

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ



**ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΠΕΡΙΟΧΗ ΘΑΛΑΣΣΙΩΝ ΜΕΤΑΦΟΡΩΝ**

**«Βελτιστοποίηση Εφοδιαστικής Αλυσίδας Υδρογόνου για Χρήση στις Μεταφορές και
στην Ενέργεια»**

Διπλωματική Εργασία

Γεώργιος Σαράντος

05/12/22

ΑΘΗΝΑ

Γεώργιος Σαράντος

Βελτιστοποίηση Εφοδιαστικής Αλυσίδας Υδρογόνου για Χρήση στις Μεταφορές και στην Ενέργεια

05/12/2022

Διπλωματική Εργασία

Σχολή Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών

Συγγραφέας: Γεώργιος Σαράντος

Επιβλέπων: Δημήτριος Λυρίδης

ΑΘΗΝΑ

Περιεχόμενα

Περίληψη.....	vii
Abstract.....	ix
Κατάλογος Σχημάτων.....	xi
Κατάλογος Πινάκων.....	xiii
1. Εισαγωγή	1
1.1. Κλιματική αλλαγή στην Ευρώπη.....	1
1.2. Ευρωπαϊκό πλαίσιο για την αντιμετώπιση κλιματικής αλλαγής.....	2
1.3. Το υδρογόνο ως καύσιμο για την ενεργειακή μετάβαση.....	5
1.4. Εισχώρηση του H ₂ στο ενεργειακό σύστημα.....	8
1.4.1. Βιομηχανία.....	9
1.4.2. Μεταφορές.....	10
1.4.3. Παραγωγή ισχύος.....	13
1.4.4. Κτήρια.....	14
2. Εφοδιαστική αλυσίδα υδρογόνου.....	15
2.1. Παραγωγή υδρογόνου.....	15
2.1.1. Παραγωγή μέσω ορυκτών καυσίμων.....	15
2.1.1.1. Αναμόρφωση φ.α μέσω ατμού.....	15
2.1.1.2. Μερική οξείδωση υδρογονανθράκων.....	16
2.1.1.3. Αεριοποίηση άνθρακα.....	16
2.1.2. Παραγωγή μέσω νερού.....	17
2.1.2.1. Ηλεκτρόλυση.....	17
2.1.2.2. Θερμόλυση.....	18
2.1.2.3. Φωτόλυση.....	18
2.1.3. Παραγωγή μέσω βιολογικών καυσίμων.....	19
2.2. Αποθήκευση Υδρογόνου.....	21
2.2.1. Αποθήκευση καθαρού υδρογόνου.....	22
2.2.1.1. Αποθήκευση συμπιεσμένου αέριου υδρογόνου.....	22

2.2.1.2.	Αποθήκευση υγροποιημένου υδρογόνου.....	24
2.2.2.	Αποθήκευση μέσω προσφόρησης.....	26
2.2.3.	Χημική Αποθήκευση.....	27
2.2.3.1.	Αποθήκευση σε μεταλλικά υδρίδια.....	27
2.2.3.2.	Αποθήκευση σε χημικά υδρίδια	28
2.3.	Μεταφορά Υδρογόνου	30
2.3.1.	Νομοθετικό πλαίσιο.....	30
2.3.2.	Συστήματα υδρογόνου και ασφάλεια.....	32
2.3.3.	Κυψέλες υδρογόνου (Hydrogen Fuel Cells).....	34
2.3.4.	Μηχανές εσωτερικής καύσης υδρογόνου.....	37
3.	Πολυκριτηριακές Μέθοδοι Λήψης Αποφάσεων.....	39
3.1.	Μέθοδοι ELECTRE.....	39
3.1.1.	ELECTRE I.....	40
3.2.	Μέθοδοι PROMETHEE.....	43
3.3.	Μέθοδοι προσδιορισμού βαρών κριτηρίων.....	45
3.3.1.	Analytic Hierarchy Process (AHP).....	45
4.	Βελτιστοποίηση εφοδιαστικής αλυσίδας.....	49
4.1.	Περιγραφή εφοδιαστικής αλυσίδας.....	49
4.2.	Διαδικασία βελτιστοποίησης εφοδιαστικής αλυσίδας	53
4.3.	Αποτελέσματα & Σχολιασμός.....	69
4.4.	Ανάλυση Ευαισθησίας.....	74
5.	Συμπεράσματα.....	81
	Βιβλιογραφία	83
	Παράρτημα.....	87

Περίληψη

Η κλιματική αλλαγή αποτελεί ένα φαινόμενο το οποίο τα τελευταία χρόνια εντείνεται ολοένα και περισσότερο προκαλώντας ανησυχία σε όλη την Ευρώπη. Στο πλαίσιο αυτό κρίνεται απαραίτητη η λήψη άμεσης δράσης για την αποφυγή περαιτέρω επιδείνωσης του φαινομένου της αύξησης του παγκόσμιου μέσου όρου της θερμοκρασίας. Ο στόχος για τα επόμενα χρόνια είναι η σταδιακή μείωση των εκπομπών του διοξειδίου του άνθρακα, οι οποίοι συνδέονται άμεσα με το φαινόμενο του θερμοκηπίου. Για την επίτευξη του συγκεκριμένου στόχου, πέρα από την συνεχή ανάπτυξη των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, είναι αναγκαία και η αντικατάσταση του παραδοσιακών ορυκτών καυσίμων. Το υδρογόνο αποτελεί μια βασική επιλογή.

Το βασικό πλεονέκτημα του είναι πως υπάρχει η δυνατότητα όταν παράγεται από ανανεώσιμη ηλεκτρική ενέργεια, να περιέχει μηδενικό περιβαλλοντικό αποτύπωμα, καθώς κατά την καύση του με οξυγόνο παράγεται μόνο νερό. Επίσης, μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε πληθώρα εφαρμογών, όπως η παραγωγή ισχύος, οι μεταφορές και η βιομηχανία, εξαιτίας της ενεργειακής πυκνότητάς του. Αποτελεί δε, μια ελκυστική επιλογή για την αποθήκευση περίσσειας ηλεκτρικής ενέργειας σε μορφή χημικής. Ωστόσο, προς το παρόν η τεχνολογία που συνδέονται με την παραγωγή, αποθήκευση και εκμετάλλευσή του βρίσκονται σε αρχικό στάδιο εμπορικής εφαρμογής.

Η συγκεκριμένη εργασία έχει ως σκοπό, τον σχεδιασμό μια θαλάσσιας εφοδιαστικής αλυσίδας πράσινου υδρογόνου, σε μη διασυνδεδεμένα νησιά του Αιγαίου για την κάλυψη ελλείμματος ηλεκτροπαραγωγής από τις ΑΠΕ. Η αποθήκευση και μεταφορά, πραγματοποιείται σε υγροποιημένη μορφή. Για την βελτιστοποίηση της, υπολογίστηκε ο βέλτιστος τρόπος διανομής του υγροποιημένου υδρογόνου αλλά και οι κατάλληλες μεταφερόμενες ποσότητες, βάσει ενός πακέτου κριτηρίων που λαμβάνουν υπόψη τόσο περιβαλλοντικούς όσο και οικονομικούς παράγοντες. Συνοπτικά, προέκυψε πως γενικά κυκλικά δρομολόγια με ποσότητες υδρογόνου για κάλυψη ενεργειακών αναγκών ενός μήνα είναι η βέλτιστη λύση.

Λέξεις κλειδιά [Υδρογόνο, Εφοδιαστική, Αλυσίδα, Βελτιστοποίηση]

Abstract

Climate change is a phenomenon that in recent years has intensified more and more, causing concern throughout Europe. Regarding this, it is necessary to take immediate action in order to avoid further aggravation of the global temperature increase. The goal for the coming years is the gradual reduction of carbon dioxide emissions, which are directly linked to the greenhouse effect. For the implementation of this objective, except of the continuous development of the renewable energy sources, the replacement of the traditional fossil fuels of high importance. Hydrogen is a key option.

Its main advantage is that when it is produced from renewable electricity, it has zero environmental footprint, as the only product when it is combined with oxygen in the burning process, is water. It can also be used in a variety of applications, such as power generation, transportations and industry, due to its high energy density. It is also an attractive option for storing excess electrical energy in chemical form. However, currently the technologies associated with its production, storage and exploitation are at an early stage of commercial application.

The purpose of this paper is to design a marine supply chain of green hydrogen, in non-interconnected islands of the Aegean to cover the deficit of electricity generation from RES. Storage and transport is carried out in liquid form. In order to optimize the chain, it was calculated the optimal way to distribute the liquefied hydrogen and the appropriate transported quantities, based on a package of criteria that take into account both environmental and economic factors. To conclude, it seems that milky-runs with quantities of hydrogen to cover one month's energy needs is the optimal solution.

Key Words

[Hydrogen, Supply, Chain, Optimization]

Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 1.2. Εκπομπές αερίων θερμοκηπίου στην ΕΕ ανά κατηγορία	σελ 4
Σχήμα 1.3. Κατηγορίες Υδρογόνου ανάλογα με την διεργασία παραγωγής.....	σελ.7
Σχήμα 1.4. Ετήσια ζήτηση υδρογόνου και τομείς κατανάλωσης (2050).....	σελ.8
Σχήμα 1.5. Ετήσια ζήτηση υδρογόνου στην βιομηχανία (2050).	σελ.10
Σχήμα 1.6. Ποσοστό συμμετοχής υδρογόνου στην παραγωγή ισχύος (2050).....	σελ.13
Σχήμα 2.1. Τυπική διάταξη αλκαλικού συστήματος ηλεκτρόλυσης.....	σελ.18
Σχήμα 2.2. Διάγραμμα διεργασιών κατά την φωτόλυση.....	σελ.19
Σχήμα 2.3. Τεχνολογίες αποθήκευσης υδρογόνου.	σελ.21
Σχήμα 2.4. α) δεξαμενή αερίων, β) σφαιρική δεξαμενή πίεσης, γ) σωληνώσεις για αποθήκευση.....	σελ.23
Σχήμα 2.5. Φυσικές και χημικές ιδιότητες υγροποιημένου υδρογόνου.....	σελ.24
Σχήμα 2.6. α) σφαιρική δεξαμενή LH ₂ , NASA β) οριζόντια δεξαμενή LH ₂ , Κέντρο Υδρογόνου Linde.....	σελ.25
Σχήμα 2.7. Σύγκριση ιδιοτήτων αερίου υδρογόνου-μεθανίου σε θέματα ασφάλ.....	σελ.33
Σχήμα 2.8. Τυπική διάταξη fuelcell υδρογόνου.....	σελ.35
Σχήμα 2.9. Διαδικασία εσωτερικής καύσης υδρογόνου-πετρελαίου (στο 3 ^ο στάδιο διακρίνεται η μικρή ποσότητα πετρελαίου για την υποβοήθηση της έναυσης).....	σελ.38
Σχήμα 3.1. Κλίμακα AHP για αξιολόγηση βαρών.	σελ.46
Σχήμα 3.2. Πίνακας συγκρίσεων AHP.....	σελ.47
Σχήμα 4.1. Σημεία εφοδιαστικής αλυσίδας στον χάρτη.....	σελ.49
Σχήμα 4.2. Διάταξη παραγωγής υδρογόνου σε κυψέλη με αλκαλικό καταλύτη.....	σελ.50
Σχήμα 4.3. Διαμόρφωση τοιχωμάτων δεξαμενών υγροποιημένου υδρογόνου.....	σελ.51
Σχήμα 4.4. Σύστημα περιστρεφόμενου βραχίονα για μεταφορά υδρογόνου.....	σελ.51
Σχήμα 4.5. Δεξαμενόπλοιο μεταφοράς LH ₂	σελ.52
Σχήμα 4.6: Διαγραμματική απεικόνιση εφοδιαστικής αλυσίδας LH ₂	σελ.52
Σχήμα 4.7: Κατάταξη κριτηρίων για έμφαση στο περιβάλλον.....	σελ.62
Σχήμα 4.8: Κατάταξη κριτηρίων για έμφαση στην οικονομία.....	σελ.63

Σχήμα 4.9: Αρχείο εισόδου A_Σενάριο_ Ουδέτερη προτίμηση.....	σελ.64
Σχήμα 4.10: Αρχείο εισόδου A_Σενάριο_ Περιβαλλοντική προτίμηση.....	σελ.65
Σχήμα 4.11: Αρχείο εισόδου A_Σενάριο_ Οικονομική προτίμηση.....	σελ.65
Σχήμα 4.12: Αρχείο εισόδου B_Σενάριο_ Ουδέτερη προτίμηση.....	σελ.66
Σχήμα 4.13: Αρχείο εισόδου B_Σενάριο_ Περιβαλλοντική προτίμηση.....	σελ.66
Σχήμα 4.14: Αρχείο εισόδου B_Σενάριο_ Οικονομική προτίμηση.....	σελ.67
Σχήμα 4.15: Κατάταξη εναλλακτικών A Σενάριο-Ουδέτερη προτίμηση.....	σελ.68
Σχήμα 4.16: Κατάταξη εναλλακτικών A Σενάριο-Περιβαλλοντική προτίμηση.....	σελ.69
Σχήμα 4.17: Κατάταξη εναλλακτικών A Σενάριο-Οικονομική προτίμηση.....	σελ. 69
Σχήμα 4.18: Κατάταξη εναλλακτικών B Σενάριο-Ουδέτερη προτίμηση.....	σελ.71
Σχήμα 4.19: Κατάταξη εναλλακτικών B Σενάριο-Περιβαλλοντική προτίμηση.....	σελ. 71
Σχήμα 4.20: Κατάταξη εναλλακτικών A Σενάριο-Οικονομική προτίμηση.....	σελ.72
Σχήμα 4.21: Κατάταξη εναλλακτικών A Σενάριο-Ουδέτερη προτίμηση_ Ανάλυση Ευαισθησίας.....	σελ.76
Σχήμα 4.22: Κατάταξη εναλλακτικών A Σενάριο-Περιβαλλοντική προτίμηση_ Ανάλυση Ευαισθησίας.	σελ.76
Σχήμα 4.23: Κατάταξη εναλλακτικών A Σενάριο-Οικονομική προτίμηση_ Ανάλυση Ευαισθησίας.	σελ.77
Σχήμα 4.24: Κατάταξη εναλλακτικών B Σενάριο-Ουδέτερη προτίμηση_ Ανάλυση Ευαισθησίας.....	σελ.78
Σχήμα 4.25: Κατάταξη εναλλακτικών B Σενάριο-Περιβαλλοντική προτίμηση_ Ανάλυση Ευαισθησίας.	σελ.78
Σχήμα 4.26: Κατάταξη εναλλακτικών B Σενάριο-Οικονομική προτίμηση_ Ανάλυση Ευαισθησίας.	σελ.79

