
Capacity Optimization  
☒ HOMER Optimizer™  
☐ Search Space  
☐ Advanced

Generic  
 homerenergy.com

HOMER Energy

Εικόνα 30: Καρτέλα ορισμού τεχνικών χαρακτηριστικών του μετατροπέα

Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης του μετατροπέα για το αρχικό σενάριο παρουσιάζονται παρακάτω (εικόνα 31).



Εικόνα 31: Αποτελέσματα προσομοίωσης για τον μετατροπέα.

Η απαιτούμενη ισχύς του μετατροπέα είναι 51,8 kW. Ουσιαστικά ο μετατροπέας χρειάζεται για να μετατρέπει το συνεχές ρεύμα σε εναλλασσόμενο για να καλύπτει τις ανάγκες του συμπιεστή, ο οποίος είναι το μοναδικό κομμάτι της εγκατάστασης που λειτουργεί με εναλλασσόμενο ρεύμα. Γι' αυτό το λόγο η ενέργεια που εισέρχεται ετησίως στον μετατροπέα είναι 104.059 kWh, και λόγω της υψηλής του απόδοσης εξέρχονται 102.186 kWh, έχοντας έτσι απώλειες 1,8%.

Επιπλέον οι τιμές του Rectifier είναι όλες μηδενικές καθώς δεν υπάρχει καμία ανάγκη για μετατροπή του εναλλασσόμενου ρεύματος σε συνεχές στην συγκεκριμένη εγκατάσταση.

Για το σενάριο 2 η διαστασιολόγηση του μετατροπέα μεταβλήθηκε ελάχιστα με την ισχύς να διαμορφώνεται στα 52,2 kW, ενώ στο σενάριο 3 παρέμεινε ακριβώς η ίδια με το αρχικό σενάριο.

#### 4.4 Ηλεκτρόλυση

Σύμφωνα με το εγχειρίδιο χρήσης του Homer, το μέσο κόστος της ηλεκτρόλυσης ανέρχεται στα 1500 € ανά kW. Η απόδοση του συστήματος ορίστηκε 85% ενώ ο χρόνος ζωής 15 χρόνια. Σε αυτή την περίπτωση δεν χρησιμοποιήθηκε ο αλγόριθμος Homer Optimizer αλλά ο Search Space. Εκτιμήθηκε ότι η απαιτούμενη ισχύς της ηλεκτρόλυσης θα κυμαίνεται ανάμεσα σε 350 και 380 kW.

**ELECTROLYZER**

Name: Generic Electrolyzer Abbreviation: Electrol Remove Copy To Library

Generic Electrolyzer

Properties

Name: Generic Electrolyzer  
Abbreviation: Electrolyzer  
Manufacturer: Generic  
[www.homerenergy.com](http://www.homerenergy.com)  
Notes: This is a generic electrolyzer.

Costs

Capacity (kW)	Capital (€)	Replacement (€)	O&M (€/year)
1	€1,500.00	€1,500.00	€30.00

Click here to add new item

Multiplier: (L) (L) (L)

Capacity Optimization

Size (kW)
350
360
370
380

Lifetime (years): 15.00 (L)  
Efficiency (%): 85.00 (L)  
Minimum load ratio (%): 0.00 (L)

Electrical Bus  
☐ AC ☒ DC

Step 1: Select a mode: 00:00  
☐ Forced On ☒ Optimize

Step 2: Select a time period:  
☒ All Week  
☐ Weekdays  
☐ Weekends

Step 3: Click on the chart to when the selected operating applies.

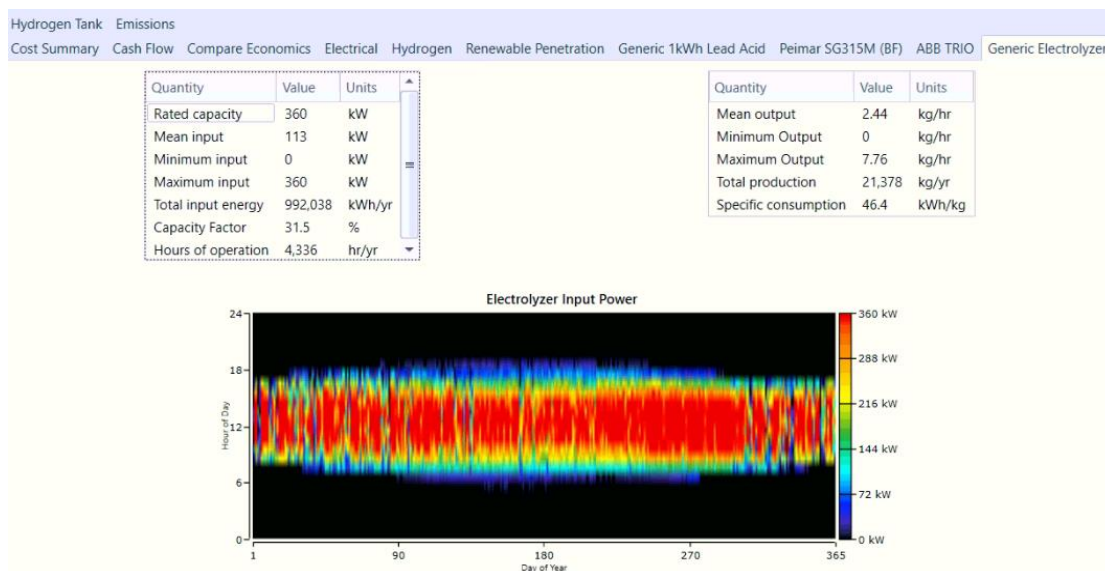
Electrolyzer Schedule

23:00

Jan Feb Mar Apr May Jun Jul Aug Sep Oct Nov Dec

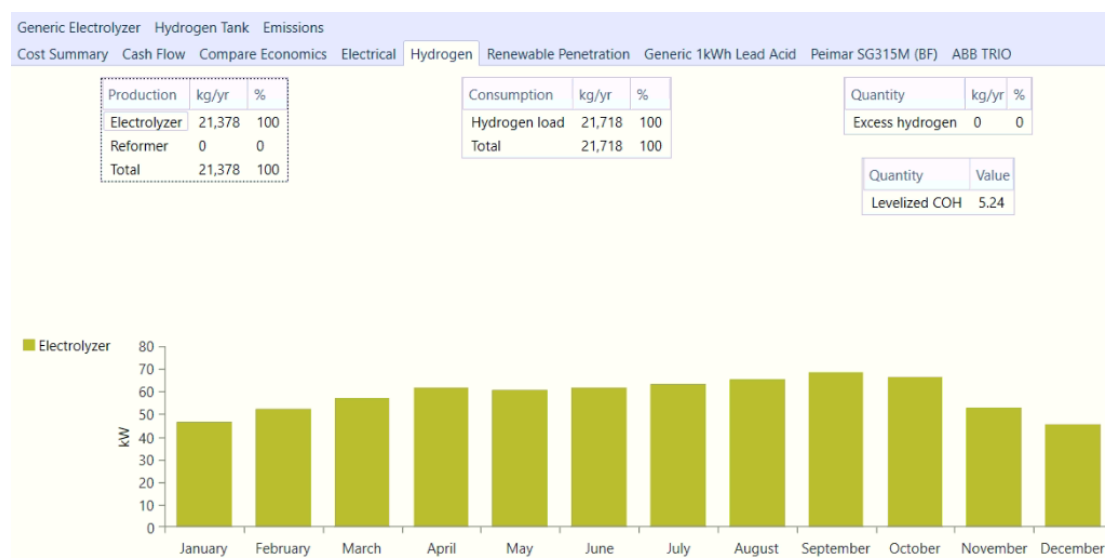
Εικόνα 32: Καρτέλα ορισμού τεχνικών χαρακτηριστικών της συσκευής ηλεκτρόλυσης

Η προσομοίωση κατέδειξε ότι η απαιτούμενη ισχύς που θα χρειαστεί η ηλεκτρόλυση για το αρχικό σενάριο είναι 360 kW. Αναλυτικότερα στοιχεία φαίνονται στην εικόνα 33.



Εικόνα 33: Αποτελέσματα προσομοίωσης για την συσκευή ηλεκτρόλυσης.

Για να μπορέσει να ικανοποιηθεί η απαίτηση του συστήματος σε υδρογόνο η συσκευή θα λειτουργεί για 4336 ώρες ετησίως. Η μέση ισχύς που θα χρειάζεται θα είναι 113 kW για την παραγωγή 21.378 kg υδρογόνου. Σύμφωνα με την προσομοίωση κάθε κιλό υδρογόνου χρειάζεται 46,4 kWh ενέργειας για να παραχθεί, με την συνολική ενέργεια ετησίως να ανέρχεται στις 992.038 kWh. Στην επόμενη εικόνα παρουσιάζονται αναλυτικά τα αποτελέσματα για την παραγωγή υδρογόνου (εικόνα 34). Οι επιπλέον πληροφορίες που παρέχει η παρακάτω καρτέλα, είναι το ανηγμένο κόστος του υδρογόνου LCOH (χωρίς να συνυπολογίζει τον συμπιεστή) και ένα ραβδόγραμμα στο οποίο παρουσιάζεται η καθαρή ισχύς που χρειάζεται μηνιαίως η συσκευή ηλεκτρόλυσης για την παραγωγή υδρογόνου.