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 4.1 Ποσότητες υδρογόνου για διείδυση ΑΠΕ 40%.....	σελ.55
Πίνακας 4.2 Ποσότητες υδρογόνου για διείδυση ΑΠΕ 60%.	σελ.55
Πίνακας 4.3 Πίνακας αποστάσεων μεταξύ σταθμών.....	σελ.56
Πίνακας 4.4 Συνολικές αποστάσεις κάθε εναλλακτικής.....	σελ.56
Πίνακας 4.5 Συνολικοί χρόνοι κάθε εναλλακτικής-Α Σενάριο.....	σελ.57
Πίνακας 4.6 Συνολικοί χρόνοι κάθε εναλλακτικής-Β Σενάριο	σελ.57
Πίνακας 4.7 Συνολικοί έξοδα ναύλων κάθε εναλλακτικής-Α Σενάριο	σελ.58
Πίνακας 4.8 Συνολικοί έξοδα ναύλων κάθε εναλλακτικής-Β Σενάριο	σελ.58
Πίνακας 4.10 Συνολική κατανάλωση καυσίμου κάθε εναλλακτικής-Α Σενάριο.....	σελ.59
Πίνακας 4.11 Συνολική κατανάλωση καυσίμου κάθε εναλλακτικής-Β Σενάριο	σελ.59
Πίνακας 4.12 Συνολικά κόστη λιμένων κάθε εναλλακτικής-Α Σενάριο.....	σελ.60
Πίνακας 4.14 Δείκτης ΕΕΟΙ κάθε εναλλακτικής-Α Σενάριο	σελ.60
Πίνακας 4.15 Δείκτης ΕΕΟΙ κάθε εναλλακτικής-Β Σενάριο	σελ.60
Πίνακας 4.16 Συγκεντρωτικές τιμές κριτηρίων-Α-Σενάριο.....	σελ.61
Πίνακας 4.17 Συγκεντρωτικές τιμές κριτηρίων-Β-Σενάριο	σελ.61
Πίνακας 4.18 Συγκεντρωτικές τιμές βαρύτητας κριτηρίων.....	σελ.63
Πίνακας 4.19 Συγκεντρωτικές τιμές κριτηρίων- Α-Σενάριο_Ανάλυση Ευαισθησίας.....	σελ.75
Πίνακας 4.20 Συγκεντρωτικές τιμές κριτηρίων- Β-Σενάριο_Ανάλυση Ευαισθησίας.....	σελ.75

1. Εισαγωγή

1.1. Κλιματική αλλαγή στην Ευρώπη

Η κλιματική αλλαγή αποτελεί ένα φαινόμενο το οποίο τα τελευταία χρόνια εντείνεται ολοένα και περισσότερο προκαλώντας ανησυχία σε όλη την Ευρώπη. Οι μεταβολές που λαμβάνουν χώρα στο κλίμα της Γης διαφοροποιούν τα δεδομένα του πλανήτη και αυξάνουν τους παράγοντες αστάθειας σε όλες της μορφές της. Συγκεκριμένα, μόνο κατά την διάρκεια των δύο τελευταίων δεκαετιών καταγράφηκαν οι θερμότερες χρονιές στην ιστορία, με αποτέλεσμα η ανάγκη για λήψη μέσων αναχαίτισης του φαινομένου να καθίσταται κάτι περισσότερο από επιτακτική. Οι επιπτώσεις από την υπερθέρμανση του πλανήτη αμβλύνουν τη συχνότητα και την ένταση των ακραίων καιρικών φαινομένων. Η Ευρώπη γνώρισε ακραία κύματα καύσωνα τα τέσσερα από τα πέντε τελευταία χρόνια. Το περασμένο καλοκαίρι, οι θερμοκρασίες πάνω από τον Αρκτικό Κύκλο ήταν κατά 5°C υψηλότερες από αυτές που παρατηρούνται συνήθως [1]. Τα τελευταία χρόνια μεγάλα τμήματα της Ευρώπης επλήγησαν από σοβαρές ξηρασίες, ενώ πλημμύρες έπληξαν ιδιαίτερα την Κεντρική και Ανατολική Ευρώπη. Ακραία φαινόμενα που συνδέονται με το κλίμα όπως οι δασικές πυρκαγιές, οι πλημμύρες, οι τυφώνες και οι κυκλώνες προκαλούν ολικές καταστροφές στο οικοσύστημα, όπως έγινε όταν οι κυκλώνες Irma και Maria το 2017 χτύπησαν εκτός από την περιοχή της Καραϊβικής και πολλές ευρωπαϊκές περιφέρειες.

Στο πλαίσιο αυτό η Ευρωπαϊκή Ένωση μέσω της διακυβερνητικής επιτροπής για την κλιματική αλλαγή (IPCC), πραγματοποίησε μελέτη σχετικά με τις επιπτώσεις της παγκόσμιας ανόδου της θερμοκρασία. Σύμφωνα με αυτή, η ανθρωπογενής υπερθέρμανση του πλανήτη έχει φτάσει τον 1°C σε σχέση με την περίοδο πριν την βιομηχανική επανάσταση, με ανοδική τάση 0,2°C ανά δεκαετία, καταλήγοντας σε αύξηση 2°C μέχρι το 2060 [1]. Μια τέτοιου είδους ανεξέλεγκτη κλιματική αλλαγή ενδέχεται να οδηγήσει πέραν

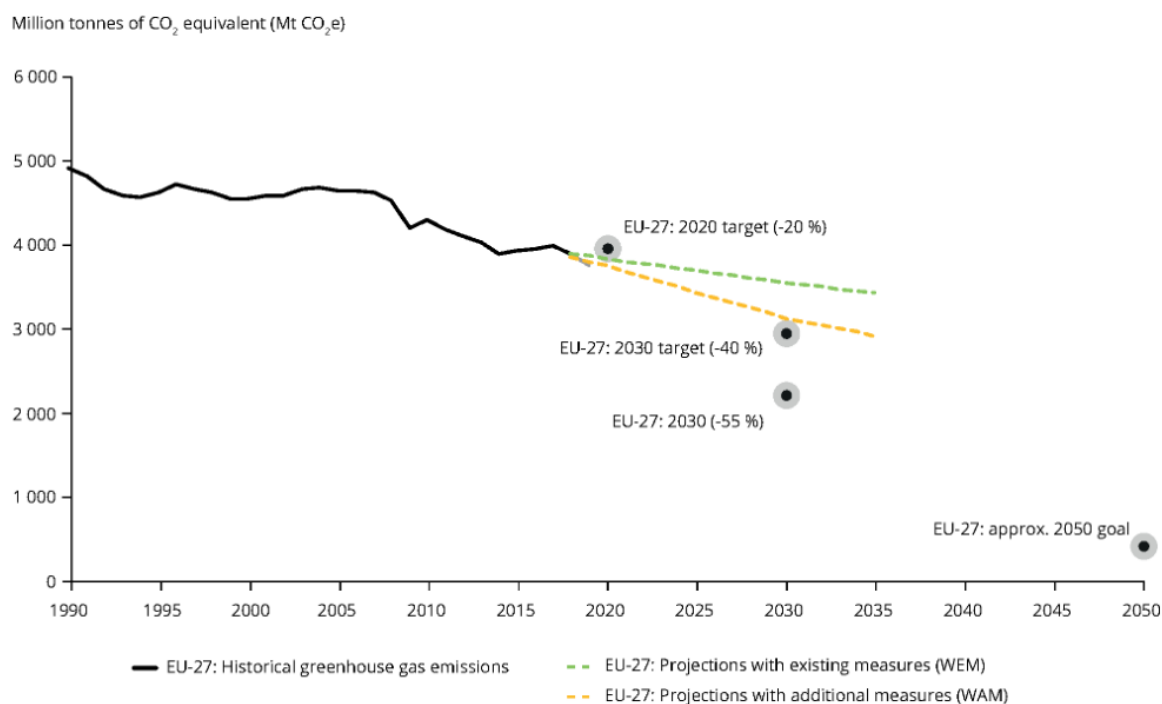
των άλλων, σε μη αναστρέψιμη απώλεια του στρώματος πάγου της Γροιλανδίας, οδηγώντας έτσι σε άνοδο της στάθμης της θάλασσας κατά 7 μέτρα με άμεσες συνέπειες για τις παράκτιες περιοχές σε όλο τον κόσμο, συμπεριλαμβανομένων των περιοχών που βρίσκονται σε χαμηλότερο υψόμετρο από τη θάλασσα και των νησιών στην Ευρώπη.

Οι συνέπειες ωστόσο της κλιματικής αλλαγής δεν περιορίζονται μόνο στον οικολογικό τομέα. Σημαντικό πλήγμα αναμένεται να λάβει και η οικονομία της ηπείρου όσον αφορά ποικίλους παράγοντες όπως η παραγωγικότητα, οι υποδομές, η ικανότητα παραγωγής τροφίμων και η δημόσια υγεία. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί το γεγονός πως η οικονομική ζημιά που οφείλεται σε καιρικά φαινόμενα το 2017 έφτασε το υπέρογκο ποσό των 283 δισεκατομμυρίων ευρώ [1]. Επιπροσθέτως, Το 16 % της σημερινής μεσογειακής ζώνης είναι πιθανό να γίνει άγονη γη έως το τέλος του αιώνα και σε πολλές χώρες της Νότιας Ευρώπης η παραγωγικότητα της εργασίας στην ύπαιθρο να μειωθεί κατά 10-15 % σε σύγκριση με τα σημερινά επίπεδα. Εκτιμάται, επίσης, ότι οι μειώσεις στην προβλεπόμενη διαθεσιμότητα τροφίμων θα είναι πολύ μεγαλύτερες, αν η θερμοκρασία του πλανήτη αυξηθεί κατά 2° C σε σύγκριση με αύξηση 1,5 °C, ακόμη και σε περιφέρειες στρατηγικής σημασίας για την ασφάλεια της ΕΕ, όπως είναι η Βόρεια Αφρική και η υπόλοιπη Μεσόγειος [1].

1.2. Ευρωπαϊκό πλαίσιο για την αντιμετώπιση κλιματικής αλλαγής

Αναλογιζόμενοι όλες τις παραπάνω δυσϊόνες προβλέψεις σχετικά με τις συνέπειες της κλιματικής αλλαγής, η Ευρωπαϊκή Ένωση με την συνθήκη του Παρισιού το 2016, σε συνδυασμό με τα Ηνωμένα Έθνη, αποφάσισαν να λάβουν δράση με στόχο την επίτευξη μηδενικών εκπομπών που συμβάλουν στο φαινόμενο του θερμοκηπίου μέχρι το 2050. Ειδικότερα, οι προσπάθειες επικεντρώνονται στον περιορισμό της παγκόσμιας αύξησης της θερμοκρασίας στους 2° C, και αν καταστεί δυνατό στον 1,5° C. Ο ρόλος της Ευρώπης είναι καταλυτικός καθώς ευθύνεται για το 10% των παγκόσμιων εκπομπών αερίων, ενώ ο

στόχος για το 2050 είναι η μείωση κατά 85-90%. Οι ποσοτικοί στόχοι για βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης της Ευρωπαϊκής Ένωσης κατά 32,5 % και αύξηση της ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές σε 32 % έως το 2030 έχουν παγιωθεί, ενώ κυρίαρχο ρόλο στην ενεργειακή μετάβαση αναμένεται να διαδραματίσει η νομοθεσία που αφορά τη βελτίωση της απόδοσης αυτοκινήτων και φορτηγών σχετικά με τις εκπομπές CO₂.

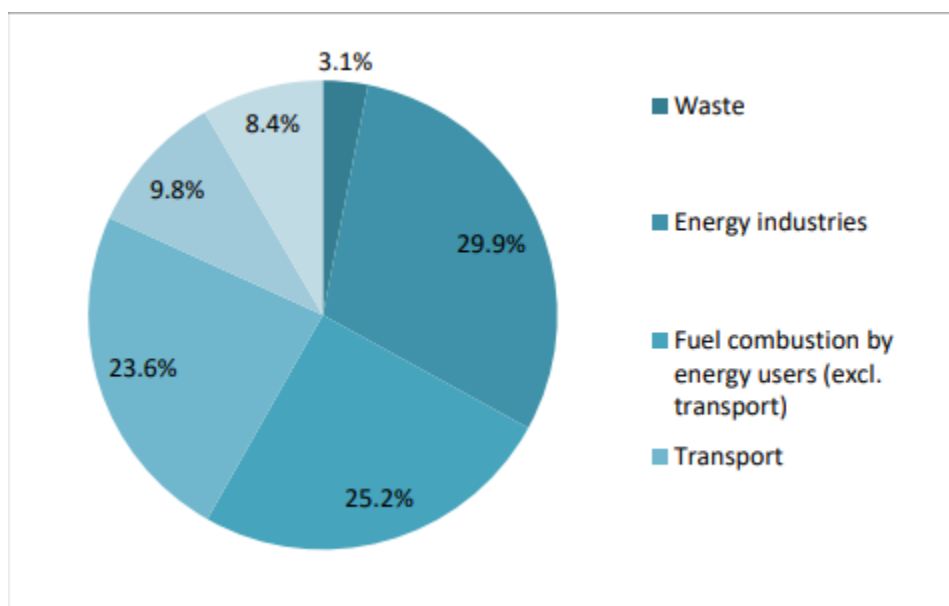


Σχήμα 1.1. Αναμενόμενες εκπομπές αερίων θερμοκηπίου στην ΕΕ με βάση τα υπάρχοντα και μελλοντικά μέτρα [1].

Τα μεταφορικά μέσα αποτελούν έναν από τους βασικούς τομείς που χρήζουν βελτίωσης. Στην προσπάθεια για μέγιστη μείωση των εκπομπών τους μέχρι το 2035 θα τεθούν σε ισχύ νομοθετικά, μέτρα που θα ωθήσουν του κινητήρες βενζίνης και πετρελαίου των αυτοκινήτων σε σταδιακό παροπλισμό. Επίσης, μια αναθεώρηση του ευρωπαϊκού συστήματος διαχείρισης ρύπων CO₂, που αποτελεί την μεγαλύτερη αγορά άνθρακα παγκοσμίως, θα αναγκάσει τα εργοστάσια, τις μονάδες παραγωγής ισχύος και τις αεροπορικές να καταβάλουν υψηλά πρόστιμα όταν εκπέμπουν διοξείδιο του άνθρακα. Από το συγκεκριμένο νομοθετικό πλαίσιο δεν εξαιρούνται ούτε οι πλοιοκτήτες. Επιπλέον κόσθη

θα επιβαρύνουν του προμηθευτές εκτός Ευρώπης όταν εμπορεύονται αγαθά προς την Ευρώπη, ανάλογα με το πόσο CO₂ που απελευθερώνουν στην ατμόσφαιρα. Πέρα από την μείωση των απελευθερώσεων διοξειδίου του άνθρακα, επιδιώκεται η επαναφορά κατεστραμμένων δασικών εκτάσεων και αγρών , καθώς αποτελούν καταβόθρες CO₂, δηλαδή έναν φυσικό τρόπο απορρόφησης των επιβλαβών για το περιβάλλον εκπομπών.

Οι συγκεκριμένοι στόχοι ωστόσο για το 2050, θα μπορούσαν να θεωρηθούν αρκετά αισιόδοξοι καθώς η καθολική εφαρμογή τους, εμπεριέχει αρκετές τεχνικές δυσκολίες. Οι ανανεώσιμες πηγές ηλεκτρικής ενέργειας είναι ένας από τους βασικούς παράγοντες πίσω από τη μείωση των προηγούμενων εκπομπών. Το 2019, η αιολική και η ηλιακή ενέργεια αποτελούσαν περίπου το ένα τρίτο της συνολικής παροχής ηλεκτρικής ενέργειας (*Eurostat, 2021*). Ωστόσο, οι τεχνικές προκλήσεις της ενσωμάτωσης ανανεώσιμων πηγών αυξάνονται με το ποσοστό διείσδυσής τους στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Επιπλέον, η ηλεκτρική ενέργεια είναι ίσως ο πιο εύκολος τομέας για απαλλαγή από τον άνθρακα. Η απαλλαγή από τον άνθρακα είναι πιο δύσκολη για τις μεταφορές, τη θέρμανση, τη βιομηχανία και τη γεωργία.



Σχήμα 1.2. Εκπομπές αερίων θερμοκηπίου στην ΕΕ ανά κατηγορία[3].

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.2, το 2015 οι βιομηχανίες παραγωγής ενέργειας είχαν το μεγαλύτερο μερίδιο (30 %) στις συνολικές εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου, στη συνέχεια ακολουθεί η κατανάλωση καυσίμων από ιδιόκτητα μέσα μεταφοράς (25 %) και ο τομέας των μεταφορών (24 %). Σε σύγκριση με τα επίπεδα του 1990, το μερίδιο στους περισσότερους κλάδους μειώθηκε. Ωστόσο, ο τομέας στον μεταφορών αυξήθηκε από ποσοστό συμμετοχής στις συνολικές εκπομπές τάξης του 15 % το 1990 σε 23,6 % το 2015 ενώ και η γεωργία γνώρισε ελαφρά αύξηση. Ο τομέας των μεταφορών δεν γνώρισε την ίδια σταδιακή μείωση των εκπομπών με τους υπόλοιπους τομείς, καθώς άρχισε να μειώνεται μόλις το 2007 και το ποσοστό του εξακολουθεί να παραμένει υψηλότερο από τα επίπεδα του 1990 [2]. Με βάση τα παραπάνω γίνεται αντιληπτό ότι η επίτευξη των αναμενόμενων στόχων για μηδενικές εκπομπές το 2050 αποτελεί εξαιρετικά δύσκολη πρόκληση.

1.3. Το υδρογόνο ως καύσιμο για την ενεργειακή μετάβαση

Το υδρογόνο αναμένεται να διαδραματίσει κεντρικό ρόλο στην επίτευξη μιας οικονομίας απαλλαγμένης από το διοξείδιο του άνθρακα, καθώς όταν παράγεται από ηλεκτρική ενέργεια προερχόμενη από ανανεώσιμες πηγές, εμπεριέχει μηδενικές εκπομπές. Ωστόσο, ακόμα υστερεί όσον αφορά την εμπορική εφαρμογή, καθώς το κόστος είναι συγκριτικά υψηλότερο από το αντίστοιχο του υδρογόνου που παράγεται από φυσικό αέριο. Γενικά, εκτιμάται ότι θα είναι οικονομικά αποδοτικότερο εάν εισχωρήσουν σε σημαντικό ποσοστό στο ενεργειακό σύστημα της Ευρώπης καύσιμα μηδενικών εκπομπών, από το αντίστοιχο σενάριο με αποκλειστική εκμετάλλευση ανανεώσιμων πηγών.

Η επιδιωκόμενη κλιματική ουδετερότητα μέχρι το 2050 πρακτικά σημαίνει ότι οι εκπομπές αερίων θερμοκηπίου θα πρέπει να μην υπερβαίνουν τις αντίστοιχες που απορροφούνται, με αποτέλεσμα να επιβάλλεται η απαλλαγή από τα ορυκτά καύσιμα. Η αντικατάσταση των ορυκτών καυσίμων είναι εφικτή και σχετικά εύκολη σε αρκετές

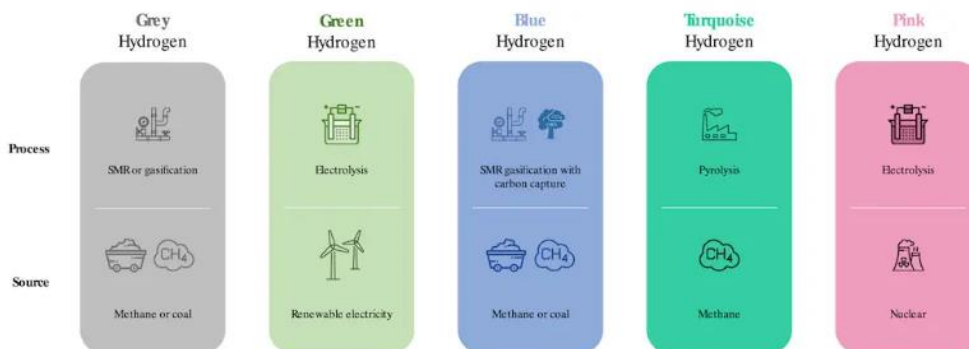
περιπτώσεις από τον ανανεώσιμο ηλεκτρισμό, ωστόσο σε τομείς όπως οι μεταφορές (οδικές, θαλάσσιες, αεροπορικές) αλλά και στην βαριά βιομηχανία προκύπτουν αξιοσημείωτα εμπόδια. Συγκεκριμένα, το γεγονός ότι η ανανεώσιμη ηλεκτρική ενέργεια είναι άμεσα συνδεδεμένη με την ώρα κατά την διάρκεια της ημέρας αλλά και την εποχή, ενδέχεται να οδηγήσει σε αδυναμία κάλυψης των ενεργειακών αναγκών ανά περιόδους, εάν δεν υπάρχει αποθήκευση όταν παράγεται πλεόνασμα. Η αποθήκευση μπορεί να γίνει άμεσα σε μπαταρίες ή μέσω υδροηλεκτρικής ενέργειας. Μια ακόμα εναλλακτική αποτελεί η χρήση της για παραγωγή υδρογόνου, καθώς με αυτό τον τρόπο μετατρέπεται σε ένα καύσιμο ικανό να αξιοποιηθεί σε πληθώρα εφαρμογών.

Το υδρογόνο (H_2) αυτή τη στιγμή καταλαμβάνει λιγότερο από το 2% της κατανάλωσης ενέργειας στην Ευρώπη, ενώ οι κύριες χρήσεις του απαντώνται στην δύλιση πετρελαίου, στην παραγωγή αμμωνίας και μεθανόλης, καθώς και στους διαστημικούς πυραύλους. Περίπου τα 2/3 του παραγόμενου υδρογόνου παγκοσμίως, παρασκευάζονται επί τόπου για την κάλυψη των διάφορων παραγωγικών διεργασιών. Οι κύριοι λόγοι που καθιστούν το υδρογόνο μια ελκυστική επιλογή ως καύσιμο είναι οι εξής:

- Κατά την καύση του δεν παράγονται GHG (greenhouse gas emissions), αφού το μόνο παράγωγο είναι νερό
- Μπορεί να αποθηκευτεί για μεγάλες χρονικές περιόδους.
- Χρησιμεύει στην παραγωγή και άλλων καυσίμων όπως η αμμωνία.
- Οι υπάρχουσες υποδομές για μεταφορά φυσικού αερίου είναι εφικτό να τροποποιηθούν ώστε να είναι συμβατές για μεταφορά υδρογόνου, ενώ σε συγκεκριμένες αναλογίες μπορεί να γίνει και μίξη των 2 καυσίμων.
- Έχει μεγαλύτερη ενεργειακή πυκνότητα (ποσό ενέργειας ανά μονάδα όγκου) σε σχέση με της μπαταρίες, καθιστώντας το αποδοτικότερη εναλλακτική για χρήση σε μεταφορικά μέσα μεγάλων αποστάσεων.

Το υδρογόνο ανάλογα με την διεργασία παραγωγής και τις εκπομπές του κατατάσσεται στις εξής κατηγορίες:

- Γκρι Υδρογόνο (Grey Hydrogen):** μπορεί να παραχθεί από φυσικό αέριο ή άνθρακα με διεργασίες μετασχηματισμού μεθάνης. Στην συγκεκριμένη διεργασία παράγονται περίπου 9.3kg CO₂ ανά kg H₂.
- Πράσινο Υδρογόνο (Green Hydrogen):** παράγεται μέσω της ηλεκτρόλυσης του νερού χρησιμοποιώντας ανανεώσιμη ηλεκτρική ενέργεια. Δεν εκπέμπονται αέρια του θερμοκηπίου κατά την διεργασία παραγωγής του.
- Μπλε Υδρογόνο (Blue Hydrogen):** παράγεται με την ίδια διεργασία όπως και το Γκρι, ωστόσο η διαφορά εντοπίζεται στον τρόπο διαχείρισης των εκπομπών CO₂. Ειδικότερα, το διοξείδιο του άνθρακα αιχμαλωτίζεται πριν απελευθερωθεί στο περιβάλλον και αποθηκεύεται μόνιμα. Συνεπώς, εάν υπάρχει η χωρητικότητα για την αποθήκευση των εκπομπών, η μετατροπή της διεργασίας γκρι υδρογόνου για σε μπλε είναι εφικτή και οικονομικά αποδοτική.
- Τυρκουάζ Υδρογόνο (Turquoise Hydrogen):** παράγεται μέσω πυρόλυσης, ενώ στην συγκεκριμένη διεργασία παρουσιάζονται εκπομπές CO₂.
- Ροζ Υδρογόνο (Pink Hydrogen):** παράγεται μέσω της ηλεκτρόλυσης του νερού χρησιμοποιώντας πυρηνική ενέργεια. Δεν εκπέμπονται αέρια του θερμοκηπίου κατά την διεργασία παραγωγής του, αλλά πυρηνικά απόβλητα, που απαιτούν ειδική διαχείριση.



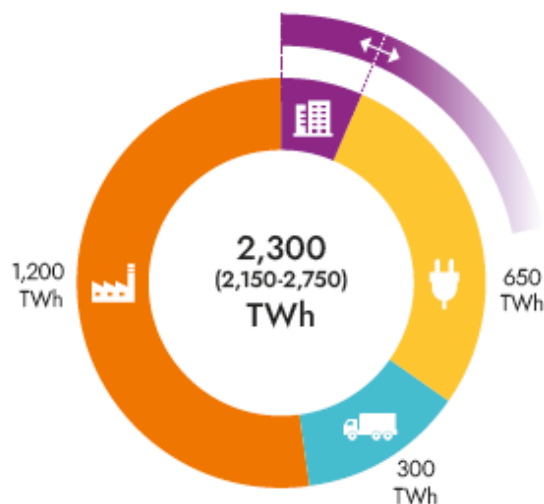
Σχήμα 1.3. Κατηγορίες Υδρογόνου ανάλογα με την διεργασία παραγωγής[36].

Αυτή τη στιγμή σχεδόν το 96% του παραγόμενου υδρογόνου γίνεται από φυσικό αέριο ή άνθρακα με διεργασίες μετασχηματισμού μεθάνης (Γκρι Υδρογόνο) [4], καθώς αποτελεί την πιο οικονομική εναλλακτική. Παρόλα αυτά ο στόχος είναι να προωθηθούν οι υπόλοιπες μορφές υδρογόνου, οι οποίες δεν θα αποδίδουν CO₂ στην ατμόσφαιρα, και στα αμέσως επόμενα χρόνια η πιο εφικτή επιλογή είναι αυτή του Μπλε Υδρογόνου, καθώς το κόστος για παραγωγή καθαρού υδρογόνου παραμένει ακόμα σε δυσθεώρητα υψηλά επίπεδα.

1.4. Εισχώρηση του H₂ στο ενεργειακό σύστημα

Όπως αναφέρθηκε, ένα κλιματικά ουδέτερο ενεργειακό σύστημα θα βασιστεί σε μεγάλο ποσοστό στον ανανεώσιμο ηλεκτρισμό, ωστόσο όσον αφορά τα ορυκτά καύσιμα η αντικατάστασή τους θα ήταν πιο πρακτικό και αποδοτικό να γίνει από ένα πράσινο καύσιμο όπως το υδρογόνο, ειδικά στις περιπτώσεις της βαριάς βιομηχανίας, παρά απευθείας από τον ηλεκτρισμό. Η ενσωμάτωση του υδρογόνου στο σύστημα απαιτεί τεράστια αύξηση της ανανεώσιμης ηλεκτρικής ενέργειας προκειμένου να παραχθεί, όπως επίσης και επενδύσεις για υποδομές αποθήκευσης και μεταφοράς. Το οικονομικό κόστος μπορεί να μετριαστεί με την τροποποίηση των υπαρχόντων υποδομών φυσικού αερίου, ώστε να αξιοποιηθούν για την αποθήκευση και την μεταφορά του υδρογόνου.

Στο ακόλουθο σχήμα φαίνεται η ποσότητα υδρογόνου, που σύμφωνα με εκτιμήσεις θα απαιτείται από την αγορά το 2050, καθώς και τους τομείς κατανάλωσής του.



Σχήμα 1.4. Ετήσια ζήτηση υδρογόνου και τομείς κατανάλωσης (2050) [4].

Συγκεκριμένα, εκτιμάται ότι στην Ευρώπη η ετήσια ζήτηση για κάλυψη ενεργειακών αναγκών μέσω υδρογόνου θα είναι 2300 TWh. Από αυτές αναμένεται να αξιοποιηθούν:

- 1200 TWh στην βιομηχανία, με μόνο 200 TWh να απευθύνονται στην βαριά βιομηχανία για χρήση σε υψηλές θερμοκρασίες.
- 650 TWh για παραγωγή ηλεκτρισμού σε απομονωμένες περιοχές.
- 300 TWh ως καύσιμο στις μεταφορές.
- 150 TWh ως καύσιμο για θέρμανση κτιρίων. Η συγκεκριμένη ποσότητα μπορεί να επεκταθεί και στις 600 TWh σύμφωνα με κάποια πιο αισιόδοξα σενάρια.