Εικόνα 34: Παραγωγή υδρογόνου ανά έτος για το σενάριο 1

Το ανηγμένο κόστος του υδρογόνου αν συνυπολογιστούν και τα κόστη του συμπιεστή ανέρχεται στα 7,26 €/kg. Αυτό υπολογίστηκε προσθέτοντας στο υπάρχον LCOH από τα αποτελέσματα, το LCOH της συμπίεσης. Αυτό υπολογίστηκε με τον παρακάτω τύπο:

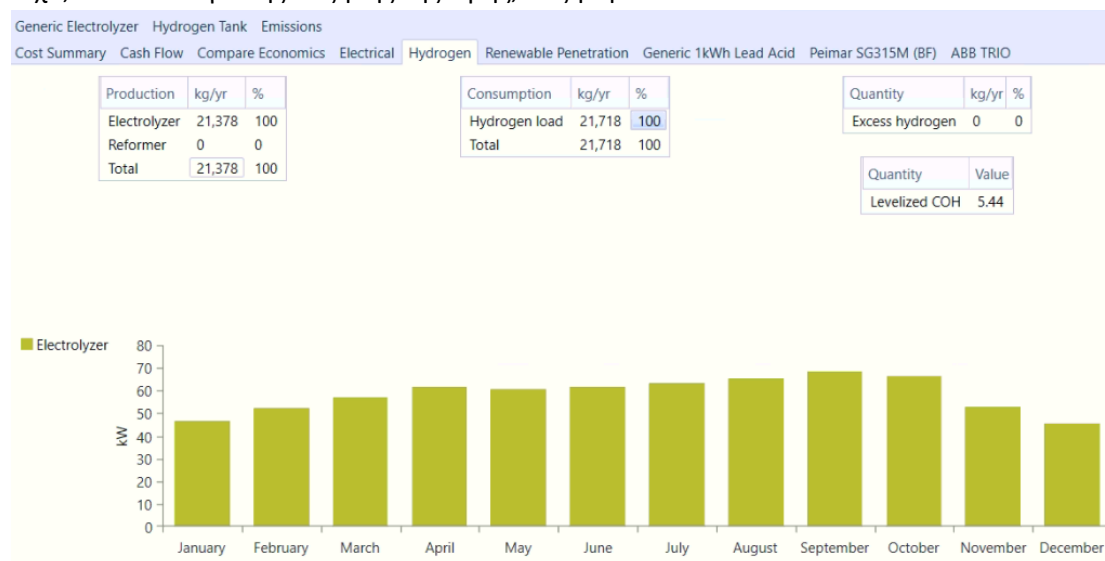
$$LCOH_{\text{συμπίεσης}} = \frac{I_0 + \sum_{t=1}^n \frac{I_t + E_t + M_t}{(1+r)^t}}{\sum_{t=1}^n \frac{H_t}{(1+r)^t}}$$

Εξίσωση 2: Υπολογισμός επίδρασης του συμπιεστή στο LCOH

Όπου:

- $I_0$  η αρχική επένδυση για τον συμπιεστή
- $I_t$  το κόστος αλλαγής εξοπλισμού στην χρονιά  $t$
- $E_t$  η το κόστος της καταναλωθείσας ενέργειας λειτουργίας του συμπιεστή με βάση το LCOE στην χρονιά  $t$
- $M_t$  το κόστος συντήρησης στην χρονιά  $t$
- $H_t$  η παραγωγή υδρογόνου στην χρονιά  $t$
- $r$  το προεξοφλητικό επιτόκιο
- $n$  ο ορίζοντας σχεδιασμού του έργου.

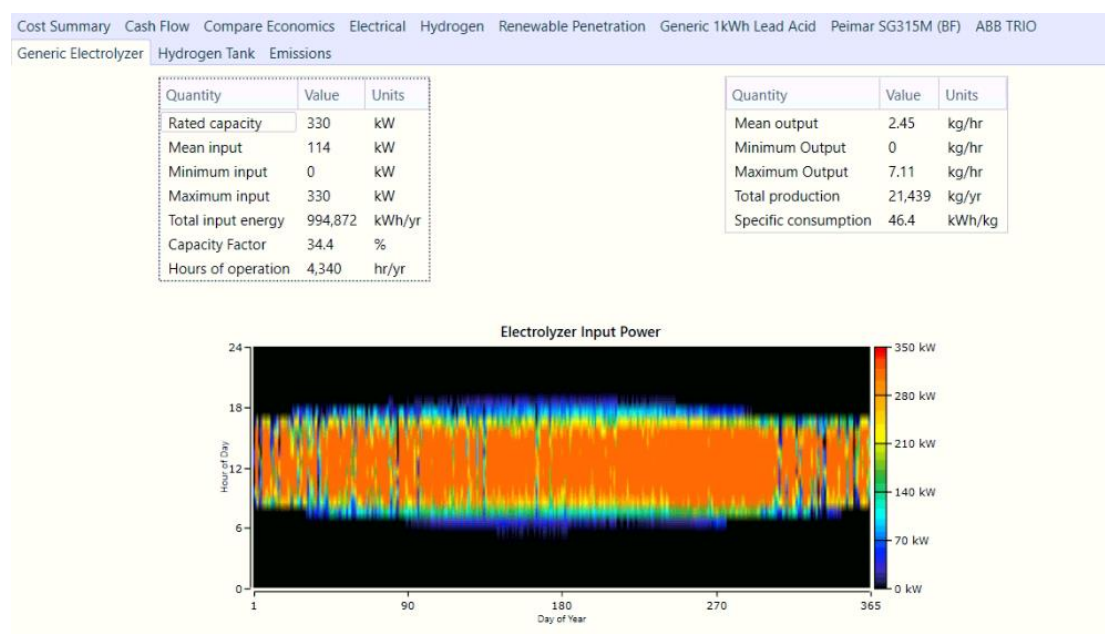
Για το σενάριο 2 η διαστασιολόγηση της συσκευής ηλεκτρόλυσης δεν άλλαξε ως προς την ισχύ, ωστόσο λόγω της αύξησης της τιμής, αυξήθηκε και το LCOH.



Εικόνα 35: Παραγωγή υδρογόνου ανά έτος για το σενάριο 2

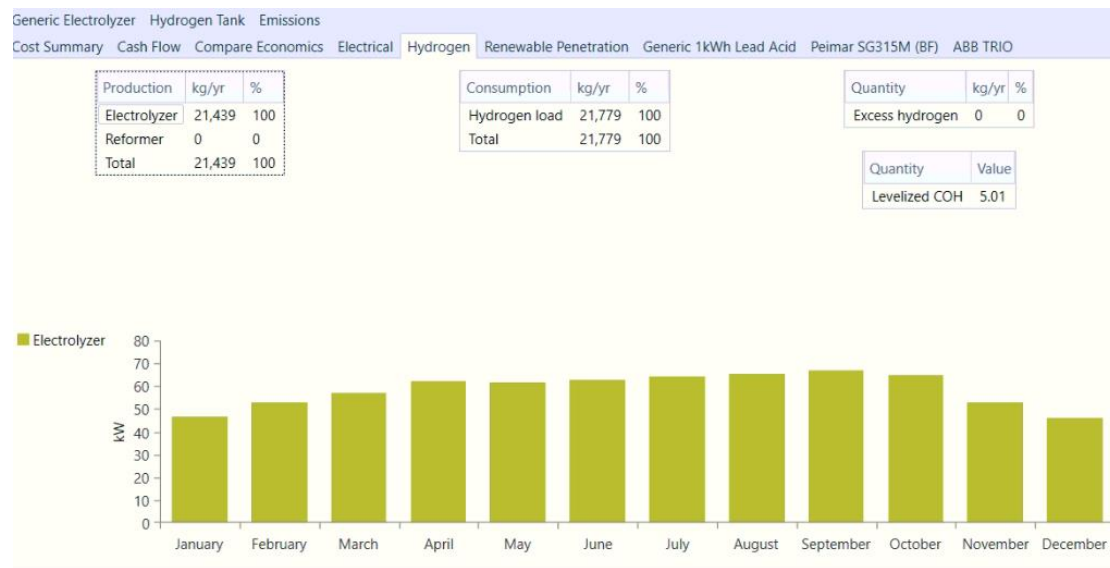
Έτσι συμπεριλαμβάνοντας και τον συμπιεστή το ανηγμένο κόστος του υδρογόνου διαμορφώνεται στα 7,47 €/kg.

Τέλος στο σενάριο 3, όπως και με τα Φ/Β η ισχύς της ηλεκτρόλυσης αλλάζει και διαμορφώνεται στα 330 kW. Παρακάτω παρουσιάζονται αναλυτικά τα αποτελέσματα (εικόνα 36).



Εικόνα 36: Αποτελέσματα προσομοίωσης της συσκευής ηλεκτρόλυσης για σενάριο 3

Αντίστοιχα μεταβλήθηκε και το LCOH όπως φαίνεται στην εικόνα 37.



Εικόνα 37: Παραγωγή υδρογόνου ανά έτος σενάριο 3

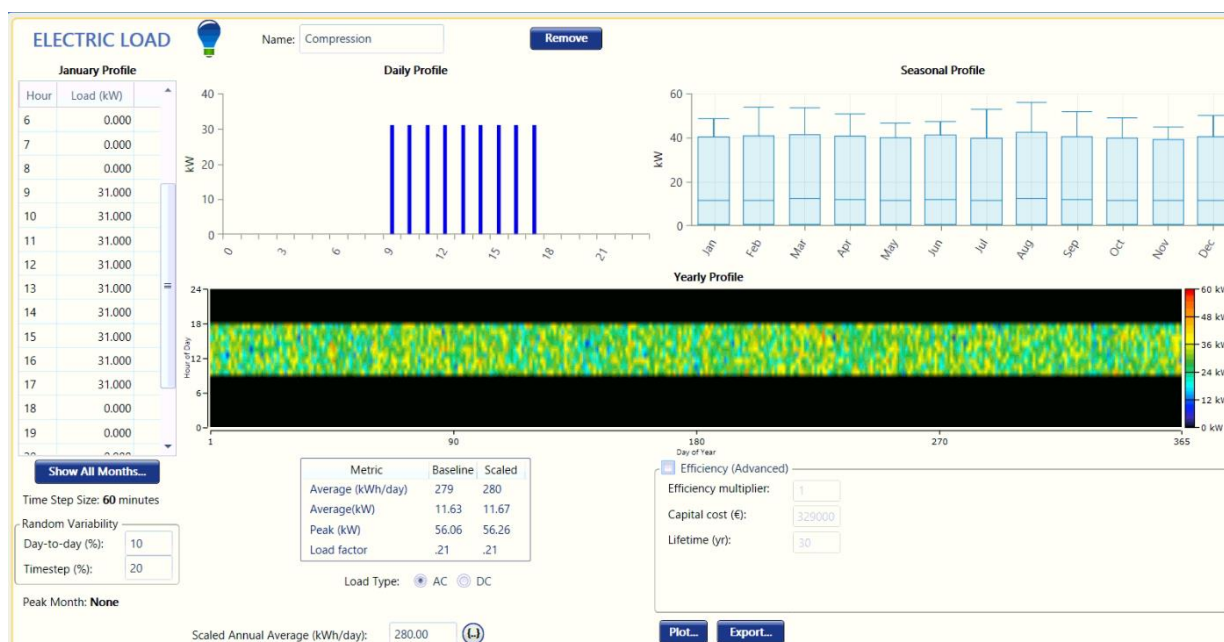
Με τον συνυπολογισμό του συμπιεστή, το LCOH ανέρχεται στα 7,01 €/kg. Παρακάτω παρατίθεται συγκεντρωτικός πίνακας των LCOE και LCOH για κάθε σενάριο:

Πίνακας 3: LCOE/LCOH για κάθε σενάριο

	Σενάριο 1	Σενάριο 2	Σενάριο 3
LCOE	0,033 €/kWh	0,036 €/kWh	0,029 €/kWh
LCOH	7,26 €/kg	7,47 €/kg	7,01 €/kg

#### 4.6 Συμπίεση

Η συμπίεση θα λειτουργεί παράλληλα με την ηλεκτρόλυση και επομένως το πρόγραμμα της ορίστηκε 9 π.μ με 5 μ.μ. Εφόσον η απαιτούμενη παραγωγή ημερησίως είναι 70 kg H<sub>2</sub> και έχει γίνει η παραδοχή ότι χρειάζονται 4 kWh/kg για την συμπίεση του υδρογόνου, από τον τύπο  $P(kW)=E(kWh)/t(h)$  υπολογίστηκε ότι η απαιτούμενη ισχύς της συμπίεσης ανέρχεται στα 31,1 kW. Συνεπώς για 31,1 kW ισχύος το συνολικό κόστος ανέρχεται στα 329.000 €. Επιπλέον ορίστηκε ότι το κόστος συντήρησης και λειτουργίας του συμπιεστή είναι 5% του αρχικού κόστους του ετησίως. Στην παρακάτω εικόνα απεικονίζονται αναλυτικά τα παραπάνω δεδομένα.



Εικόνα 38: Καρτέλα ορισμού του ηλεκτρικού φορτίου του συμπιεστή

Η προσομοίωση κατέδειξε ότι η συμπίεση απαιτεί 102.186 kWh/έτος δηλαδή περίπου το 9% της συνολικής παραγόμενης ενέργειας από τα Φ/Β. Αυτό φαίνεται στην εικόνα 26.

#### 4.5 Δεξαμενές αποθήκευσης υδρογόνου

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω οι δεξαμενές θα έχουν συμπληρωματικό χαρακτήρα καθώς σε αυτές θα αποθηκεύεται υδρογόνο το οποίο δεν θα χρησιμοποιείται, ώστε να υπάρχουν για περιπτώσεις έκτακτης ανάγκης. Η τιμή κάθε δεξαμενής ανά kg ανέρχεται στα 400€ ενώ τα κόστη αλλαγής και συντήρησης ανέρχονται στα 400€ και 15€/έτος αντίστοιχα. Ο αλγόριθμος που χρησιμοποιήθηκε για την διαστασιολόγηση ήταν ο Search Space όπου τέθηκε η τιμή 340 kg καθώς στόχος των δεξαμενών είναι να μπορούν να καλύψουν την



ζήτηση για τουλάχιστον μια εβδομάδα, σε περιπτώσεις περιορισμένης ηλιοφάνειας ή κακοκαιρίας. (Εικόνα 39)

**HYDROGEN TANK**

Name: Hydrogen Tank Abbreviation: HTank Remove Copy To Library

**Properties**

Name: **Hydrogen Tank**  
 Abbreviation: **HTank**  
 Manufacturer: **Generic**  
[www.homerenergy.com](http://www.homerenergy.com)  
 Notes: **This is a generic hydrogen tank.**

**Costs**

Size (kg)	Capital (€)	Replacement (€)	O&M (€/year)
1	€400.00	€400.00	€15.00

Click here to add new item

**Capacity Optimization**

Size (kg)
340

**Initial Tank Level**

☐ Relative to tank size (%): 0.00  
☒ Absolute amount (kg): 340.00  
☐ Require year-end tank level to equal or exceed initial tank level.

Lifetime (years): 25.00

Εικόνα 39: Καρτέλα ορισμού τεχνικών χαρακτηριστικών των δεξαμενών

Στην εικόνα 40 παρουσιάζεται αναλυτικά η λειτουργία των δεξαμενών. Η ενέργεια που μπορούν να αποθηκεύσουν είναι 11.333 kWh γεγονός που διαμορφώνει την αυτονομία των δεξαμενών στις 971 ώρες ετησίως. Το συνολικό βάρος υδρογόνου που μπορούν να φιλοξενήσουν είναι 340 kg.



Εικόνα 40: Αποτελέσματα προσομοίωσης για τις δεξαμενές

## 4.7 Συσσωρευτές Μόλυβδου – Οξέος

Τα επιμέρους χαρακτηριστικά των συσσωρευτών φαίνονται και στην παρακάτω εικόνα.

The screenshot shows the 'STORAGE' configuration window in HOMER Energy. It includes sections for Properties, Cost, Sizing, and Site Specific Input. The battery is configured as a Generic 12V Lead Acid battery with 1 kWh of energy storage. Key parameters include a nominal voltage of 12V, a nominal capacity of 1 kWh, and a maximum capacity of 83.4 Ah. The cost is set at 30.00 €/kWh. The sizing is configured for HOMER Optimizer with a search space. The site specific input shows a string size of 1 and a voltage of 12V.

**Properties**

- Kinetic Battery Model**
- Nominal Voltage (V): 12
- Nominal Capacity (kWh): 1
- Maximum Capacity (Ah): 83.4
- Capacity Ratio: 0.403
- Rate Constant (1/hr): 0.827
- Roundtrip efficiency (%): 80
- Maximum Charge Current (A): 16.7
- Maximum Discharge Current (A): 24.3
- Maximum Charge Rate (A/Ah): 1

**Cost**

Quantity	Capital (€)	Replacement (€)	O&M (€/year)
1	30.00	30.00	0.00

**Lifetime**

time (years)	throughput (kWh)
10.00	800.00

**Sizing**

- ☒ HOMER Optimizer<sup>™</sup>
- ☐ Search Space
- ☐ Advanced

**Site Specific Input**

String Size: 1 Voltage: 12 V

Initial State of Charge (%): 100.00

Minimum State of Charge (%): 40.00

☐ Minimum storage life (yrs): 5.00

[www.homerenergy.com](http://www.homerenergy.com)

This is a generic 12 volt lead acid battery with 1 kWh of energy storage.

Generic [homerenergy.com](http://homerenergy.com) HOMER Energy

Εικόνα 41: Καρτέλα ορισμού τεχνικών χαρακτηριστικών των συσσωρευτών

Οι συσσωρευτές που θα τοποθετηθούν για την αποθήκευση της περίσσειας ηλεκτρικού ρεύματος είναι 207 και έχουν την δυνατότητα αποθήκευσης 1 kWh έκαστος. Θα χρησιμοποιηθούν για την κάλυψη λειτουργικών αναγκών της εγκατάστασης που δεν έχουν μεγάλες ενεργειακές απαιτήσεις όπως του φωτισμού, αλλά παράλληλα θα εξυπηρετούν την διεργασία της συμπίεσης σε περυπτώσεις που η ενέργεια από τα Φ/Β δεν επαρκεί για να καλύψει την απαίτηση. Παρακάτω παρατίθεται το αποτέλεσμα της προσομοίωσης. (εικόνα 42).



Εικόνα 42: Αποτελέσματα προσομοίωσης για τους συσσωρευτές

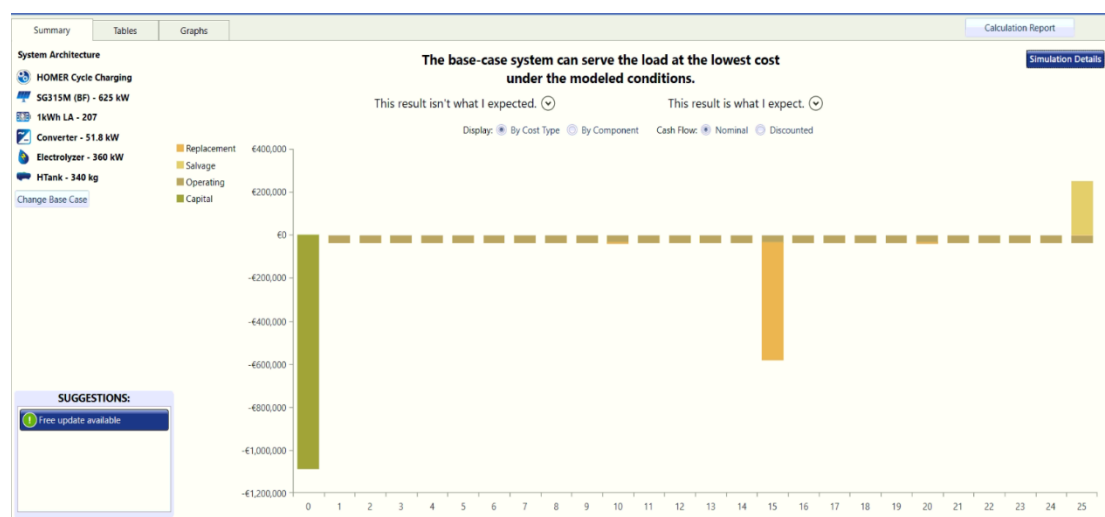
Θα χρησιμοποιούν ρεύμα τάσεως 12V, θα έχουν αυτονομία 10,7 ώρες και θα παρέχουν 3124 kWh ρεύματος ετησίως από τις 3868 kWh που θα δέχονται, δηλαδή με μια απόδοση της τάξεως του 80%. Επιπλέον παρατίθενται διαγράμματα συχνότητας και κατάστασης φόρτισης.

Στο σενάριο 3 οι συσσωρευτές που θα τοποθετηθούν θα είναι ίδιοι σε αριθμό με το αρχικό σενάριο, ενώ στο σενάριο 2 θα τοποθετηθούν 3 μονάδες λιγότερες οι οποίες δεν δημιουργούν αξιοσημείωτη διαφορά στην συνολική ποσότητα αποθήκευσης σε σχέση με το σενάριο 1.

## Σύνοψη

Από την στιγμή που επιλεγεί το πλήκτρο έναρξης της προσομοίωσης, το λογισμικό ξεκινά να εξετάζει όλα τα εφικτά σενάρια υλοποίησης του προβλήματος που έχει τεθεί, χρησιμοποιώντας τους αλγόριθμους που έχουν οριστεί. Στην συνέχεια επιλέγει και παρουσιάζει στα αποτελέσματα την λύση η οποία μπορεί να εξυπηρετήσει το βασικό φορτίο με το χαμηλότερο δυνατό κόστος.