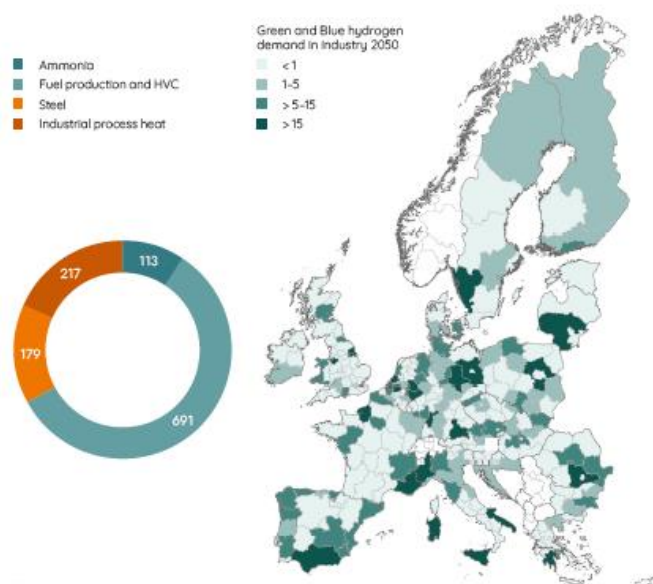
1.4.1. Βιομηχανία

Ο ηλεκτρισμός που καταναλώνεται στις βιομηχανικές διεργασίες είναι δυνατό να απελευθερωθεί από τον άνθρακα κάνοντας την μετάβαση στην χρήση ανανεώσιμης ηλεκτρικής ενέργειας. Όπως ήδη αναφέρθηκε διεργασίες που απαιτούν σημαντικά ποσά θερμότητας θα μπορούσαν να αξιοποιήσουν τον ηλεκτρισμό, παρόλα αυτά με την αύξηση των θερμοκρασιών της απαιτούμενης θερμότητας αυτό γίνεται ολοένα και λιγότερο

αποδοτικό. Για να μετατραπούν οι διεργασίες αυτές σε κλιματικά ουδέτερες, υπάρχουν 2 εναλλακτικές: είτε η αιχμαλώτιση των ρύπων μετά την καύση και η αποθήκευση τους (CCS), είτε η στροφή σε καύσιμα που δεν συνδέονται με απελευθερώσεις προϊόντων άνθρακα, όπως το μπλε και πράσινο υδρογόνο ή το βιομεθάνιο, το οποίο σε συνδυασμό με κάποιο σύστημα απορρόφησης και αποθήκευσης των ρύπων δύναται να αποφέρει αρνητικό πρόσημο στις εκπομπές άνθρακα.

Οι βιομηχανίες που ευθύνονται για τις περισσότερες εκπομπές ρύπων είναι κυρίως οι χημικές και οι πετροχημικές, των βαρέων μετάλλων και του τσιμέντου. Η πλειονότητα των εκπομπών οφείλονται στην καύση ελαίων, φυσικού αερίου και λυχνίτη για την δημιουργία θερμότητας.

Στον παρακάτω χάρτη της Ευρώπης φαίνονται οι προβλέψεις για την ζήτηση της αγοράς, σε μπλε και πράσινο υδρογόνο όπως επίσης και η ζήτηση ανά βιομηχανικό κλάδο. Μπορεί να παρατηρηθεί πως το μεγαλύτερο μερίδιο αναμένεται στην παραγωγή αμμωνίας με 691 TWh, ενώ για τους υπόλοιπους κλάδους (παραγωγή καυσίμου, σιδήρου, διαφόρων διεργασιών που απαιτούν υψηλά ποσά θερμότητας) αναμένονται παρεμφερείς ποσότητες, με 113 TWh, 179 TWh και 217 TWh αντίστοιχα [4].



Σχήμα 1.5. Ετήσια ζήτηση υδρογόνου στην βιομηχανία (2050)[9].

1.4.2. Μεταφορές

Ο τομέας των μεταφορών στην Ευρώπη ευθύνεται για το 25% των εκπομπών θερμοκηπίου [5], γεγονός που τον καθιστά δεύτερο στην σχετική λίστα. Επιπροσθέτως, αποτελεί τον μοναδικό κλάδο που έχει σημειώσει άνοδο 33% [6] στις εκπομπές άνθρακα συγκριτικά με το 1990, όταν όλοι οι υπόλοιποι κλάδοι έχουν σημειώσει πρόοδο μειώνοντας τις επιβλαβείς απελευθερώσεις τους. Προκειμένου, οι μεταφορές να απαλλαγούν από τον άνθρακα και τα παράγωγα του, χρειάζεται ένας συνδυασμός μετάβασης σε πράσινα καύσιμα, τεχνολογικών καινοτομιών αλλά και ατομικής ανάληψης ευθύνης.

Οι δυσκολίες στην ενεργειακή μετάβαση ποικίλουν ανάλογα με το μεταφορικό μέσο, καθώς για παράδειγμα τα μικρά μεταφορικά μέσα (αμάξια, μηχανές) είναι σχετικά εύκολη και ήδη έχει τεθεί σε εφαρμογή η μετατροπή τους σε ηλεκτροκίνηση. Το ίδιο δεν ισχύει για οχήματα υψηλής ισχύος που μεταφέρουν μεγάλα φορτία για αξιοσημείωτες αποστάσεις, καθώς στις περιπτώσεις αυτές δεν υπάρχει η δυνατότητα συχνού ανεφοδιασμού ενώ απαιτούνται και τεράστια ποσά ενέργειας για να τροφοδοτήσουν την κίνηση του οχήματος. Συνεπώς, είναι μονόδρομος η χρήση ενεργειακά πυκνών και πράσινων καυσίμων όπως το υδρογόνο, το οποίο αναμένεται να διαδραματίσει κυρίαρχο ρόλο στις αεροπορικές και βαρέου τύπου χερσαίες μεταφορές.

Αναφορικά με τις χερσαίες μεταφορές, οι οποίες αποτελούν την βασική πηγή εκπομπής ρύπων ανάμεσα σε όλα τα μεταφορικά μέσα (περίπου το 70%), ο τρόπος με τον οποίο θα συντελεστεί η μετάβαση στην κλιματική ουδετερότητα διαφέρει ανάλογα με το μέγεθος του οχήματος. Συγκεκριμένα, τα μικρά επιβατηγά, όπως ήδη εφαρμόζεται, αναμένεται να στηριχτούν στους ηλεκτρικούς κινητήρες. Με την πάροδο των ετών, η αύξηση της χωρητικότητας των μπαταριών και η ταυτόχρονη μείωση του κόστους των πρώτων υλών, συμβάλλει ώστε τα ηλεκτροκίνητα οχήματα να βρουν ευνοϊκό έδαφος για ευρεία χρήση, ενώ με ταχείς ρυθμούς αναπτύσσονται και οι υποδομές για την υποστήριξή τους. Πέραν των άλλων, βρίσκονται σε στάδιο εξέλιξης και κινητήρες κυψέλης καυσίμου υδρογόνου, ωστόσο οι προβλέψεις για τον συγκεκριμένο τύπο οχημάτων κάνουν λόγο για χρήση

ηλεκτροκίνησης στην συντριπτική πλειονότητα. Το ίδιο ωστόσο δεν ισχύει για τα βαρέως τύπου οχήματα. Στην μεταβατική περίοδο κυρίαρχο ρόλο θα διαδραματίσει το υδροποιημένο φυσικό αέριο, ωστόσο μακροπρόθεσμα το υδρογόνο και το βιομεθάνιο είναι οι πιο ελκυστικές επιλογές, με το βιομεθάνιο να βρίσκει μεγαλύτερη εφαρμογή σύμφωνα με τους στόχους για το 2050 στην θέρμανση των κτιρίων. Έτσι, το βασικό καύσιμο για τα χερσαία οχήματα μεγάλων αποστάσεων θα καταλήξει να είναι το υδρογόνο, και για να μπορέσει να αξιοποιηθεί θα χρειαστεί η μετατροπή του δικτύου διανομής φυσικού αερίου. Για να καταστεί εφικτή η προμήθεια των οχημάτων με κινητήρα κυψέλης καυσίμου, απαιτείται υδρογόνο υψηλής καθαρότητας, αφού η συγκεκριμένη τεχνολογία έχει μεγάλη ευαισθησία όταν στο καύσιμο εμπεριέχονται μόρια σκόνης, βρωμιάς κλπ. Η συγκεκριμένη φίλτραση είναι εφικτό να γίνεται μεμονωμένα στους σταθμούς ανεφοδιασμού, και όχι σε όλο το δίκτυο καθώς οι υπόλοιπες εφαρμογές (π.χ. βιομηχανία) δεν απαιτούν τόσο υψηλά επίπεδα καθαρότητας καυσίμου.

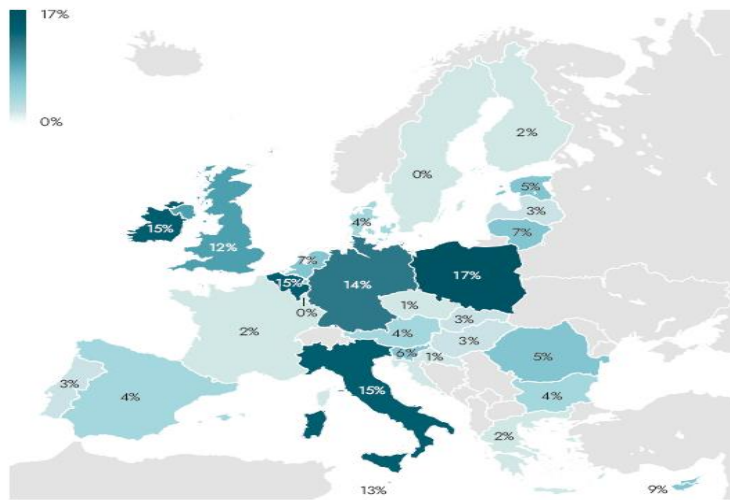
Παρόμοια δεδομένα με τις χερσαίες μεταφορές ισχύουν και για τις αεροπορικές, δηλαδή η τάση δείχνει μια προτίμηση σε ηλεκτρικούς κινητήρες για μικρές διαδρομές ενώ για μεγαλύτερα ταξίδια η εφικτή επιλογή αφορά βιώσιμα αεροπορικά καύσιμα (SAFs), τα οποία παράγονται από πηγές όπως είναι τα δασοκομικά και γεωργικά απόβλητα, το χρησιμοποιημένο μαγειρικό λάδι, άνθρακας που αιχμαλωτίζεται πριν απελευθερωθεί στον αέρα και το πράσινο υδρογόνο. Ο μακροπρόθεσμος στόχος για το 2050 είναι το 80% των αεροπορικών μεταφορών να τροφοδοτούνται από SAFs το οποίο θα καλύπτεται κατά 40% από βιοκαύσιμα και 40% από συνθετική κηροζίνη, το 10% από υδρογόνο και το υπόλοιπο 10% από μπαταρίες ηλεκτροκίνησης.

Όσον αφορά την ναυτιλία, υπολογίζεται ότι μέχρι το 2050 με βάση το πιο αισιόδοξο σενάριο, οι ενδοχώριες θαλάσσιες μεταφορές θα μπορούν να πραγματοποιηθούν 100% με ηλεκτρική ενέργεια, οι ευρωπαϊκές μεταφορές με υβριδικά μοντέλα ηλεκτροκίνησης και bio-LNG, ενώ τα υπερατλαντικά αποκλειστικά με bio-LNG. Πέραν των άλλων, η αμμωνία και η μεθανόλη κερδίζουν έδαφος εξαιτίας των ενδεχόμενων μηδενικών εκπομπών άνθρακα και τη σχετικά υψηλή ενεργειακή πυκνότητα σε σύγκριση με το υδρογόνο και τις

μπαταρίες. Με αυτόν το τρόπο προσφέρονται δυνατότητες για την απανθρακοποίηση του ναυτιλιακού τομέα, ωστόσο η χρήση των εναλλακτικών αυτών καυσίμων απαιτεί περαιτέρω έρευνα και ανάπτυξη , για να ξεπεραστούν τεχνικές προκλήσεις αλλά και σημαντικά θέματα ασφαλείας[6].

1.4.3. Παραγωγή Ισχύος

Το σύστημα παραγωγής ισχύος στην Ευρώπη εξελίσσεται με ταχείς ρυθμούς προκειμένου να περιορίσει τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα στο ελάχιστο σύμφωνα με τους στόχους που έχουν τεθεί. Συνολικά, η ζήτηση για ηλεκτρική ενέργεια αναμένεται να αυξηθεί περαιτέρω της επόμενες δεκαετίες, συνεχίζοντας την αυξητική τάση που ήδη έχει , καθώς σε σχέση με το 1990 το 2018 παρατηρήθηκε αύξηση 45% [7]. Το μεγαλύτερο φορτίο για την επίτευξη των βιώσιμων στρατηγικών στον τομέα της παραγωγής ενέργειας αναλαμβάνουν οι ανανεώσιμες πηγές (αιολική, ηλιακή, υδροηλεκτρική), οι οποίες διεισδύουν σταδιακά περισσότερο στο σύστημα παραγωγής, ενώ παράλληλα περιορίζεται η χρήση καυσίμων που περιέχουν άνθρακα. Μέρος της παραγωγής καλύπτει επίσης η πυρηνική ενέργεια. Για την βιωσιμότητα ενός ενεργειακού συστήματος απαλλαγμένου από τις ανεπιθύμητες εκπομπές, χρειάζεται απαραίτητα και η ικανότητα αποθήκευσης της περίσσιας ενέργειας, ειδικά από πηγές που παρουσιάζουν μεταβολές εξαρτώμενες από τις καιρικές συνθήκες, όπως η αιολική και η ηλιακή, και την συγκεκριμένη ανάγκη μπορεί να καλύψει το υδρογόνο. Για την παραγωγή ηλεκτρισμού από πράσινο υδρογόνο, ήδη βρίσκονται σε ανάπτυξη τουρμπίνες τροφοδοτούμενες εν μέρει από υδρογόνο, και στα επόμενα χρόνια το ποσοστό τροφοδοσίας από υδρογόνο αναμένεται να φτάσει στο 100%. Οι αναλύσεις προβλέπουν ότι το 2050 η ζήτηση του υδρογόνου για παραγωγή ισχύος θα είναι περίπου 620TWh για την Ευρώπη. Στην εικόνα φαίνεται το ποσοστό συμμετοχής υδρογόνου στην παραγωγή ηλεκτρισμού ανά χώρα, με την Ελλάδα να βρίσκεται στο 2% [9].



Σχήμα 1.6. Ποσοστό συμμετοχής υδρογόνου στην παραγωγή ισχύος (2050)[9].

1.4.4. Κτήρια

Γενικά, οι ενεργειακές απαιτήσεις των κτηρίων αποτελούν το 40% των ενεργειακών απαιτήσεων της Ευρωπαϊκής Ένωσης και ευθύνονται αντίστοιχα για το 36% των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου [8]. Η μείωση των εκπομπών από την θέρμανση των κτηρίων μπορεί να αμβλυνθεί από έναν συνδυασμό ενεργειών: την μείωση των θερμικών απωλειών με προσθήκη καλύτερων μονωτικών υλικών, τον καλύτερο αερισμό και την χρήση πράσινης ενέργειας είτε μέσω ηλεκτρισμού είτε μέσω καυσίμων. Καύσιμα που αναμένεται να συμβάλλουν στον συγκεκριμένο σκοπό είναι το βιομεθάνιο και το υδρογόνο. Οι ιδιότητες του βιομεθανίου είναι σε σημαντικό βαθμό όμοιες με του φυσικού αερίου, συνεπώς η χρήση του υπάρχοντος δικτύου διανομής και αποθήκευσης μπορεί να πραγματοποιηθεί χωρίς τροποποιήσεις. Επιπροσθέτως, το βιομεθάνιο δύναται να χρησιμοποιηθεί και στις υβριδικές αντλίες θερμότητας αντικαθιστώντας πλήρως το φυσικό αέριο. Το υδρογόνο επομένως θα διαδραματίσει συμπληρωματικό ρόλο στην κάλυψη των ενεργειακών αναγκών των κτηρίων, και το ποσοστό συμμετοχής του θα εξαρτηθεί άμεσα από την διαθέσιμη ποσότητα βιομεθανίου. Ήδη υπάρχουν σε εμπορική εφαρμογή καυστήρες υδρογόνου ενώ απλή είναι και η μετατροπή καυστήρων φυσικού αερίου και υβριδικών αντλιών ώστε να λειτουργούν με καύση υδρογόνου.