Η πρώτη καρτέλα των αποτελεσμάτων ονομάζεται SUMMARY, δηλαδή σύνοψη, όπου παρουσιάζονται τα μεγέθη των εξαρτημάτων της εγκατάστασης και ένα διάγραμμα οικονομικών δεδομένων (εικόνα 43).



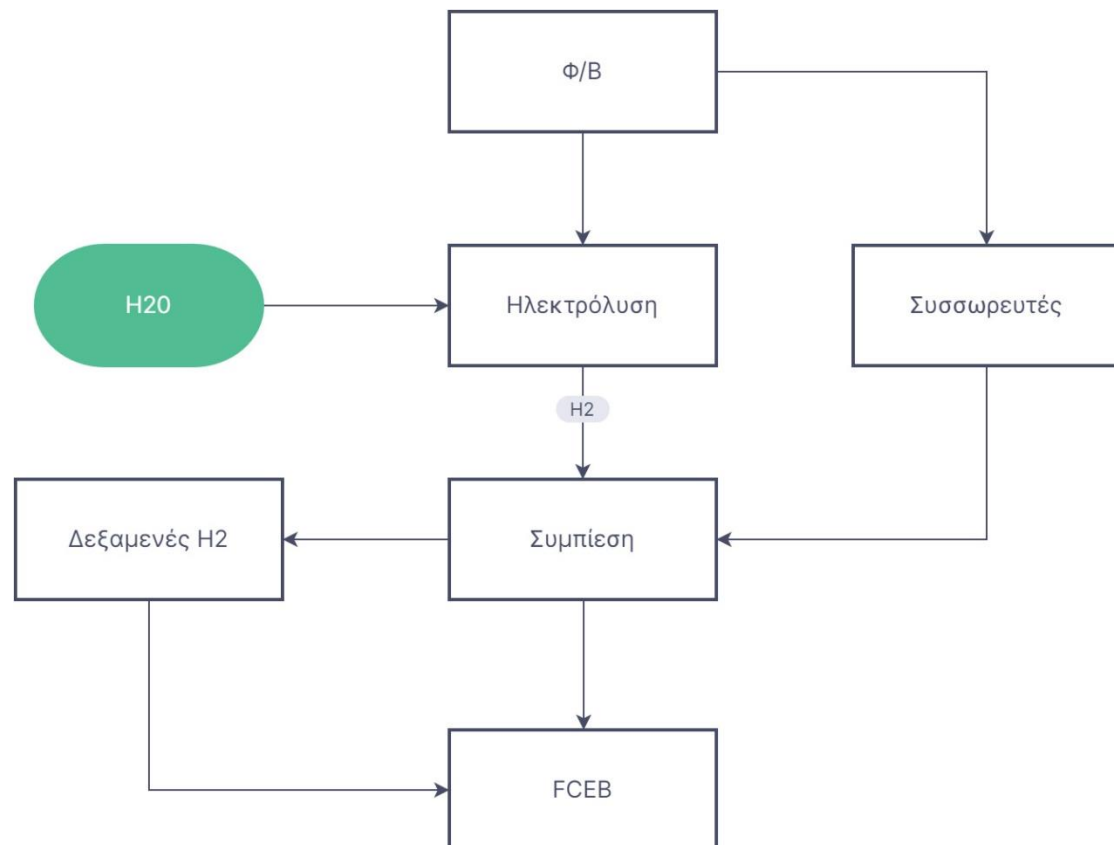
Εικόνα 43: Καρτέλα SUMMARY για το σενάριο 1

Αναλυτικότερα, στην αριστερή πλευρά παρουσιάζονται κατά σειρά τα μεγέθη των επιλεγμένων εξαρτημάτων και ο αλγόριθμος που χρησιμοποιήθηκε για την διαστασιολόγηση τους. Στην συγκεκριμένη περίπτωση επιλέχθηκε ο HOMER Cycle Charging για την βέλτιστη λύση. Αξίζει ωστόσο να αναφερθεί πως το λογισμικό στις προσομοιώσεις χρησιμοποίησε και τον αλγόριθμο Lead Following, αλλά απέρριψε τις εν λόγω λύσεις. Σύμφωνα με τον αλγόριθμο Cycle Charging οι διαστάσεις του μηχανολογικού εξοπλισμού για κάθε σενάριο έχουν ως εξής:

Πίνακας 4: Διαστάσεις εξοπλισμού για κάθε σενάριο

Εξοπλισμός	Σενάριο 1	Σενάριο 2	Σενάριο 3
Φωτοβολταϊκά	625 kW	625 kW	700 kW
Συσσωρευτές	207 μονάδες	204 μονάδες	207 μονάδες
Μετατροπέας	51,8 kW	52,2 kW	51,8 kW
Ηλεκτρόλυση	360 kW	360 kW	330 kW
Δεξαμενές H <sub>2</sub>	340 kg	340 kg	340 kg
Συμπίεστής	31,1 kW	31,1 kW	31,1 kW

Στην δεξιά πλευρά παρουσιάζεται ένα οικονομικό διάγραμμα το οποίο περιέχει τα κόστη αγοράς, συντήρησης και επισκευής της εγκατάστασης και τις λογιστικές αποσβέσεις του μηχανολογικού εξοπλισμού στο τέλος της διάρκειας ζωής του έργου. Πιο συγκεκριμένα με πράσινο χρώμα συμβολίζεται το αρχικό κεφάλαιο για την αγορά του εξοπλισμού, με καφέ τα κόστη για την λειτουργία, με πορτοκαλί το κόστος της αντικατάστασης του εξοπλισμού ο οποίος έχει φτάσει στο τέλος του χρόνου ζωής του και με κίτρινο οι λογιστικές αποσβέσεις. Στην καρτέλα TABLES, παρουσιάζονται τα ίδια στοιχεία σε μορφή πινάκων. Παρακάτω παρουσιάζεται το διάγραμμα ροής της εγκατάστασης.



Διάγραμμα 6: Διάγραμμα ροής εγκατάστασης

#### 4.8 Οικονομική ανάλυση

Η συγκεκριμένη εργασία πραγματεύεται την αντικατάσταση συμβατικών λεωφορείων, με λεωφορεία τεχνολογίας κυψελίδας καυσίμου και την ανάπτυξη υποδομής για την τροφοδοσία τους. Ωστόσο για να γίνει αυτό το εγχείρημα εφικτό πρέπει να είναι και οικονομικά συμφέρον για την εταιρεία που αναλαμβάνει το κόστος κατασκευής. Στους παρακάτω πίνακες παρουσιάζονται τα κόστη του εξοπλισμού όπως υπολογίστηκαν από το πρόγραμμα HOMER για το κάθε σενάριο.

Πίνακας 5: Πίνακας εύρεσης καθαρού παρόντος κόστους για το σενάριο 1

Εξάρτημα	Κεφάλαιο (€)	Αντικατάσταση (€)	Συντήρηση (€)	Απόσβεση (€)	Καθαρό παρόν κόστος (€)
Μετατροπέας	7800	5000	27.500	1300	39.000
Μπαταρίες	6200	8000	0	1500	12.700
Ηλεκτρόλυση	540.000	350.000	190.000	87.000	993.000
Δεξαμενές αποθήκευσης	136.000	0	90.000	0	226.000
Συμπιεστής	329.000	0	412.000	30.000	711.000
Φωτοβολταϊκά	400.000	0	329.000	32.000	697.000
<b>Σύστημα</b>	<b>1.419.000</b>	<b>363.000</b>	<b>1.048.000</b>	<b>151.800</b>	<b>2.678.700</b>

Πίνακας 6: Πίνακας εύρεσης καθαρού παρόντος κόστους για το σενάριο 2

Εξάρτημα	Κεφάλαιο (€)	Αντικατάσταση (€)	Συντήρηση (€)	Απόσβεση (€)	Καθαρό παρόν κόστος (€)
Μετατροπέας	7800	5000	27.500	1300	39.000
Μπαταρίες	6100	8000	0	1500	12.600
Ηλεκτρόλυση	540.000	350.000	190.000	87.000	993.000
Δεξαμενές αποθήκευσης	136.000	0	90.000	0	226.000
Συμπιεστής	329.000	0	412.000	30.000	711.000
Φωτοβολταϊκά	480.000	0	329.000	39.000	770.000
<b>Σύστημα</b>	<b>1.624.000</b>	<b>363.000</b>	<b>1.048.000</b>	<b>158.800</b>	<b>2.751.000</b>

Πίνακας 7: Πίνακας εύρεσης καθαρού παρόντος κόστους για το σενάριο 3

Εξάρτημα	Κεφάλαιο (€)	Αντικατάσταση (€)	Συντήρηση (€)	Απόσβεση (€)	Καθαρό παρόν κόστος (€)
Μετατροπέας	7800	5000	27.500	1300	39.000
Μπαταρίες	6200	8000	0	1500	12.700
Ηλεκτρόλυση	495.000	320.000	175.000	80.000	910.000
Δεξαμενές αποθήκευσης	136.000	0	90.000	0	226.000
Συμπιεστής	329.000	0	412.000	30.000	711.000
Φωτοβολταϊκά	358.000	0	368.000	29.000	697.000
<b>Σύστημα</b>	<b>1.332.000</b>	<b>333.000</b>	<b>1.072.500</b>	<b>141.800</b>	<b>2.595.700</b>

Επιπλέον, η ποσότητα καυσίμου που καταναλώνει ένα συμβατικό λεωφορείο για την εκτέλεση της διαδρομής ανέρχεται στους 40 TN ετησίως. Για δύο λεωφορεία αυτό μεταφράζεται σε κόστος 125.000 €/έτος με την τιμή του πετρελαίου κίνησης στα 1,475 €/L. Το συγκεκριμένο κόστος εξοικονομείται με την λειτουργία της εγκατάστασης και στους παρακάτω πίνακες παρουσιάζεται ως κέρδος. Επιπλέον είναι γνωστό από το HOMER ότι τα ονομαστικά κόστη για την συντήρηση ανέρχονται στα:

- 41.920 €/έτος για το σενάριο 1 και το σενάριο 2
- 42.900 €/έτος για το σενάριο 3