2. Εφοδιαστική Αλυσίδα Υδρογόνου

2.1. Παραγωγή Υδρογόνου

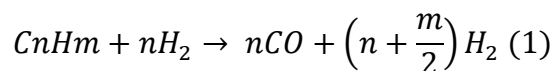
Η παραγωγή του υδρογόνου είναι δυνατό να πραγματοποιηθεί μέσω πληθώρας διεργασιών, έχοντας ως πρώτη ύλη είτε υγρά είτε αέρια ρευστά. Οι συγκεκριμένες διεργασίες διαφέρουν ως προς το πρωτεύον καύσιμο που χρησιμοποιούν (αμμωνία, μεθανόλη, αέριοι υδρογονάνθρακες, νερό) καθώς και ως προς την χημική αντίδραση που συντελείται (αποσύνθεση, αναμόρφωση μέσω ατμού, ηλεκτρόλυση, μερική οξειδωση).

2.1.1. Παραγωγή μέσω ορυκτών καυσίμων

2.1.1.1. Αναμόρφωση φυσικού αερίου μέσω ατμού

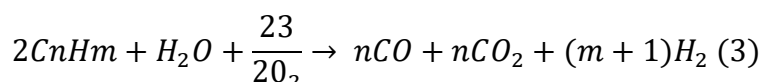
Η αναμόρφωση φυσικού αερίου μέσω ατμού αποτελεί μια ενδόθερμη, καταλυτική διεργασία η οποία πραγματοποιείται σε θερμοκρασιακό εύρος 970-1100K και πιέσεις ως και 3.5MPa, ενώ το ρόλο του καταλύτη διαδραματίζει το νικέλιο. Υψηλή περιεκτικότητα υδρογόνου στα ορυκτά καύσιμα τα καθιστά αυτόματα καταλληλότερα για την συγκεκριμένη διεργασία, με το φυσικό αέριο να είναι το πιο σύνηθες στην χρήση. Κατά την αντίδραση παράγεται ποσότητα ατμού που δεν είναι χρήσιμη για το σύστημα και μπορεί να αξιοποιηθεί για την παραγωγή ηλεκτρισμού. Πλεονεκτήματα της μεθόδου είναι ότι δεν απαιτείται οξυγόνο, η σχετικά χαμηλές θερμοκρασίες λειτουργίας και η καλή αναλογία παραγωγής υδρογόνου σε σύγκριση με το μονοξειδίου του άνθρακα. Το βασικότερο μειονέκτημα είναι οι μεγάλες ποσότητες διοξειδίου που απελευθερώνονται κατά την παραγωγή εξαιτίας των ορυκτών καυσίμων τόσο στην παραγωγή υδρογόνου όσο

και στην δημιουργία θερμότητας για την πραγματοποίηση της διεργασίας. Ο χημικός τύπος της διεργασίας είναι ο εξής [11,12,13,14]:



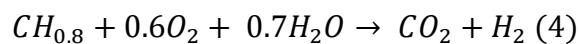
2.1.1.2. Μερική οξείδωση υδρογονανθράκων

Η μερική οξείδωση υδρογονανθράκων είναι εξώθερμη αντίδραση, στην οποία συμμετέχουν οξυγόνο και ατμός σε σχετικά υψηλή πίεση και ανάλογα με το ορυκτό που χρησιμοποιείται για καύσιμο επιλέγεται εάν θα γίνει χρήση ή μη, καταλύτη. Βασικό πλεονέκτημα της μεθόδου αποτελεί η πληθώρα καυσίμων, αέρια και υγρά, που δύναται να αξιοποιηθούν για την παραγωγή υδρογόνου, ενώ αντιθέτως και εδώ παρατηρούνται αξιοσημείωτες ποσότητες απελευθερώσεων μονοξειδίων και διοξειδίων του άνθρακα στην ατμόσφαιρα. Ο χημικός τύπος είναι ο εξής [11,12,13,14]:



2.1.1.3. Αεριοποίηση άνθρακα

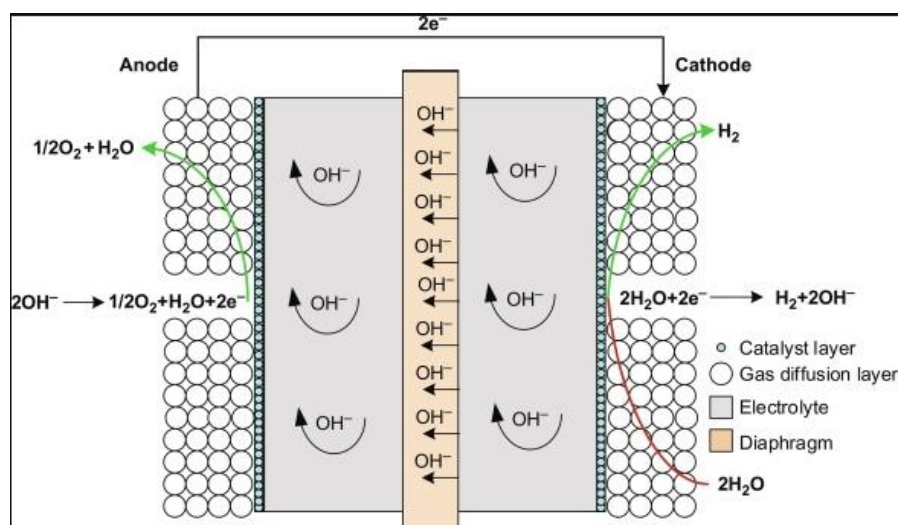
Οι μηχανισμοί της αεριοποίησης του άνθρακα έχουν αρκετά κοινά σημεία με αυτούς της μερικής οξείδωσης, ειδικότερα του ακατέργαστου πετρελαίου, δηλαδή δεν απαιτείται η παρουσία καταλύτη και οι ανάγκες για αποθείωση είναι περιορισμένες, ενώ και σε αυτή την χημική αντίδραση παράγονται επιβλαβή αέρια για την ατμόσφαιρα (διοξείδιο και μονοξείδιο του άνθρακα). Ο χημικός τύπος της είναι ο εξής [11,12,13,14]:



2.1.2. Παραγωγή μέσω νερού

2.1.2.1. Ηλεκτρόλυση

Ηλεκτρόλυση ονομάζεται η διάσπαση του νερού στα στοιχεία που το αποτελούν, το οξυγόνο και το υδρογόνο, μέσω της όδευσης ηλεκτρικού ρεύματος από δύο ηλεκτρόδια. Γενικά οι ηλεκτρολύτες με εμπορική εφαρμογή και χαμηλές θερμοκρασίες λειτουργίας, επιτυγχάνουν απόδοση στο εύρος 56-73%. Η συγκεκριμένη διεργασία ουσιαστικά μετατρέπει η ηλεκτρική ενέργεια σε χημική με την μορφή του υδρογόνου και με παραπροϊόν το οξυγόνο. Αυτή τη στιγμή ο πιο συνηθισμένος τρόπος ηλεκτρόλυσης βασίζεται σε αλκαλικούς ηλεκτρολύτες, ωστόσο βρίσκονται υπό συνεχή ανάπτυξη και άλλες διατάξεις όπως οι μεμβράνες ανταλλαγής πρωτονίων (PEM) και τα κελιά στερεών οξειδίων (SOEC). Η τελευταία διεργασία αντιμετωπίζει προβλήματα αναφορικά με την διάβρωση, τον τρόπο στεγανοποίησης και την κυκλοφορία της θερμότητας, ενώ αντίθετα οι μεμβράνες ανταλλαγής πρωτονίων δεν συνδέονται με τα προαναφερθέντα προβλήματα, είναι πιο αποδοτικά από τα αλκαλικά συστήματα αλλά ταυτόχρονα και πιο ακριβά. Τέλος, οι αλκαλικοί ηλεκτρολύτες αποτελούν μια λύση που βρίσκεται σε προχωρημένο στάδιο ανάπτυξης, είναι οι πιο φθηνοί, ωστόσο έχουν την μικρότερη απόδοση [11,12,13,14].



Σχήμα 2.1. Τυπική διάταξη αλκαλικού συστήματος ηλεκτρόλυσης [12].

2.1.2.2. Θερμόλυση

Κατά την διεργασία της θερμόλυσης, ή θερμοχημικής διάσπασης νερού, το νερό διασπάται σε υδρογόνο και οξυγόνο αποκλειστικά μέσω πρόσδοσης θερμότητας. Για να πραγματοποιηθεί η διάσπαση το νερό πρέπει να φτάσει τους 2500°C, ωστόσο δεν είναι εύκολη η εύρεση ούτε υλικών ανθεκτικών σε τόσο υψηλές θερμοκρασίες, ούτε πηγών ικανών να παράξουν τα απαραίτητα ποσά θερμότητας. Για αυτό το λόγο χρησιμοποιούνται χημικά που μειώνουν τις θερμοκρασίες που πραγματοποιείται η αντίδραση, ακόμα και στους 50°C, με αντίστοιχη αύξηση της πίεσης. Η απόδοση της μεθόδου πλησιάζει το 50%. Η διεργασία της θερμόλυσης βρίσκεται προς το παρόν σε αρχικά στάδια ανάπτυξης και δεν είναι σε θέση να ανταγωνιστεί άλλες τεχνολογίες παραγωγής υδρογόνου. Θεωρείται ότι η διενέργεια της διεργασίας σε μεγαλύτερα μεγέθη θα βελτιώσει την θερμική απόδοση, καθιστώντας πιο ανταγωνιστική την εν λόγω τεχνολογία [13,14].

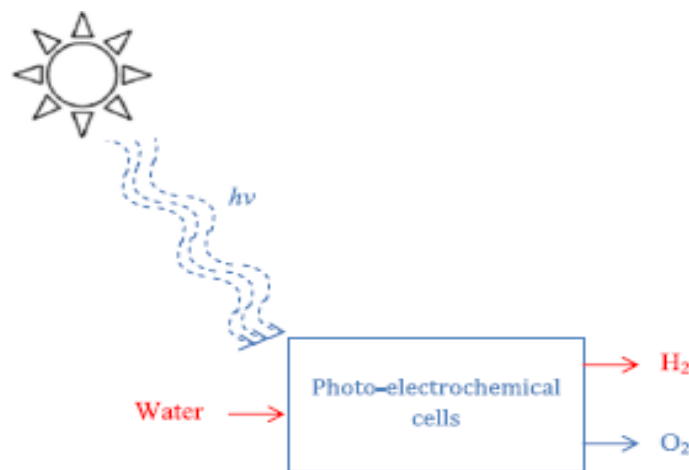
2.1.2.3. Φωτόλυση

Η φωτόλυση είναι η διεργασία με την οποία το φως του ήλιου χρησιμοποιείται για να διεγείρει τους ημιαγωγούς που βρίσκονται σε υγρή φάση σε μία συσκευή που μετατρέπει το φως σε χημική ενέργεια προκειμένου να διασπάσει το νερό σε υδρογόνο και οξυγόνο. Η διεργασία μπορεί να αναλυθεί ως εξής [13,14]:

- a) Ένα φωτόνιο με μεγαλύτερη ενέργεια από το διάκενο ζώνης του ημιαγωγού προσκρούει στο ανόδιο και δημιουργεί ένα ζεύγος τρύπας ηλεκτρονίου (electron-hole pair)
- b) Οι τρύπες αποσυνθέτουν το νερό στην επιφάνεια του ανοδίου, δημιουργώντας ιόντα υδρογόνου και οξυγόνο σε αέρια μορφή, ενώ τα ηλεκτρόνια κατευθύνονται προς το καθόδιο.
- c) Τα ιόντα υδρογόνου περνούν διαμέσου του ηλεκτρολύτη, αντιδρούν με τα ηλεκτρόνια και σχηματίζουν μόρια αέριου υδρογόνου.

- d) Το υδρογόνο και το οξυγόνο σε αέρια μορφή πλέον, διαχωρίζονται με την χρήση ημιπερατής μεμβράνης.

Τα πλεονεκτήματα αυτών των συστημάτων περιλαμβάνουν την χρήση υλικών χαμηλού κόστους και την δυνατότητα για μελλοντική υψηλή απόδοση. Οι προσπάθειες της τρέχουσας έρευνας επικεντρώνονται στην αντιμετώπιση της ανεπαρκούς απορρόφησης του ηλιακού φωτός καθώς και της ασταθούς ικανότητας παραγωγής εξαιτίας της εξάρτησης από τον καιρό.



Σχήμα 2.2. Διάγραμμα διεργασιών κατά την φωτόλυση [14].

2.1.3. Παραγωγή μέσω βιολογικών καυσίμων

Η βιομάζα αποτελεί ανανεώσιμη πηγή ενέργειας που προέρχεται από φυτικά και ζωικά υλικά όπως, ενεργειακά υπολείμματα και υπολείμματα καλλιεργειών, ξυλεία από δάση, γρασίδι, βιομηχανικά υπολείμματα, ζωικά και δημοτικά απόβλητα. Η βιομάζα είναι οργανική ύλη στην οποία η ενέργεια του φωτός αποθηκεύεται σε χημικούς δεσμούς μέσω της φωτοσύνθεσης. Οι θερμοχημικές και βιολογικές μέθοδοι είναι οι δύο διαθέσιμες επιλογές για την παραγωγή υδρογόνου από βιομάζα. Αν και οι βιολογικές διεργασίες είναι φιλικότερες προς το περιβάλλον και απαιτούν μικρότερα ποσά ενέργειας, καθώς

διενεργούνται κάτω από ήπιες συνθήκες, εν τέλει παρέχουν αποδόσεις παραγωγής υδρογόνου ανάλογα με την πρώτη ύλη που χρησιμοποιούν. Από την άλλη, θερμοχημικές διεργασίες είναι ταχύτερες και προσφέρουν υψηλότερη στοιχειομετρική απόδοση υδρογόνου με την αεριοποίηση να αποτελεί την πιο ελκυστική επιλογή από περιβαλλοντική και οικονομική σκοπιά.

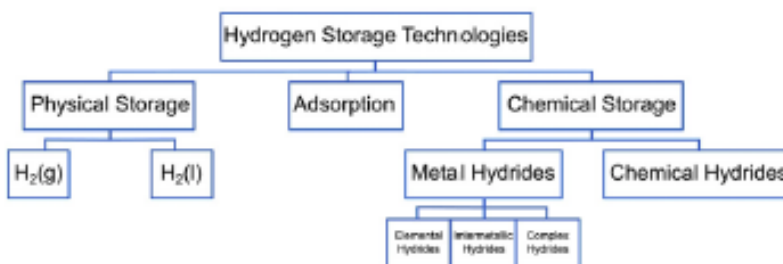
Οι θερμοχημικές διεργασίες περιλαμβάνουν κυρίως την πυρόλυση και την αεριοποίηση. Και οι δύο διαδικασίες μετατροπής παράγουν, αέρια προϊόντα, όπως το μεθάνιο και το μονοξείδιο του άνθρακα, τα οποία με περαιτέρω επεξεργασία μέσω της αναμόρφωσης με ατμό, δύναται να αυξήσουν την παραγωγή υδρογόνου. Η πυρόλυση είναι μια θερμοχημική διεργασία κατά την οποία μπορούν να παραχθούν υγρά έλαια, στερεός άνθρακας και αέρια στοιχεία, μέσω τη θέρμανσης της βιομάζας σε θερμοκρασία 650–800K σε πιέσεις 0.1–0.5 MPa [14]. Η χημική αντίδραση πραγματοποιείται σε περιβάλλον απαλλαγμένο εντελώς από οξυγόνο. Το μεθάνιο και τα υπόλοιπα αέρια που περιέχουν υδρογονάνθρακα μπορούν να αξιοποιηθούν για επιπλέον παραγωγή υδρογόνου με αναμόρφωση μέσω ατμού. Αφού το μονοξείδιο του άνθρακα μετατραπεί σε διοξείδιο και υδρογόνο, κατόπιν καθαρισμού παράγεται το επιθυμητό υδρογόνο. Η αεριοποίηση από την άλλη είναι η θερμοχημική μετατροπή της βιομάζας σε αέριο καύσιμο, και λαμβάνει χώρα σε κάποιο αέριο μέσο όπως ο αέρας ή το οξυγόνο και ο ατμός, θερμοκρασιακό εύρος 500-1400°C, και πιέσεις από 1-33bar, ανάλογα με το μέγεθος του εργοστασίου και εφαρμογή για την οποία προορίζεται το καύσιμο. Αφού γίνει η αεριοποίηση της βιομάζας, το μείγμα αερίων υπόκειται σε παρόμοια διεργασία με αυτή της πυρόλυσης μέχρι το στάδιο παραγωγής υδρογόνου. Ανάμεσα στις δύο μεθόδους η αεριοποίηση παρέχει πολύ καλύτερη απόδοση από την πυρόλυση, και μπορεί να φτάσει μέχρι και 52% καθιστώντας, χρήσιμη εναλλακτική για την παραγωγή υδρογόνου.

Οι βασικές βιολογικές μέθοδοι για παραγωγή υδρογόνου σε αέρια μορφή είναι οι εξής: η άμεση και η έμμεση βιοφωτόλυση, η φωτεινή και η σκοτεινή ζύμωση και οι πολυβάθμιες φωτεινές ή σκοτεινές ζυμώσεις. Οι πρώτες ύλες για τις εν λόγω διεργασίες είναι το νερό για τις περιπτώσεις της φωτόλυσης, κατά τις οποίες το υδρογόνο παράγεται από κάποια

βακτήρια η φύκια απευθείας μέσω των συστημάτων υδρογονάσης, και η βιομάζα για τις περιπτώσεις των ζυμώσεων, όπου υλικά που περιέχουν υδατάνθρακες μετατρέπονται σε οργανικά οξέα και στην συνέχεια σε αέριο υδρογόνο μέσω βιολογικών διεργασιών[15].

2.2. Αποθήκευση Υδρογόνου

Με την συνεχή διείσδυση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, οι οποίες χαρακτηρίζονται από διακυμάνσεις στην παραγωγή, εξαρτώμενες από τα καιρικά φαινόμενα που επικρατούν ανά περίσταση, γίνεται πιο έντονη η ανάγκη για την αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας ώστε να εξισορροπείται η προσφορά με την ζήτηση, και αρκετές βιομηχανίες επιδιώκουν την ανεξάρτηση τους από τα ορυκτά καύσιμα. Το υδρογόνο αναμένεται να διαδραματίσει κυρίαρχο ρόλο στην κάλυψη των παραπάνω αναγκών, συνεπώς η αποθήκευση του θεωρείται εξίσου σημαντική. Μελέτες για την αποθήκευση του υδρογόνου είναι ήδη σε εξέλιξη, συγκεκριμένα για την χρήση του ως καύσιμο σε μεταφορικά μέσα, όπου απαιτείται η αποθήκευση του σε διαφορετικά σημεία στην εφοδιαστική αλυσίδα. Γενικά η αποθήκευση του υδρογόνου, αποτελεί πρόκληση εξαιτίας της πολύ μικρής του πυκνότητας, καθώς ενδεικτικά ένα 1kg υδρογόνου σε αέρια μορφή καταλαμβάνει περίπου 11m³ σε θερμοκρασία δωματίου και ατμοσφαιρική πίεση [16]. Για να μπορέσει το υδρογόνο να είναι ανταγωνιστικό στην αγορά χρειάζεται να αυξηθεί η πυκνότητα του κατά την αποθήκευση και αυτό μπορεί να γίνει με διάφορες μεθόδους, οι οποίες συγκεντρωτικά παρουσιάζονται στο σχήμα 2.3.



Σχήμα 2.3. Τεχνολογίες αποθήκευσης υδρογόνου [16].

2.2.1. Αποθήκευση καθαρού υδρογόνου

2.2.1.1. Αποθήκευση συμπιεσμένου αέριου υδρογόνου

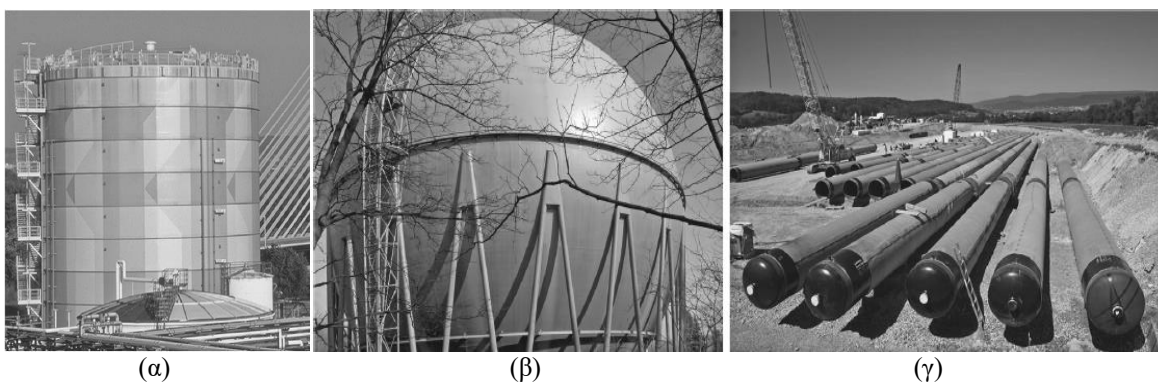
Ένα σύστημα αποθήκευσης συμπιεσμένου αέριου υδρογόνου αποτελείται από τα μέρη που γίνεται η αποθήκευση καθώς και από τους συμπιεστές που χρειάζονται για να επιτευχθεί η απαραίτητη πίεση. Εξαιτίας περιορισμών που σχετίζονται με τις ιδιότητες των υλικών των αποθηκευτικών μέσων αλλά και των λειτουργικών εξόδων, το αέριο υδρογόνο δεν αποθηκεύεται σε πιέσεις ανώτερες των 100 bar για δεξαμενές στην επιφάνεια, και πάνω από 200 bar για υπόγειες δεξαμενές, γεγονός που περιορίζει σημαντικά την τιμή της πυκνότητας του υδρογόνου κατά την αποθήκευση. Συγκεκριμένα, για συνθήκες πίεσης 100 bar και θερμοκρασίας 20°C, η αντίστοιχη πυκνότητα του αέριου υδρογόνου είναι 7,8 kg/m³, τιμή ιδιαίτερα χαμηλή που καθιστά δεδομένη την απαίτηση για μεγάλους αποθηκευτικούς χώρους.

Όπως αναφέρθηκε η αποθήκευση του συμπιεσμένου υδρογόνου μπορεί να γίνει είτε πάνω είτε κάτω από την επιφάνεια του εδάφους. Γενικά, το επενδυτικό κόστος για τις εφαρμογές σε μεγάλη κλίμακα πάνω στο έδαφος είναι μεγαλύτερο, όπως συμβαίνει εξάλλου και σε όλα τις περιπτώσεις αποθήκευσης αέριων καυσίμων, και συνεπώς δεν αποτελεί συνήθη τακτική. Ήδη μεγάλες ποσότητες αέριου υδρογόνου αποθηκεύονται υπόγεια, και συγκεκριμένα σε κοιλότητες αλατιού, επειδή το κόστος κατασκευής τους είναι σχετικά χαμηλό, δεν παρατηρούνται σημαντικές διαρροές, υπάρχει γρήγορη αναρρόφηση του υδρογόνου και τέλος οι πιθανότητες να μολυνθεί το υδρογόνο είναι χαμηλές. Το μειονέκτημα του ανωτέρω τρόπο αποθήκευσης είναι η γεωλογική ασυμβατότητα πολλών περιοχών ώστε να δημιουργηθούν κοιλότητες αλατιού.

Μια ακόμα εναλλακτική για την αποθήκευση του συμπιεσμένου αέριου υδρογόνου είναι η χρήση μεταλλικών δεξαμενών. Παρόλο που έχουν υψηλότερο κόστος εγκατάστασης,

διασφαλίζουν την σταθερότητα και καθαρότητα του αποθηκευόμενου μέσου, ενώ δεν εξαρτώνται και από την τοπολογία του εδάφους. Η τελική πυκνότητα του αερίου υδρογόνου εξαρτάται από την αντοχή σε πίεση των υλικών της δεξαμενής. Συχνά επιλέγεται η τοποθέτηση μέρους της μεταλλικής δεξαμενής υπόγεια, επειδή έτσι εξοικονομείται χώρος, παρέχεται προστασία από τις φυσικές φθορές και αυξάνεται η μόνωση των τοιχωμάτων. Αντίθετα, η επίβλεψη και συντήρηση καθίστανται δυσκολότερες εξαιτίας των δύσκολα προσβάσιμων περιοχών, ενώ ευνοούνται και τα φαινόμενα διάβρωσης. Υπάρχουν 3 τύποι μεταλλικών δεξαμενών [16]:

1. Δεξαμενές αερίων, με πιέσεις λίγο μεγαλύτερες της ατμοσφαιρικής.
2. Σφαιρικές δεξαμενές πίεσης, με πιέσεις μέχρι 20bar
3. Σωληνώσεις για αποθήκευση, με πιέσεις μέχρι 100bar.



Σχήμα 2.4. α) δεξαμενή αερίων, β) σφαιρική δεξαμενή πίεσης, γ) σωληνώσεις για αποθήκευση [37].

Από τις παραπάνω επιλογές, αυτή που συγκεντρώνει το μεγαλύτερο ενδιαφέρον, λόγω της μεγάλης πίεσης αποθήκευσης άρα και πυκνότητας είναι οι σωληνώσεις. Συνήθως, η διάμετρος τους κυμαίνεται στο 1.4m και το μήκος μπορεί να φτάσει αρκετά χιλιόμετρα, και τοποθετούνται μερικά μέτρα κάτω από την στάθμη του εδάφους. Η συγκεκριμένη τεχνική αποθήκευσης χρησιμοποιείται εδώ και δεκαετίες στο φυσικό αέριο, όμως η περίπτωση του υδρογόνου είναι δυσκολότερη, πιο απαιτητική και ακριβότερη, κυρίως εξαιτίας της ιδιότητας των μορίων του υδρογόνου να διεισδύουν στα τοιχώματα των σωληνώσεων, επιδρώντας αρνητικά στις μηχανικές τους ιδιότητες (γίνονται περισσότερο ψαθυρά).

2.2.1.2. Αποθήκευση υγροποιημένου υδρογόνου

Πέρα από την συμπίεση, ένας άλλος τρόπος αύξησης της πυκνότητας του υδρογόνου για πιο αποδοτική αποθήκευση είναι η συμπίκνωση ή υγροποίησή του. Το βασικό πλεονέκτημα είναι ότι δύναται να επιτευχθούν υψηλές τιμές πυκνότητας για μικρές πιέσεις. Για να γίνει κατανοητή η επίδραση της υγροποίησης στην αύξηση της πυκνότητας αξίζει να σημειωθεί πως η πυκνότητα του κορεσμένου υγρού υδρογόνου σε πίεση 1bar και -253°C είναι 70kg/m³.

Η βασική πρόκληση που αφορά την συγκεκριμένη μέθοδο είναι οι υψηλές ενεργειακές απαιτήσεις για να μετατραπεί το υδρογόνο σε υγρή μορφή. Αυτό οφείλεται αρχικά στο πολύ χαμηλό σημείο βρασμού του υδρογόνου στους -253°C για πίεση 1bar, όπως επίσης και στην ιδιότητα του να μην ψύχεται σε στραγγαλιστικές διεργασίες για θερμοκρασίες μεγαλύτερες των -73°C, γεγονός που καθιστά αναγκαία την ψύξη πριν την διεργασία υγροποίησης [17]. Αυτή τη στιγμή αποθηκεύονται παγκοσμίως 355 τόνοι LH₂ ανά ημέρα.

Properties	Value	Units	Conditions
Normal boiling temperature	20.268	K	$p_{(NTP)} = p_{(STP)} = 1.01\ 325\ \text{bar}$
Density of liquid hydrogen	70.78	kg m ⁻³	At normal boiling point
Density of gaseous hydrogen	1.338	kg m ⁻³	At normal boiling point
Physical energy density	8.49	MJ l ⁻¹	$p_{(NTP)} = p_{(STP)} = 1.01\ 325\ \text{bar}$
Heat of ortho-to-para conversion	555	kJ kg ⁻¹	At normal boiling point
Heat of vaporization	445.6	kJ kg ⁻¹	At normal boiling point

Σχήμα 2.5. Φυσικές και χημικές ιδιότητες υγροποιημένου υδρογόνου.