ενώ στο 15<sup>ο</sup> έτος υπάρχει το κόστος της αντικατάστασης κάποιων εξαρτημάτων που ανέρχεται στα 363.000 € για το αρχικό σενάριο και το σενάριο 1 και 333.000€ για το σενάριο 2. Τέλος θεωρήθηκε ότι οι τιμές των εισιτηρίων για την εν λόγω διαδρομή θα παραμείνουν οι ίδιες (0,8€/άτομο/διαδρομή) και ότι θα εξυπηρετούνται 1000 φοιτητές καθημερινά για διάστημα 8 μηνών. Το κόστος αγοράς και για τα δύο λεωφορεία ανέρχεται στα 1.300.000 € και έτσι το συνολικό αρχικό κεφάλαιο διαμορφώνεται στα :

- 2.719.000 € για το σενάριο 1
- 2.924.000 € για το σενάριο 2
- 2.632.000 € για το σενάριο 3

Η συγκεκριμένη επένδυση αξιολογήθηκε με την μέθοδο της Καθαρής Παρούσας Αξίας NPV. Σύμφωνα με αυτή, για να είναι συμφέρουσα μια επένδυση πρέπει τα προεξοφλημένα έσοδα να είναι ίσα με τα προεξοφλημένα έξοδα. Στην στήλη CFt παρουσιάζεται το ισοζύγιο εσόδων-εξόδων για κάθε έτος, ενώ στην αμέσως δεξιά στήλη παρουσιάζεται το προεξοφλημένο ισοζύγιο με προεξοφλητικό επιτόκιο 5% χρησιμοποιώντας τον τύπο:

$$\frac{CFt}{(1+d)^t} \text{ (Εξίσωση 3: Υπολογισμός προεξοφλημένων CFt)}$$

όπου d το προεξοφλητικό επιτόκιο και t το έτος. Συνεπώς η καθαρή παρούσα αξία υπολογίζεται αθροίζοντας όλα τα δεδομένα της τελευταίας στήλης. Παράλληλα στην στήλη «Σωρευτικές ΚΤΡ» παρουσιάζονται αθροιστικά οι μη προεξοφλημένες ροές χρήματων ανά έτος (δηλαδή χωρίς να συνυπολογίζεται το προεξοφλητικό επιτόκιο), ενώ στην στήλη «Προεξοφλημένες ΚΤΡ» παρουσιάζονται τα προεξοφλημένα κέρδη της επένδυσης χρησιμοποιώντας τον τύπο:

$$ΠΚΤΡ = \frac{\text{Καθαρές Ταμειακές Ροές}}{(1+d)^t} \text{ (Εξίσωση 4: Υπολογισμός «ΠΚΤΡ»)}$$

Τέλος στην στήλη «Αθροιστική ΠΚΤΡ» φαίνονται οι προεξοφλημένες ροές χρημάτων αθροιστικά για κάθε χρόνο της επένδυσης. Μέσω αυτής επίσης φαίνεται και το έτος απόσβεσης της αρχικής επένδυσης, στο σημείο όπου οι αρνητικές τιμές γίνονται θετικές.

Πίνακας 8: Πίνακας υπολογισμού NPV για το σενάριο 1

Έτος	Ονομαστικό κόστος €	Εξοικονόμηση από καύσιμα €	έσοδα εισιτηρίων €	Καθαρές Ταμειακές Ροές €	Σωρευτικές ΚΤΡ €	Προεξοφλημένες ΚΤΡ €	Αθροιστική ΠΙ CFt €	CFt/(1+d) <sup>t</sup> €
0	-2719000			0	-2719000		-2719000	-2719000
1	-41920	125000	256000	381000	-2379920	362857.1429	-2356142.86	339080
2	-41920	125000	256000	381000	-2040840	345578.2313	-2010564.63	339080
3	-41920	125000	256000	381000	-1701760	329122.125	-1681442.5	339080
4	-41920	125000	256000	381000	-1362680	313449.6429	-1367992.86	339080
5	-41920	125000	256000	381000	-1023600	298523.4694	-1069469.39	339080
6	-41920	125000	256000	381000	-684520	284308.0661	-785161.322	339080
7	-41920	125000	256000	381000	-345440	270769.5868	-514391.736	339080
8	-41920	125000	256000	381000	-6360	257875.7969	-256515.939	339080
9	-41920	125000	256000	381000	332720	245595.9971	-10919.9416	339080
10	-41920	125000	256000	381000	671800	233900.9496	222981.008	339080
11	-41920	125000	256000	381000	1010880	222762.8091	445743.8172	339080
12	-41920	125000	256000	381000	1349960	212155.0563	657898.8735	339080
13	-41920	125000	256000	381000	1689040	202052.4346	859951.3081	339080
14	-41920	125000	256000	381000	2028120	192430.8901	1052382.198	339080
15	-404920	125000	256000	381000	2004200	183267.5144	1235649.713	-23920
16	-41920	125000	256000	381000	2343280	174540.4899	1410190.202	339080
17	-41920	125000	256000	381000	2682360	166229.038	1576419.24	339080
18	-41920	125000	256000	381000	3021440	158313.3695	1734732.61	339080
19	-41920	125000	256000	381000	3360520	150774.6376	1885507.248	339080
20	-41920	125000	256000	381000	3699600	143594.893	2029102.141	339080
21	-41920	125000	256000	381000	4038680	136757.0409	2165859.181	339080
22	-41920	125000	256000	381000	4377760	130244.8009	2296103.982	339080
23	-41920	125000	256000	381000	4716840	124042.6675	2420146.65	339080
24	-41920	125000	256000	381000	5055920	118135.8738	2538282.524	339080
25	-41920	125000	256000	381000	5395000	112510.356	2650792.88	339080
NPV								1785234.25

Πίνακας 9: Πίνακας υπολογισμού NPV για το σενάριο 2

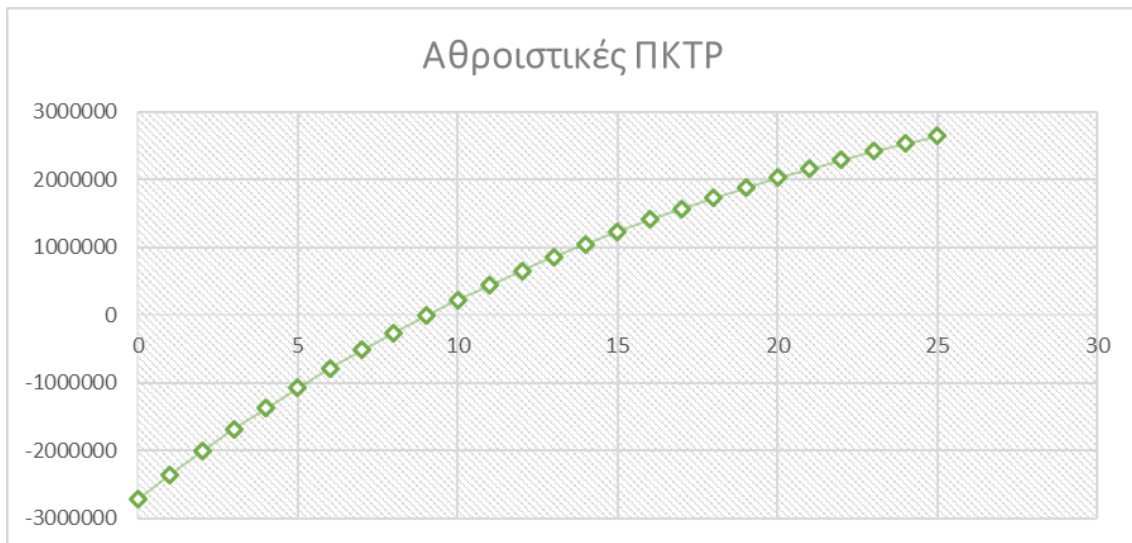
Έτος	Ονομαστικό κόστος €	Εξοικονόμηση από καύσιμα €	έσοδα εισιτηρίων €	Καθαρές Ταμειακές Ροές €	Σωρευτικές ΚΤΡ €	Προεξοφλημένες ΚΤΡ €	Αθροιστική ΠΙ CFt €	CFt/(1+d) <sup>t</sup> €
0	-2924000			0	-2924000		-2924000	-2924000
1	-41920	125000	256000	381000	-2584920	362857.1429	-2561142.86	339080
2	-41920	125000	256000	381000	-2245840	345578.2313	-2215564.63	339080
3	-41920	125000	256000	381000	-1906760	329122.125	-1886442.5	339080
4	-41920	125000	256000	381000	-1567680	313449.6429	-1572992.86	339080
5	-41920	125000	256000	381000	-1228600	298523.4694	-1274469.39	339080
6	-41920	125000	256000	381000	-889520	284308.0661	-990161.322	339080
7	-41920	125000	256000	381000	-550440	270769.5868	-719391.736	339080
8	-41920	125000	256000	381000	-211360	257875.7969	-461515.939	339080
9	-41920	125000	256000	381000	127720	245595.9971	-215919.942	339080
10	-41920	125000	256000	381000	466800	233900.9496	17981.00802	339080
11	-41920	125000	256000	381000	805880	222762.8091	240743.8172	339080
12	-41920	125000	256000	381000	1144960	212155.0563	452898.8735	339080
13	-41920	125000	256000	381000	1484040	202052.4346	654951.3081	339080
14	-41920	125000	256000	381000	1823120	192430.8901	847382.1982	339080
15	-404920	125000	256000	381000	1799200	183267.5144	1030649.713	-23920
16	-41920	125000	256000	381000	2138280	174540.4899	1205190.202	339080
17	-41920	125000	256000	381000	2477360	166229.038	1371419.24	339080
18	-41920	125000	256000	381000	2816440	158313.3695	1529732.61	339080
19	-41920	125000	256000	381000	3155520	150774.6376	1680507.248	339080
20	-41920	125000	256000	381000	3494600	143594.893	1824102.141	339080
21	-41920	125000	256000	381000	3833680	136757.0409	1960859.181	339080
22	-41920	125000	256000	381000	4172760	130244.8009	2091103.982	339080
23	-41920	125000	256000	381000	4511840	124042.6675	2215146.65	339080
24	-41920	125000	256000	381000	4850920	118135.8738	2333282.524	339080
25	-41920	125000	256000	381000	5190000	112510.356	2445792.88	339080
NPV								1580234.25



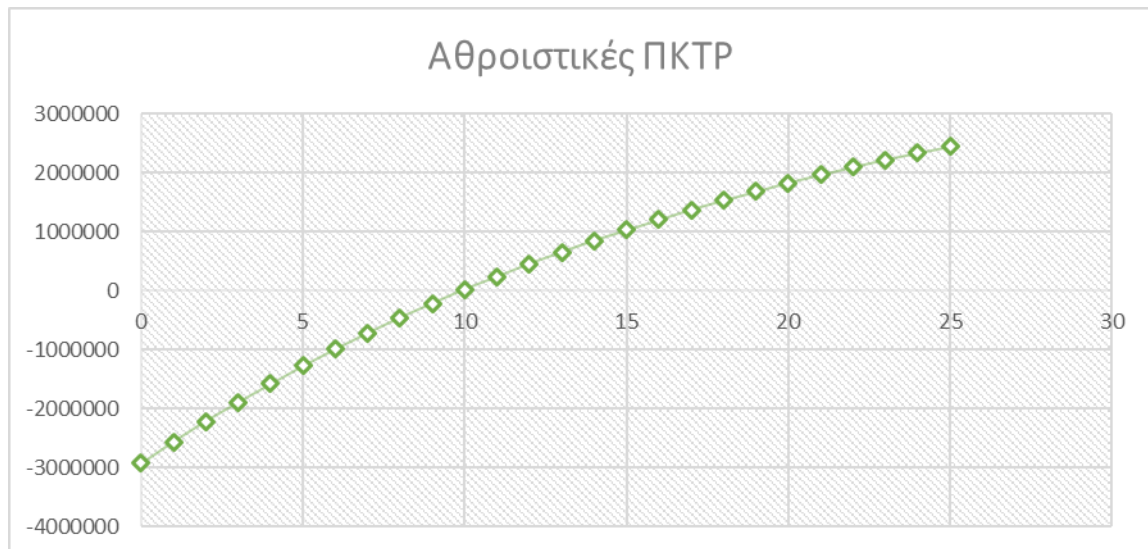
Πίνακας 10: Πίνακας υπολογισμού NPV για το σενάριο 3

Έτος	Ονομαστικό κόστος €	Εξοικονόμηση από καύσιμα €	έσοδα εισιτηρίων €	Καθαρές Ταμειακές Ροές €	Σωρευτικές ΚΤΡ €	Προεξοφλημένες ΚΤΡ €	Αθροιστική ΠΚΤΡ €	CFt/(1+d) <sup>t</sup> €
0	-2632000			0	-2632000		-2632000	-2632000
1	-42900	125000	256000	381000	-2293900	362857.1429	-2269142.86	338100
2	-42900	125000	256000	381000	-1955800	345578.2313	-1923564.63	338100
3	-42900	125000	256000	381000	-1617700	329122.125	-1594442.5	338100
4	-42900	125000	256000	381000	-1279600	313449.6429	-1280992.86	338100
5	-42900	125000	256000	381000	-941500	298523.4694	-982469.388	338100
6	-42900	125000	256000	381000	-603400	284308.0661	-698161.322	338100
7	-42900	125000	256000	381000	-265300	270769.5868	-427391.736	338100
8	-42900	125000	256000	381000	72800	257875.7969	-169515.939	338100
9	-42900	125000	256000	381000	410900	245595.9971	76080.05842	338100
10	-42900	125000	256000	381000	749000	233900.9496	309981.008	338100
11	-42900	125000	256000	381000	1087100	222762.8091	532743.8172	338100
12	-42900	125000	256000	381000	1425200	212155.0563	744898.8735	338100
13	-42900	125000	256000	381000	1763300	202052.4346	946951.3081	338100
14	-42900	125000	256000	381000	2101400	192430.8901	1139382.198	338100
15	-372900	125000	256000	381000	2109500	183267.5144	1322649.713	8100
16	-42900	125000	256000	381000	2447600	174540.4899	1497190.202	338100
17	-42900	125000	256000	381000	2785700	166229.038	1663419.24	338100
18	-42900	125000	256000	381000	3123800	158313.3695	1821732.61	338100
19	-42900	125000	256000	381000	3461900	150774.6376	1972507.248	338100
20	-42900	125000	256000	381000	3800000	143594.893	2116102.141	338100
21	-42900	125000	256000	381000	4138100	136757.0409	2252859.181	338100
22	-42900	125000	256000	381000	4476200	130244.8009	2383103.982	338100
23	-42900	125000	256000	381000	4814300	124042.6675	2507146.65	338100
24	-42900	125000	256000	381000	5152400	118135.8738	2625282.524	338100
25	-42900	125000	256000	381000	5490500	112510.356	2737792.88	338100
NPV								1874585.15

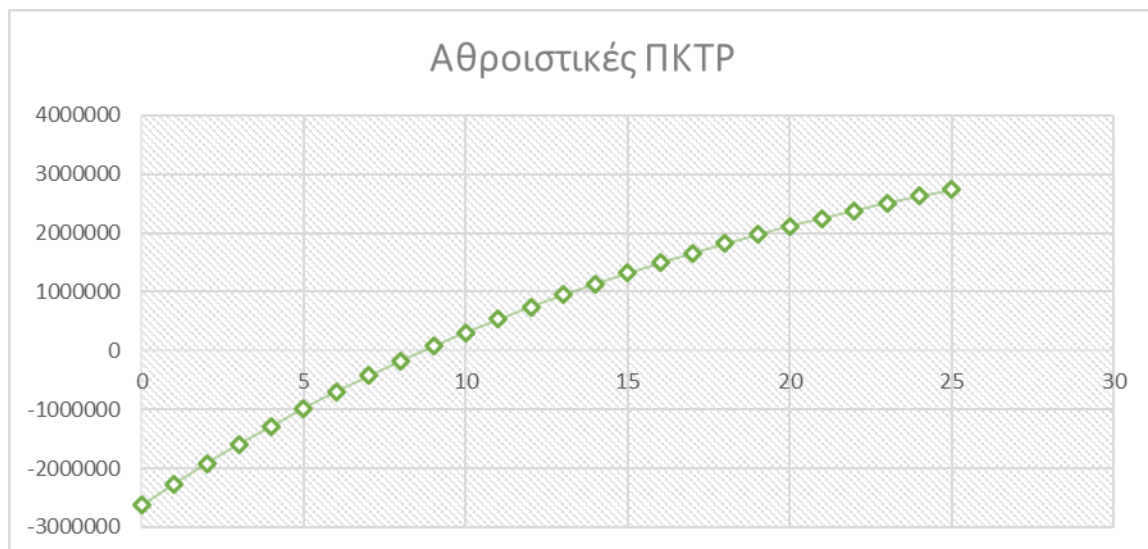
Η καθαρή παρούσα αξία της επένδυσης για την κατασκευή του έργου (NPV: Net Present Value) είναι θετική και στα τρία σενάρια. Στα επόμενα διαγράμματα φαίνονται οι Αθροιστικές Προεξοφλημένες Καθαρές Ταμειακές Ροές για τον χρονικό ορίζοντα των 25 ετών σε κάθε σενάριο.



Διάγραμμα 7: Αθροιστικές ΠΚΤΡ του έργου για το σενάριο 1



Διάγραμμα 9: Αθροιστικές ΠΚΤΡ για σενάριο 2



Διάγραμμα 8: Αθροιστικές ΠΚΤΡ για σενάριο 3

Η απόσβεση των επενδύσεων στο αρχικό και στο σενάριο 2 θα έχει γίνει μεταξύ 8<sup>ου</sup> και 9<sup>ου</sup> έτους, ενώ στην περίπτωση του σεναρίου 3 αυτό θα συμβεί μεταξύ 7<sup>ου</sup> και 8<sup>ου</sup>. Ακολούθως υπολογίστηκε και ο εσωτερικός δείκτης αποδοτικότητας (IRR) για κάθε σενάριο. Ο εσωτερικός συντελεστής απόδοσης (IRR) χρησιμοποιείται στη χρηματοοικονομική ανάλυση για την εκτίμηση της απόδοσης επενδύσεων. Ο IRR πρακτικά είναι το προεξοφλητικό επιτόκιο που καθιστά την καθαρή παρούσα αξία (NPV) όλων των ταμειακών ροών ίση με το μηδέν σε μια ανάλυση προεξοφλημένων ταμειακών ροών. Ουσιαστικά ο IRR το αναμενόμενο κέρδος που μπορεί να αποκομίσει ο επενδυτής επί του αρχικού επενδυθέντος κεφαλαίου.

Πίνακας 11: Κριτήρια αξιολόγησης σεναρίων

Κριτήρια αξιολόγησης	Αρχικό σενάριο	Σενάριο 1	Σενάριο 2
NPV	1.783.234,25 €	1.580.234,25 €	1.874.585,15 €
IRR	11 %	10 %	10 %

## **5.Συζήτηση**

Σύμφωνα με τα παραπάνω αποτελέσματα, το εγχείρημα της ανάπτυξης υποδομής για την αντικατάσταση των συμβατικών λεωφορείων με λεωφορεία υδρογόνου παρουσιάζει αρκετά πλεονεκτήματα, χωρίς όμως να απουσιάζουν και τα μειονεκτήματα.

Αρχικά, με την χρήση των καινούριων οχημάτων μηδενίζονται οι ετήσιες εκπομπές καυσαερίων που παράγονται λόγω της καθημερινής χρήσης. Συγκεκριμένα τα υπάρχοντα λεωφορεία παράγουν 915 g/km CO<sub>2</sub>, 0,41 g/km NO<sub>x</sub>, 0,08 g/km NO<sub>2</sub> [59], με το συνολικό μήκος κάθε διαδρομής να είναι 13,3 km. Έτσι κάθε χρόνο θα αποσοβούνται 10,02 TN CO<sub>2</sub>, 44,9 kg NO<sub>x</sub> και 8,8 kg NO<sub>2</sub>,

Όσο αφορά στην διαστασιολόγηση της εγκατάστασης, παρατηρείται ότι και στα τρία σενάρια διατίμησης των Φ/Β δεν προκαλείται μεγάλη μεταβολή στον εξοπλισμό. Συγκεκριμένα στις περιπτώσεις του σεναρίου 1 και του σεναρίου 2, οι διαστάσεις των εξαρτημάτων είναι πανομοιότυπες, με την μόνη διαφορά να παρατηρείται στην μείωση του αριθμού των συσσωρευτών κατά τρεις μονάδες και στην αύξηση της ισχύος του μετατροπέα κατά περίπου 1 kW. Σαφώς αυτές οι αλλαγές μπορούν να θεωρηθούν και αμελητέες καθώς δεν προκαλούν σημαντική διαφορά στην λειτουργία της εγκατάστασης. Στο σενάριο 3 ωστόσο, λόγω της μείωσης της τιμής των Φ/Β το πρόγραμμα επιλέγει αυξήσει την συνολική τους ισχύ, ούτως ώστε να μειώσει την ισχύ της ηλεκτρολύσης η οποία έχει πολύ μεγαλύτερο κόστος ανά kW.