Από την στιγμή που πραγματοποιείται η υγροποίηση του υδρογόνου, η επόμενη πρόκληση αφορά την αποθήκευση με τον βέλτιστο τρόπο ώστε να ελαχιστοποιηθούν οι απώλειες

εξαιτίας της αεριοποίησης του, η οποία θεωρείται εκτός από απώλεια ενέργειας που καταβλήθηκε για την υγροποίηση, και απώλεια ποσότητας του ίδιου του υδρογόνου, αφού το αέριο υδρογόνο που δημιουργείται μέσα στη δεξαμενή πρέπει να εξαερωθεί προκειμένου να μην αυξηθεί η πίεση εντός των τοιχωμάτων. Οι συγκεκριμένη απώλεια εκφράζεται ως ποσοστό επί της συνολικής ποσότητας του υδρογόνου της δεξαμενής. Για να ελαχιστοποιηθεί η επιφάνεια ανταλλαγής θερμότητας μεταξύ της δεξαμενής και του περιβάλλοντος επιλέγεται συνήθως σφαιρικό σχήμα δεξαμενής καθώς έχει την βέλτιστη αναλογία επιφάνειας και όγκου. Οι δεξαμενές αυτές επίσης αποτελούνται από διπλό τοίχωμα, ενδιάμεσα του οποίου υπάρχει κενό, για να εκμηδενιστεί η μεταφορά θερμότητας μέσω αγωγής και συναγωγής. Ακόμα, για να περιοριστεί όσο το δυνατόν περισσότερο και η μετάδοση θερμότητας μέσω ακτινοβολίας χρησιμοποιούνται υλικά όπως πολυεστερικά φύλλα και ίνες γυαλιού. Με όλες τις παραπάνω τεχνικές λύσεις επιτυγχάνονται ποσοστά απωλειών (boil off rate) εξαιτίας της αεριοποίησης μέχρι και 0.1% ανά ημέρα. Αξίζει να σημειωθεί ότι εάν η εγκατάσταση της αποθήκευσης βρίσκεται κοντά στην μονάδα παραγωγής το υδρογόνο που αεριοποιείται μπορεί να προωθηθεί στην μονάδα για εκ νέου υγροποίηση, στα τελευταία στάδια της διαδικασίας παραγωγής.



Σχήμα 2.6. α) σφαιρική δεξαμενή LH₂, NASA β) οριζόντια δεξαμενή LH₂, Κέντρο Υδρογόνου Linde [37].

2.2.2. Αποθήκευση μέσω προσφόρησης

Η αποθήκευση υδρογόνου μέσω προσφόρησης εκμεταλλεύεται τους δεσμούς Van der Waals μεταξύ των μορίων υδρογόνου και διάφορων υλικών με μεγάλη ειδική επιφάνεια. Λόγω της αδυναμίας των χημικών δεσμών Van der Waals, χαμηλές θερμοκρασίες και αυξημένες πιέσεις πρέπει να εφαρμόζονται ώστε να επιτευχθούν μεγάλες τιμές πυκνότητας αποθήκευσης υδρογόνου με χρήση της συγκεκριμένης μεθόδου. Το πιο συνηθισμένο ψυκτικό που χρησιμοποιείται στην αποθήκευση μέσω προσφόρησης είναι το υγρό άζωτο με σημείο βρασμού στους -196°C [19]. Το υδρογόνο αποθηκεύεται συνήθως σε εύρος πιέσεων 10-100bar ανάλογα με το απορροφητικό υλικό.

Τα καταλληλότερα υλικά που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την απορρόφηση μέχρι τώρα, έχει αποδειχθεί ότι είναι αυτά που αποτελούνται από μόρια ενεργού άνθρακα καθώς και τα μεταλλικά-οργανικά πλαίσια, με τα οποία επιτυγχάνεται απορροφητικότητα 8-10% στους -196°C [20]. Το μεγαλύτερο πρόβλημα με την συγκεκριμένη μέθοδο αποθήκευσης, είναι η διαχείριση της θερμότητας, καθώς η χημική διεργασία της προσφόρησης είναι εξώθερμη, και συνεπώς η παραγόμενη θερμότητα πρέπει να απομακρύνεται για να διατηρείται η απαραίτητη θερμοκρασία αποθήκευσης υδρογόνου. Επιπροσθέτως, είναι κρίσιμο να περιορισθεί και η μεταφορά θερμότητας από το περιβάλλον, μέσω αγωγής, συναγωγής και ακτινοβολίας, αλλιώς θα χρειαστούν επιπλέον ποσά ενέργειας για την ψύξη του συστήματος. Γενικά, σε αντίθεση με την αποθήκευση του υδρογόνου σε αέρια και υγρή μορφή, η αποθήκευση μέσω προσφόρησης βρίσκεται ακόμα και σε ερευνητικό στάδιο.

2.2.3. Χημική Αποθήκευση

2.2.3.1. Αποθήκευση σε μεταλλικά υδρίδια

Το υδρογόνο συνδέεται χημικά με τα υδρίδια μετάλλων, και οι δεσμοί αυτοί είναι πολύ πιο ισχυροί από τους αντίστοιχους φυσικούς δεσμούς που εμφανίζονται στην αποθήκευση υδρογόνου μέσω προσρόφησης. Αυτό έχει σαν συνέπεια, να απαιτείται περισσότερη ενέργεια για την απελευθέρωση του χημικά συζευγμένου υδρογόνου, ωστόσο από την άλλη πλευρά, ο ισχυρότερος δεσμός συνεπάγεται υψηλότερη πυκνότητα αποθήκευσης σε δεδομένες συνθήκες, ακόμη και αν αυτές είναι του περιβάλλοντος. Η απελευθέρωση του υδρογόνου από τα μεταλλικά υδρίδια μπορεί να επιτευχθεί με δύο τρόπους: είτε μέσω θέρμανσης με την διεργασία της θερμόλυσης είτε μέσω της διεργασίας της υδρόλυσης αντιδρώντας με νερό. Αυτές οι προσεγγίσεις είναι ριζικά διαφορετικές, καθώς η θερμόλυση είναι ενδόθερμη, αντιστρέψιμη ορισμένες φορές αντίδραση, σε αντίθεση με την υδρόλυση που θεωρείται εξώθερμη, μη αναστρέψιμη αντίδραση. Επίσης, η θερμόλυση γίνεται στη στερεά φάση και υψηλές θερμοκρασίες, ενώ η υδρόλυση πραγματοποιείται σε διαλύματα και εν δυνάμει σε θερμοκρασία δωματίου. Αν και μια πληθώρα μεταλλικών υδριδίων έχουν αναπτυχθεί για αποθήκευση μέσω θερμόλυσης, σχετικά λίγες είναι οι αντίστοιχες επιλογές για την διεργασία της υδρόλυσης, με την πιο διάσημη επιλογή να αποτελεί το βοροϋδρίδιο του νατρίου (NaBH_4).

Τα βασικά μεταλλικά υδρίδια για αποθήκευση υδρογόνου μεγάλης κλίμακας είναι αυτά του μαγνησίου (MgH_2) και του αλουμινίου (AlH_3). Το πρώτο αποτελεί μια ενδιαφέρουσα επιλογή καθώς έχει υψηλή χωρητικότητα αποθήκευσης υδρογόνου: 7.6% και το κόστος του μαγνησίου είναι αρκετά χαμηλό. Από την άλλη, δυστυχώς οι δεσμοί μεταξύ υδρογόνου και μαγνησίου είναι εξαιρετικά ισχυροί, με αποτέλεσμα να απαιτούνται θερμοκρασίες άνω των 300°C για να πραγματοποιηθεί η απελευθέρωση του υδρογόνου. Η δεύτερη επιλογή, το υδρίδιο του αλουμινίου, διαφέρει σημαντικά αφού εδώ οι δεσμοί υδρογόνου και αλουμινίου είναι σχετικά αδύναμοι, και ως εκ τούτου η απελευθέρωση του υδρογόνου

μπορεί να πραγματοποιηθεί σε θερμοκρασίες κοντά στους 100°C με δυνατότητες αποθήκευσης σε ποσοστό 10%. Ωστόσο, η αντίδραση είναι πρακτικά μη αναστρέψιμη, με δεδομένο ότι το υδρίδιο αλουμίνιου δεν μπορεί να σχηματιστεί με την άμεση αντίδραση και με αέριο υδρογόνο, παρά μόνο σε εξαιρετικά υψηλές θερμοκρασίες. Μια λύση για την εφαρμογή του υδριδίου του αλουμινίου ως υλικό αποθήκευσης υδρογόνου είναι να βρεθεί ένας τρόπος αναγέννησης του από το αλουμίνιο. Η πιο διαδομένη διεργασία βασίζεται στην υδρογόνωση ενός μείγματος αλουμινίου και αμίνης παρουσία με χρήση ενός καταλύτη τιτανίου σε κάποιο διαλύτη (πχ διαιθυλαιθέρα) [20].

2.2.3.2. Αποθήκευση σε χημικά υδρίδια

Τα χημικά υδρίδια, όπως άλλωστε και τα μεταλλικά, δεσμεύουν με χημικό τρόπο το υδρογόνο, ωστόσο τα χημικά αποτελούνται από πολύ ελαφρύτερα στοιχεία των οποίων οι ιδιότητες διαφέρουν σημαντικά από τις αντίστοιχες ιδιότητες των μεταλλικών. Η μεγαλύτερη διαφορά εντοπίζεται στο γεγονός ότι τα χημικά υδρίδια σε κανονικές συνθήκες είναι κυρίως σε υγρή φάση, κάτι που διευκολύνει σε μεγάλο βαθμό τόσο την μεταφορά και αποθήκευσή τους, όσο και την μεταφορά θερμότητας και μάζα κατά τις διεργασίες δέσμευσης και απελευθέρωσης του υδρογόνου [18].

Αρκετά από τα χημικά υδρίδια που συνδέονται με την αποθήκευση υδρογόνου, όπως η μεθανόλη, η αμμωνία και το μεθανικό οξύ, είναι χημικές ουσίες που συνήθως συντίθενται μαζικά από φυσικό αέριο. Συνεπώς, μεγάλο ποσοστό των απαιτούμενων υποδομών για την παραγωγή αποθήκευση και διανομή βρίσκεται ήδη σε ισχύ, δίνοντας μεγάλο πλεονέκτημα στα χημικά υδρίδια. Επίσης, η παραγωγή αυτών των χημικών ουσιών χρησιμοποιώντας υδρογόνο που προερχόμενο από την ηλεκτρόλυση του νερού, και όχι από την αναμόρφωση του φυσικού αέριου, συμβάλει στην μείωση χρήσης ορυκτών καυσίμων και κατ' επέκταση στην μείωση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα.

Η μεθανόλη είναι η πιο απλή αλκοόλη που χρησιμοποιείται για την αποθήκευση του υδρογόνου με ικανότητα αποθήκευσης 12.5%. Ο πιο αποδεκτός τρόπος για να παραχθεί ανανεώσιμη μεθανόλη είναι με την υδρογόνωση του διοξειδίου του άνθρακα, μια διεργασία η οποία μπορεί να πραγματοποιηθεί μέσω αντίδρασης με το νερό στην αναμόρφωση με ατμό ή μέσω αντίδρασης με οξυγόνο στην μερική οξείδωση. Η πιο προσοδοφόρα διεργασία είναι η αναμόρφωση με ατμό καθώς με αυτόν τον τρόπο απελευθερώνονται 3 αντί για 2 moles υδρογόνου ανά mole μεθανόλης. Για να πραγματοποιηθεί η αναμόρφωση με ατμό απαιτούνται θερμοκρασίες 230-330°C.

Ένα άλλο ελκυστικό χημικό που έχει την δυνατότητα να χρησιμοποιηθεί ως μέσο αποθήκευσης του υδρογόνου είναι η αμμωνία (NH₃) καθώς έχει αρκετά μεγάλη ικανότητα αποθήκευσης με 17.7% σε υγρή φάση για πίεση 10bar, ενώ υπάρχει ήδη ανεπτυγμένη τεχνολογία για την σύνθεση, αποθήκευση και μεταφορά της. Μια βασική διαφορά σε σχέση με την μεθανόλη, είναι ότι η μετατροπή της παραγωγής αμμωνίας από την κλασσική που χρησιμοποιεί ως πρώτη ύλη το φυσικό αέριο στην ανανεώσιμη και πράσινη εκδοχή της ηλεκτρόλυσης με νερό, μπορεί να πραγματοποιηθεί χωρίς διαφοροποιήσεις καθώς τα αντιδρώντα, το άζωτο και το υδρογόνο, παραμένουν αμετάβλητα. Έτσι, η μετάβαση για τις ήδη υπάρχουσες μονάδες παραγωγής καθίσταται σχετικά εύκολη. Οι τυπικές συνθήκες για την αντίδραση είναι 300-500°C και 200-350bar [21]. Η τυπική διαδικασία για την αποσύνθεση της αμμωνίας είναι η θερμόλυση της η οποία απαιτεί θερμοκρασίες πάνω 650°C [22,23].

Μια τρίτη επιλογή αποτελεί το μεθανικό οξύ (HCO₂H), το οποίο έχει την μικρότερη ικανότητα αποθήκευσης με 4.4%. Το συγκριτικό του πλεονέκτημα αποτελεί το γεγονός, ότι η απελευθέρωση του υδρογόνου πραγματοποιείται σε ήπιες συνθήκες ακόμα και σε θερμοκρασία δωματίου, μειώνοντας με αυτόν τον τρόπο τις ενεργειακές απαιτήσεις [24]. Το βασικό εμπόδιο που πρέπει να υπερνικηθεί είναι η τάση του μεθανικού οξέος να αποσυντίθεται σε μονοξείδιο του άνθρακα (CO) και νερό, και όχι σε διοξείδιο του άνθρακα (CO₂) και υδρογόνο. Για να αντιμετωπιστεί αυτό το πρόβλημα γίνεται χρήση καταλύτη. Το υδρογόνο κατά την απελευθέρωση μπορεί να προσεγγίσει πιέσεις μέχρι και 1200bar [25].

2.3. Μεταφορά Υδρογόνου

Η ναυτιλία ολοένα και περισσότερο δέχεται πιέσεις, κατόπιν της συμφωνίας του Παρισιού, των νέων κανονισμών του IMO για τις εκπομπές του διοξειδίου του άνθρακα καθώς και των εκπομπών αερίων που συμβάλουν στο φαινόμενο του θερμοκηπίου. Πέραν των άλλων επιτηρούνται στενά οι απελευθερώσεις των οξειδίων του αζώτου (NOx) και θείου (SOx). Προκειμένου να επιτευχθούν οι στόχοι του 2050 για την ναυτιλία, οφείλουν να βρεθούν εναλλακτικά καύσιμα, φιλικά προς το περιβάλλον. Το υδροποιημένο φυσικό αέριο και το πετρέλαιο είναι ορυκτά καύσιμα, ενώ η αμμωνία προς το παρόν παράγεται και αυτή από το φυσικό αέρι, καθιστώντας την τοξική. Από την άλλη οι ηλεκτρική κινητήρες μπορούν να ανταποκριθούν μόνο σε μικρές θαλάσσιες μεταφορές. Σε αυτό το πλαίσιο οποιαδήποτε προσπάθεια μετάβασης σε κάποια εναλλακτική πηγή ενέργειας έχει επιρροή στην αξία ολόκληρης της εφοδιαστικής αλυσίδας. Το υδρογόνο κερδίζει ολοένα και περισσότερο έδαφος ώστε να καλύψει της ανωτέρω ανάγκες, αφού αποτελεί ένα ευέλικτο μέσο αποθήκευσης ενέργειας με μεγαλύτερη χωρητικότητα από τις αντίστοιχες ηλεκτρικές μπαταρίες, ενώ είναι και καταλληλότερο για μεταφορά σε σταθμούς αποθήκευσης.