Από οικονομικής απόψεως και τα τρία σενάρια μπορούν να θεωρηθούν πολύ αποδοτικές επενδύσεις καθώς οι καθαρές παρούσες αξίες είναι θετικές. Επιπλέον όλα τα σενάρια έχουν IRR 10-11% γεγονός που σημαίνει ότι οι επενδύσεις παρουσιάζουν ικανοποιητικό ποσοστό κέρδους. Συνεπώς η διατίμηση της τιμής των Φ/Β δεν επηρεάζει σημαντικά την συγκεκριμένη επένδυση, παράγοντας που μειώνει το συνολικό της ρίσκο. Ωστόσο η περίπτωση του σεναρίου 3, δηλαδή της μείωσης της τιμής των Φ/Β κατά 20%, είναι σαφώς η πιο ευνοϊκή. Η αποπληρωμή του έργου γίνεται ένα χρόνο πιο σύντομα από τα άλλα δύο σενάρια, ενώ αποφέρει και τα μεγαλύτερα κέρδη στο τέλος του ορίζοντα σχεδιασμού. Τέλος, τα χρήματα που θα εξοικονομούνται από την απουσία της ανάγκης για αγορά καυσίμου για την κίνηση των οχημάτων, μπορούν να αποτελέσουν μεγάλο κίνητρο για οποιαδήποτε εταιρία ΚΤΕΛ αποφασίσει να επενδύσει στην εν λόγω τεχνολογία, καθώς το κόστος τους είναι μεγάλο και οι τιμές τους παρουσιάζουν αυξητικές τάσεις.

Σχετικά με τα ανηγμένα κόστη παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και υδρογόνου, δεν παρατηρούνται σημαντικές διαφορές ανάμεσα στα σενάρια. Το LCOH κυμαίνεται ανάμεσα στα 7,01-7,47 €/kg H<sub>2</sub>, ενώ το LCOE στα 0,029-0,036 €/kWh. Τόσο το LCOE όσο και το LCOH επηρεάζονται άμεσα από την τιμή των Φ/Β και συνεπώς οι χαμηλότερες τιμές προκύπτουν από το σενάριο 3, ενώ οι μεγαλύτερες στο σενάριο 2. Σύμφωνα με την βιβλιογραφία ισχύει ότι για αυτόνομες εγκαταστάσεις παραγωγής υδρογόνου με ηλεκτρόλυση από Φ/Β και σύστημα διανομής με σωλήνες σε πίεση 0,8 MPa το ανηγμένο κόστος ανέρχεται στα 6,48 \$/kg (5,71 €/kg), ενώ για εγκαταστάσεις σαν την εξεταζόμενη είναι 7,59 \$/kg (6,69 €/kg) [62]. Το κόστος αυτό μπορεί να φτάσει και τα 4,62 \$/kg (4,07 €/kg) αν χρησιμοποιηθεί ενέργεια από το δίκτυο ωστόσο σε αυτές τις περιπτώσεις το υδρογόνο που παράγεται δεν είναι πράσινο. Σε μια δημοσίευση [63] όπου εξετάστηκε η παραγωγή υδρογόνου για FCEVs, με ενέργεια από Φ/Β και το δίκτυο, αποδείχθηκε ότι για την παραγωγή 50 kg την ημέρα το ανηγμένο κόστος είναι 11,5 \$/kg (10,13 €/kg) με χαμηλή χρήση ρεύματος από το δίκτυο. Το συγκεκριμένο σύστημα αποτελείται από την διάταξη ηλεκτρόλυση-συμπίεση-αποθήκευση-

ψύξη-διανομή. Ωστόσο στην συγκεκριμένη έρευνα η αλλαγή του εξοπλισμού συμπίεσης-ψύξης-διανομής γίνεται κάθε 10 έτη με αποτέλεσμα να αυξάνεται το LCOH. Τέλος σε έρευνα [64] όπου έγινε σύγκριση μεταξύ της μεθόδου παραγωγής από ηλεκτρόλυση με Φ/Β και της φωτοηλεκτροχημικής μεθόδου το LCOH υπολογίστηκε στα 6,22 \$/kg (5,48 €/kg) για την πρώτη και 8,43 \$/kg (7,43 €/kg) για την δεύτερη. Το σύστημα παραγωγής για την πρώτη μέθοδο αποτελείται από τον ίδιο εξοπλισμό που χρησιμοποιήθηκε στην συγκεκριμένη εργασία με την διαφορά ότι το υδρογόνο δεν υφίσταται συμπίεση [64].

Συνεπώς το LCOH που υπολογίστηκε στην παρούσα εργασία βρίσκεται στα ίδια επίπεδα με την βιβλιογραφία, ωστόσο οι διαφορές που παρουσιάζονται οφείλονται στις διαφορετικές σχεδιαστικές παραμέτρους, οι οποίες προσαρμόζονται για να εξυπηρετούν τις ανάγκες του κάθε έργου.

Το κύριο μειονέκτημα του συγκεκριμένου έργου ωστόσο, είναι ο χώρος που απαιτείται για την κάλυψη της απαιτούμενης ενέργειας για την παραγωγή του υδρογόνου. Αν και ο χώρος επαρκεί αν τοποθετηθούν τα Φ/Β σε μορφή στεγάστρων και σε ελεύθερες επιφάνειες σε οροφές στα όμορα κτήρια, πρέπει να ληφθεί υπό όψη ότι η εγκατάσταση θα εξυπηρετεί μόλις δύο λεωφορεία. Έτσι το σενάριο για ολική αντικατάσταση του στόλου λεωφορείων θα απαιτεί τεράστιες εκτάσεις για την εγκατάσταση των Φ/Β. Συνεπώς, είτε πρέπει να σχεδιαστεί ένα περίπλοκο αποκεντρωμένο σύστημα με Φ/Β σε διάφορα σημεία της πόλης, είτε να δεσμευτεί μια μεγάλη έκταση η οποία αναγκαστικά θα βρίσκεται εκτός αστικού ιστού, παράγοντες που δυσκολεύουν την υλοποίησή του.

## **6.Συμπεράσματα**

Τα συμπεράσματα που προκύπτουν από την κατασκευή ενός σταθμού παραγωγής υδρογόνου, τεχνολογίας ηλεκτρόλυσης από Α.Π.Ε συνοψίζονται παρακάτω:

- Από την διαστασιολόγηση της εγκατάστασης, η κατασκευή είναι εφικτό να γίνει σε ένα σχετικά μικρό χώρο (αμαξοστάσιο λεωφορείων) που διατίθεται από τις περισσότερες επιχειρήσεις ΚΤΕΛ.
- Με την χρήση υδρογόνου εξοικονομούνται ετησίως 125.000 € από την μη χρήση πετρελαίου κίνησης.
- Οι συνολικές εκπομπές που αποσorbούνται ανά έτος είναι: 10,02 tn CO<sub>2</sub>, 44,9 kg NO<sub>x</sub> και 8,8 kg NO<sub>2</sub>.
- Με τις ισχύουσες τιμές των εισιτηρίων η επένδυση θεωρείται πολύ αποδοτική από οικονομικής απόψεως αφού η καθαρή παρούσα αξία της είναι θετική, ο χρόνος απόσβεσης είναι μικρότερος της 10ετίας και τα συνολικά κέρδη που θα αποφέρει στην επιχείρηση ξεπερνούν κατά πολύ την αρχική επένδυση.
- Οι διακυμάνσεις στις τιμές των Φ/Β δεν επηρεάζουν σημαντικά την εν λόγω επένδυση, η οποία είναι αποδοτική σε όλα τα σενάρια.

### **6.1 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα**

Ως προτάσεις για εξέλιξη της συγκεκριμένης έρευνας θα ήταν χρήσιμες:

- Η εξέταση εναλλακτικών τεχνικών παραγωγής πράσινου υδρογόνου οι οποίες ενδεχομένως θα είναι πιο αποδοτικές όπως η θερμόλυση νερού ή η παραγωγή υδρογόνου από ζυμώσεις σε αστικά λύματα.
- Λεπτομερής τεχνοοικονομική διαστασιολόγηση συμπιεστή μεταλλικών υδριδίων ο οποίος θα αντικαταστήσει τον συμβατικό συμπιεστή.
- Οικονομική μελέτη η οποία θα εξετάζει τις αυξητικές τάσεις των τιμών των καυσίμων σε αντιδιαστολή με την μειωτική τάση που παρουσιάζουν οι τεχνολογίες υδρογόνου στον ορίζοντα σχεδιασμού του συγκεκριμένου έργου και επανεξέταση της επένδυσης υπό αυτά τα δεδομένα.
- Διαστασιολόγηση της εγκατάστασης για να εξυπηρετεί τις ανάγκες όλων των δρομολογίων της εταιρίας.

## **7.Βιβλιογραφία**

- [1] [Sulaiman N, Hannan MA, Mohamed A, Majlan EH, Daud WW. A review on energy management system for fuel cell hybrid electric vehicle: issues and challenges. Renew Sustain Energy Rev 2015;52:802e14.](#)
- [2] International Energy Agency-IEA. Emissions from fuel combustion highlights. July 2017.
- [3] International Energy Agency
- [4] [Octopus Energy](#)
- [5] [Statista.com](#)
- [6] [Official Website of the EU. Directive for renewable energy](#)
- [7] Boyd, Padi (19 July 2014). "What is the chemical composition of stars?". NASA. Archived from the original on 15 January 2015. Retrieved 5 February 2008.
- [8] EIA U. The impact of increased use of hydrogen on petroleum consumption and carbon dioxide emissions, Report #: SR-OIAF-CNEAF/2008-042008, Energy Information Administration.
- [9] [Zini G, Tartarini P. Solar hydrogen energy systems: science and technology for the hydrogen economy. Springer; 2011.](#)
- [10] [Larminie J, Dicks A. Fuel cell systems explained. Chichester: John Wiley & Sons, Ltd.; 2003.](#)
- [11] [Dincer I. Green methods for hydrogen production. Int J Hydrogen Energy 2012;37:1954e71.](#)
- [12] [McDowall W, Eames M. Forecasts, scenarios, visions, backcasts and roadmaps to the hydrogen economy: a review of the hydrogen futures literature. Energy Policy 2006;34\(11\):1236–50.](#)
- [13] FCHEA. Hydrogen is safe. Available from: <http://www.fchea.org/> [cited 17.12.13]; 2013.
- [14] [Zini G, Tartarini P. Solar hydrogen energy systems: science and technology for the hydrogen economy. Springer; 2011.](#)
- [15] [Cipriani G, Di Dio V, Genduso F, La Cascia D, Liga R, Miceli R, et al. Perspective on hydrogen energy carrier and its automotive applications. Int J Hydrog Energy 2014;39\(16\):8482–94.](#)
- [16] [Yilanci A, Dincer I, Ozturk HK. A review on solar-hydrogen/fuel cell hybrid energy systems for stationary applications. Prog Energy Combust Sci 2008;35 \(3\):231–44.](#)
- [17] [Ο.Ε.Β ημερίδα «Τεχνολογίες και εφαρμογές Α.Π.Ε και υδρογόνου» παρουσίαση Δρ. Χριστόδουλου Χριστοδούλου.](#)
- [18] [international journal of hydrogen energy](#)
- [19] [Rand DAJ, Dell RM. Fuels e hydrogen production: coal gasification. Encycl Electrochem Power Sources 2009:276e92.](#)
- [20] [Traditional Routes for Hydrogen Production and Carbon Conversion Jacob J. Lamb, ... Bruno G. Pollet, in Hydrogen, Biomass and Bioenergy, 2020](#)

- [21] [thermodynamic analysis of hydrogen production by partialoxidation reforming Andrew E. Lutz\\*, Robert W. Bradshaw, Leslie Bromberg, Alex Rabinovich, Sandia National Laboratories, P.O. Box 969, MS-9053, Livermore, CA 94551-0969, USA, Massachusetts Institute of Technology, Plasma Science and Fusion Center, Cambridge, MA 02139-2139, USA](#)
- [22] [Breakdown of hydrogen production technologies using various sources: today and prediction for the year 2050 \(International Energy Agency Technical Report 2013\)](#)
- [23] Zacharia R, Rather SU. Review of solid state hydrogen storage methods adopting different kinds of novel materials. J Nanomater 2015;2015, 914845.
- [24] [Roes AL, Patel MK. Ex-ante environmental assessments of novel technologies- improved caprolactam catalysis and hydrogen storage. J Clean Prod 2011;19\(14\):1659e67.](#)
- [25] [Huff H, Lindsay D, Radermacher R. Positive Displacement Compressor And Expander Simulation \[Internet\]. International Compressor Engineering Conference, Paper 1527; 2002 \[cited Feb 25\]; 2017.](#)
- [26] [Review of the current technologies and performances of hydrogencompression for stationary and automotive applications](#)
- [27] [Niaz S, Manzoor T, Pandith AH. Hydrogen storage: materials, methods and perspectives. Renew Sustain Energy Rev 2015;50:457e69.](#)
- [28] [Barthelemy H, Weber M, Barbier F. Hydrogen storage: recent improvements and industrial perspectives. Int J Hydrogen Energy 2017;42\(11\):7254e62.](#)
- [29] [Mori D, Hirose K. Recent challenges of hydrogen storage technologies for fuel cell vehicles. Int J Hydrogen Energy 2009;34\(10\):4569e74.](#)
- [30] [Zhang YH, Jia ZC, Yuan ZM, Tai YANG, Yan QI, Zhao DL. Development and application of hydrogen storage. J Iron Steel Res Int 2015;22\(9\):757e70.](#)
- [31] [Pudukudy M, Yaakob Z, Mohammadb M, Narayanan B, Sopian K. Renewable hydrogen economy in Asia e opportunities and challenges: an overview. Renew Sustain Energy Rev 2014;30:743e57.](#)
- [32] [Yang C, Ogden J. Determining the lowest-cost hydrogen delivery mode. Int J Hydrogen Energy 2007;32:268e86.](#)
- [33] [Zhang Z, Hu C. System design and control strategy of the vehicles using hydrogen energy. Int J Hydrogen Energy 2014;39:12973e9.](#)
- [35] [Ley MB, Jepsen LH, Lee YS, Cho YW, Colbe JMB, Dornheim M, et al. Complex hydrides for hydrogen storage e new perspectives. Mater Today 2014;17:122e8.](#)
- [36] [Zhu QL, Xu Q. Liquid organic and inorganic chemical hydrides for high-capacity hydrogen storage. Energy Environ Sci 2015;8:478.](#)
- [37] [Modeling and simulation supporting the application of fuel cell & hydrogen technologies Emmanuel Stamatakis \\*, Andreas Yiotis, Stella Giannissi, Ilias Tolias, Athanassios Stubos](#)
- [38] [Sharaf OZ, Orhan MF. An overview of fuel cell technology: fundamentals and applications. Renew Sustain Energy Rev 2014;32:810e53.](#)



- [39] [Wang K, Hissel D, Péra MC, Steiner N, Marra D, Sorrentino M, et al. A review on solid oxide fuel cell models. Int J Hydrogen Energy 2011;36\(12\):7212e28.](#)
- [40] [Zhang Z, Hu C. System design and control strategy of the vehicles using hydrogen energy. Int J Hydrogen Energy 2014;39:12973e9.](#)
- [41] [Kirubakaran A, Jain S, Nema RK. A review on fuel cell technologies and power electronic interface. Renew Sustain Energy Rev 2009;13\(9\):2430e40.](#)
- [42] [Wan Z, Chang H, Shu S, Wang Y, Tang H. A review on cold start of proton exchange membrane fuel cells. Energies 2014;7\(5\):3179e203.](#)
- [43] [Wang C, Wang S, Peng L, Zhang J, Shao Z, Huang J, et al. Recent progress on the key materials and components for proton exchange membrane fuel cells in vehicle applications. Energies 2016;9\(8\):603.](#)
- [44] [Pei H, Liu Z, Zhang H, Yu Y, Tu Z, Wan Z, et al. In situ measurement of temperature distribution in proton exchange membrane fuel cell I a hydrogen/air stack. J Power Sources 2013;227:72e9.](#)
- [45] [Lim JW. Carbon composite hybrid bipolar plates with bypass-connected gas diffusion layers for PEM fuel cells. Compos Struct 2013;95:557e63.](#)
- [46] Fuel Cell Electric Buses: Proven Performance and the Way Forward. BALLARD informational. January 2021
- [47] Nikolaos Chalkiadakis, Emmanuel Stamatakis, Manos Zoulias, Theocharis Tsoutsos and Athanasios Stubos, “Development of an Autonomous Hybrid RES-H<sub>2</sub> Integrated System for Local Transportation Systems: The H<sub>2</sub>TRANS project”, 1ο Διεθνές Διεπιστημονικό Διαδικτυακό Συνέδριο με θέμα: Η Κοινωνία της Κυκλοφορίας, 29-31 Μαΐου 2020
- [48] [Υπουργείο ανάπτυξης και ανταγωνιστικότητας](#)
- [49] [Van Hool presentation for EU](#)
- [50] [SolarisBus Catalogue 10/2020](#)
- [51] [www.sustainable-bus.com/fuel-cell-bus/solaris-urbino-hydrogen](#)
- [52] [static1.squarespace.com/static/5a668f1080bd5e34d18a7e76/t/5c9401cd71c10b2160f88c2f/1553203697824/Hydrogen+Fuel+Cell+Buses.pdf](#)
- [53] [caetanobus.pt/wp-content/uploads/2019/10/H2.City-Gold\\_ENG.pdf](#)
- [54] [https://www.sustainable-bus.com/news/caetanobus-tmb-barcelona-hydrogen-buses/](#)
- [55] [https://www.smart-cover.gr/wp-content/uploads/2019/03/ABB-TRIO-20-27.6-TL.pdf](#)
- [56] [https://www.directindustry.com/prod/aerotecnica-coltri-spa/product-240507-2419200.html](#)
- [57] [https://greenhydrogen.dk/wp-content/uploads/2019/11/HyProvideTM-A-Series.pdf](#)
- [58] [https://cdn.enfsolar.com/Product/pdf/Crystalline/5f17d9961c100.pdf](#)
- [59] TNO report. NO<sub>x</sub> and PM emissions of a Mercedes Citaro Euro VI Bus in urban operation. Table 4

- [60] DOE Hydrogen and Fuel Cells Program record. Energy requirements for hydrogen gas compression and liquefaction as related to vehicle storage needs. Table 1. Monterey Gardiner
- [61] [Analyzing the levelized cost of hydrogen in refueling stations with on-site hydrogen production via water electrolysis in the Italian scenario M.Minutillo A.Pernab A.Forcinaa S.Di Miccoa E.Jannellia](#). Table 5
- [62] Baseline model of a centralized pv electrolytic hydrogen system James E. Mason,\*, Ken Zweibel fig 11
- [63] [Analyzing the levelized cost of hydrogen in refueling stations with on-site hydrogen production via water electrolysis in the Italian scenario M. Minutillo , A. Perna , A. Forcina , S. Di Micco \\*, E. Jannelli](#) fig 4
- [64][Renewable hydrogen production: A technoeconomic comparison of photoelectrochemical cells and photovoltaic-electrolysis Alexa Grimm\\*, Wouter A. de Jong, Gert Jan Kramer](#) fig 3
- [65] [How risky is the introduction of fuel cell electric vehicles in a Mediterranean town? Angelos Smaragdakis, Sotiris Kamenopoulos, Theocharis Tsoutsos\\*](#)
- [66] [Metal hydride hydrogen compressors: Current developments & early markets Emmanuel Stamatakis , Emmanuel Zoulas, George Tzamalís, Zoe Massina, Vassilis Analytis, Christodoulos Christodoulou, Athanasios Stubos](#) fig 2
- [67] [Hydrogen production via natural gas steam reforming in a Pd-Au membrane reactor. Comparison between methane and natural gas steam reforming reactions Author links open overlay panel Bryce Anzelmo Jennifer Wilcox Simona Liguori](#)
- [68] ELECTROLYZER TECHNOLOGIES FOR GREEN HYDROGEN By Mary Page Bailey | September 1, 2020
- [69] Ultraviolet and visible spectral imaging of hydrogen flames using an organic photoconductive film CMOS imager
- [70] [Anatase \(titania, TiO<sub>2</sub>\) photocatalyst producing hydrogen](#)