2.3.1. Νομοθετικό πλαίσιο

Ο Διεθνής Ναυτιλιακός Οργανισμός (IMO) και τα Ηνωμένα Έθνη είναι τα αρμόδια όργανα στον ναυτιλιακό τομέα. Συγκεκριμένα, ο IMO είναι η παγκόσμια αρχή καθορισμού προτύπων για την ασφάλεια καθώς για τις περιβαλλοντικές επιδόσεις της διεθνούς ναυτιλίας. Ο κύριος ρόλος του είναι να δημιουργήσει ένα ρυθμιστικό πλαίσιο για την ναυτιλιακή βιομηχανία που θα είναι αποδοτικό και δίκαιο, με παγκόσμια εφαρμογή και υλοποίηση. Τα μέτρα του IMO καλύπτουν όλες τις πτυχές της διεθνούς ναυτιλίας όπως τον σχεδιασμό του πλοίου, την κατασκευή του, τον εξοπλισμό του, αλλά και θέματα επάνδρωσης και λειτουργίας, ώστε να διασφαλίζεται η ασφάλεια του πληρώματος, του περιβάλλοντος και να είναι όσο το δυνατόν πιο αποδοτικό ενεργειακά. Η Διεθνής Σύμβαση

για την Ασφάλεια της Ζωής στη Θάλασσα (SOLAS) ορίζει διεθνώς τις ελάχιστες απαιτήσεις για την κατασκευή, τον εξοπλισμό και τη λειτουργία των πλοίων.

Μέχρι στιγμής, δεν θεσπίζεται νόμοι και κανονισμοί για την χρήση του υδρογόνου ως ναυτικό καύσιμο, όμως ο SOLAS II-I ανοίγει τον δρόμο, ώστε να περιγραφεί λεπτομερώς μια διαδικασία σχεδιασμού βασισμένη σε αναλύσεις κινδύνου, με σκοπό να παρέχονται επίπεδα ασφαλείας ισάξια με του SOLAS, με έναν εναλλακτικό σχεδιασμό προσαρμοσμένο στο υδρογόνο. Ο κώδικας που αφορά εναλλακτικά καύσιμα όπως το υδρογόνο είναι IGF του 2016, και αναφέρεται γενικά στα καύσιμα με χαμηλό σημείο ανάφλεξης, και περιλαμβάνει τις βασικές προδιαγραφές για να υπάρξει συμβατότητα σε θέματα ασφαλείας. Προς το παρόν δεν υπάρχει κάποιο πλαίσιο για την αποθήκευση του υδρογόνου.

Ακόμα όμως και ο IGF παραμένει σχετικά ασαφής καθώς, λεπτομερής περιγραφή των προδιαγραφών παρέχεται μόνο για το υγροποιημένο φυσικό αέριο. Όλα τα υπόλοιπα καύσιμα αναφέρονται ως εναλλακτικά τα οποία επιτρέπονται εφόσον τα συστήματα που αφορούν το εκάστοτε καύσιμο, στην περίπτωση μας το υδρογόνο, είναι ασφαλή και αξιόπιστα ώστε να τροφοδοτήσουν ενεργειακά το πλοίο. Η έγκριση των πλοίων με καύσιμο το πετρέλαιο είναι γνωστή με κανονισμούς και κανόνες που βασίζονται σε εμπειρία δεκαετιών. Για τις νέες τεχνολογίες ωστόσο δεν υπάρχει η ίδια δυνατότητα, επομένως η έγκριση βασίζεται στην εκπόνηση μελετών εκτίμησης κινδύνου ώστε να επιτευχθεί ένα ισοδύναμο επίπεδο ασφαλείας με τα συμβατικά πλοία. Η διαδικασία έγκρισης περιλαμβάνει τα εξής στάδια: α) τον προκαταρκτικό σχεδιασμό β) την έγκριση του προκαταρκτικού σχεδιασμού γ) τον τελικό σχεδιασμό δ) τον έλεγχο και την ανάλυση του ε) την τελική έγκριση [26].

2.3.2. Συστήματα υδρογόνου και ασφάλεια

Το υδρογόνο σε αέρια μορφή είναι ένα καύσιμο με ιδιότητες που απαιτούν ειδική διαχείριση υπό το πρίσμα της ασφάλειας. Συγκεκριμένα, η μικρή πυκνότητά, η χαμηλή ενέργεια ανάφλεξης, το μεγάλο εύρος ανάφλεξης και η επακόλουθη εκρηξιμότητά του σχετίζονται άμεσα με κινδύνους για την ασφάλεια των μεταφορών. Οι παραπάνω ιδιότητες διαφέρουν από τις αντίστοιχες του φυσικού αερίου, με αποτέλεσμα να χρειάζεται σημαντική αναθεώρηση των κανονισμών ασφάλειας στην μεταφορά του υδρογόνου.

Το αέριο υδρογόνο είναι πολύ ελαφρύτερο από το μεθάνιο. Η πλευστότητα του αερίου υδρογόνου γενικά μπορεί να θεωρηθεί και ως πλεονέκτημα αλλά και ως πρόκληση στον σχεδιασμό, καθώς από την μία σε μια διαρροή του σε εξωτερικό χώρο θα διαφύγει στην ατμόσφαιρα χωρίς να εγκυμονεί ο κίνδυνος για ανάφλεξη εντός του πλοίου. Από την άλλη όμως, εάν η ταχύτητα απελευθέρωσης του αερίου υδρογόνου είναι μεγάλη και ο ρυθμός απελευθέρωσης του όγκου ξεπεράσει ένα συγκεκριμένο όριο, τότε ενδέχεται η ταχύτητα του πίδακα ροής του υδρογόνου να είναι μεγαλύτερη από την αντίστοιχη του περιβάλλοντος αέρα, με αποτέλεσμα το αέριο υδρογόνο να έχει ως πηγή κίνησης την ορμή και όχι από την πλευστότητα. Το παραπάνω φαινόμενο σε κλειστούς χώρους έχει την τάση να συμπεριφέρεται παρόμοια με το φυσικό αέριο, δηλαδή για ορισμένο χρονικό διάστημα να εγκλωβίζεται στον χώρο πριν διαφύγει.

Μια ακόμη επικίνδυνη ιδιότητα του αερίου υδρογόνου σχετίζεται με το μέγεθος του νέφους καύσης που δημιουργείται κατά την διαρροή του. Ειδικότερα, ένα στοιχειομετρικό μείγμα υδρογόνου με αέρα περιέχει 29.5% του όγκου του, υδρογόνο σε αντίθεση με το φυσικό αέριο που έχει συγκέντρωση 10%. Για να επιτευχθεί αυτή η συγκέντρωση υδρογόνου απαιτείται σχεδόν ο τριπλάσιος ρυθμός ροής μάζας, για μια δεδομένη διαρροή, κάτι που συντελείται με φυσικό τρόπο εξαιτίας του μεγέθους των μορίων αερίου υδρογόνου, τα οποία είναι 3 φορές μικρότερα από τα αντίστοιχα του μεθανίου. Όλα τα παραπάνω, μαζί με το μεγάλο εύρος ανάφλεξης του αερίου υδρογόνου, καθιστούν το μείγμα ιδιαίτερα επικίνδυνο. Η θερμοκρασίες αυτανάφλεξης αερίου υδρογόνου και

μεθανίου είναι παρόμοιες για μικρές συγκεντρώσεις των στοιχείων σε μείγματα, ωστόσο το ίδιο δεν ισχύει για μεγαλύτερες συγκεντρώσεις όπου η θερμοκρασία αυτανάφλεξης του υδρογόνου μπορεί να είναι μια τάξη μεγέθους μικρότερη από αυτή του μεθανίου.

Κατά την καύση του αέριου υδρογόνου παράγεται μόνο υδρατμοί, ενώ η φλόγα είναι σχεδόν αόρατη. Γενικά η ακτινοβολία θερμότητας κατά την καύση δεν διαφέρει σημαντικά από αυτή των ορυκτών καυσίμων ειδικά για μεγάλα μεγέθη φλόγας. Οι συνέπειες της πυρκαγιάς είναι επίσης διαφορετικές, αλλά η δριμύτητα της είναι παρόμοια με του φυσικού αερίου. Επιπλέον, το αέριο υδρογόνο αποθηκεύεται σε υψηλότερες πιέσεις, καθιστώντας πιθανότερα συμβάντα διαρροής του.

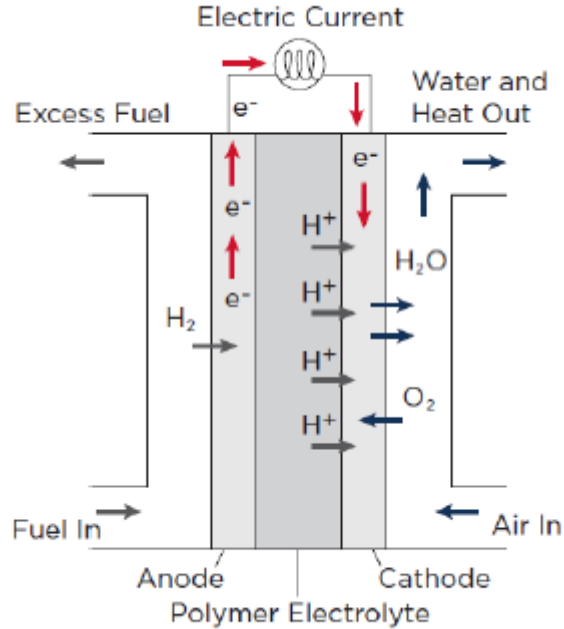
Property	Hydrogen	Methane
Gas density at NTP	0.0827 kg/m ³	0.659 kg/m ³
Flammability range (25 °C, 101.3 kPa)	4-75 vol%	5-17 vol%
Autoignition temperature	585 °C	537 °C
Minimum ignition energy	0.017 mJ	0.27 mJ
Boiling point	-253 °C	-161 °C
Amount of energy, heat of combustion (lower heating value)	120 kJ/g	50 kJ/g
Maximum burning velocity in NTP air (cm/s)	265-325	37-45

Σχήμα 2.7. Σύγκριση ιδιοτήτων αέριου υδρογόνου-μεθανίου σε θέματα ασφάλειας[26].

Εκτός από την αποθήκευση του αερίου υδρογόνου και η αποθήκευση του υγροποιημένου εμπεριέχει κινδύνους που οφείλουν να ληφθούν υπόψη. Αυτοί συνδέονται με τις ιδιότητες του υδρογόνου όταν σε μια διαρροή περάσει από την υγρή στην αέρια φάση. Αέρια όπως το οξυγόνο ή το άζωτο έχουν την τάση να υγροποιούνται ή ακόμα και να στερεοποιούνται όταν έρθουν σε επαφή με το υγροποιημένο υδρογόνο (-253°C τουλάχιστον), με αποτέλεσμα να επικρατούν ακαριαία υπερβολικά χαμηλές θερμοκρασίες στον περιβάλλοντα χώρο, καθώς σε πρόσφατα πειράματα (Jordan, 2020), η θερμοκρασία έπεσε στους -188°C . Επιπροσθέτως, ένας ταχύς ρυθμός αεριοποίησης εντός της δεξαμενής δύναται να οδηγήσει σε έναν εξίσου ταχύ ρυθμό αύξησης της πίεσης, εφόσον δεν έχει σχεδιαστεί σωστά ένα σύστημα εκτόνωσης της πίεσης. Από την στιγμή που το υγροποιημένο υδρογόνο εξατμίζεται, χαρακτηρίζεται από τα ίδια ζητήματα ασφαλείας με όσα αναφέρθηκαν παραπάνω για το αέριο υδρογόνο.

2.3.3. Κυψέλες υδρογόνου (Hydrogen Fuel Cells)

Ως κυψέλη υδρογόνου ορίζεται μια διάταξη η οποία μετατρέπει την χημική ενέργεια ενός καυσίμου σε ηλεκτρική μέσω ηλεκτροχημικής οξειδωσης. Μια κυψέλη υδρογόνου αποτελείται από ένα αρνητικά φορτισμένο ηλεκτρόδιο, το ανόδιο, και από ένα θετικά φορτισμένο το καθόδιο, τον ηλεκτρολύτη, ένα σύστημα καυσίμου και οξυγόνου. Από την μια πλευρά της διάταξης, αυτή του ανόδου τροφοδοτείται το καύσιμο, στην συγκεκριμένη περίπτωση το υδρογόνο, ενώ από την πλευρά του καθόδου περνάει αέρας. Ο καταλύτης στο ανόδιο διαχωρίζει τα μόρια υδρογόνου σε πρωτόνια και ηλεκτρόνια, τα ηλεκτρόνια οδηγούνται μέσω ηλεκτρικού κυκλώματος εξωτερικά ώστε να καλύψουν τις ανάγκες ως ηλεκτρική ενέργεια, ενώ τα πρωτόνια περνούν μέσα από τον ηλεκτρολύτη για να αντιδράσουν με το οξυγόνο του αέρα και να παράξουν νερό και θερμότητα [28,29].



Σχήμα 2.8. Τυπική διάταξη fuel cell υδρογόνου [29].

Οι βασικοί τύποι κυψελών υδρογόνου είναι οι παρακάτω:

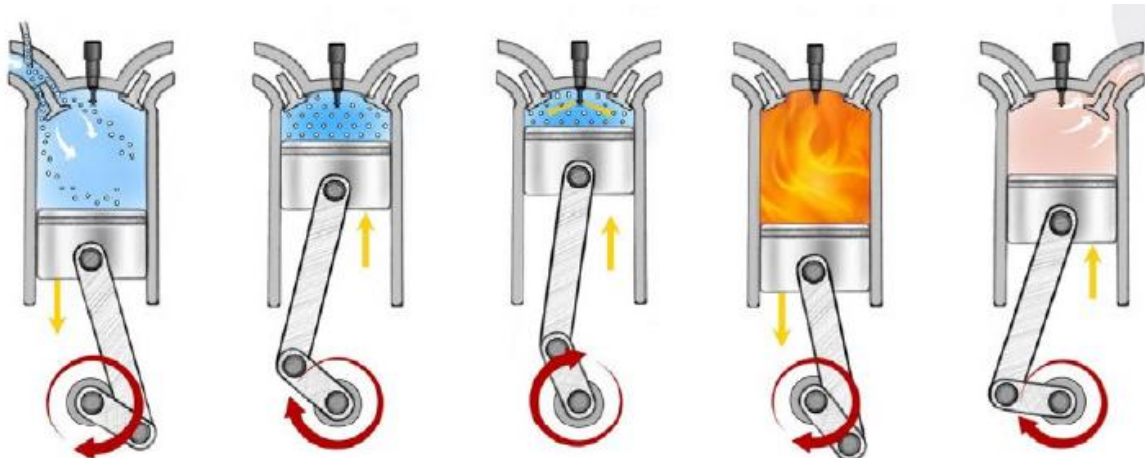
- I. Proton Exchange Membrane (PEM) Fuel Cells: η συγκεκριμένη διάταξη χρησιμοποιεί κάποιο στερεό πολυμερές υλικό ως ηλεκτρολύτη και καταλύτη αποτελούμενο από λευκόχρυσο. Η λειτουργία του απαιτεί μόνο υδρογόνο, οξυγόνο από τον ατμοσφαιρικό αέρα και νερό. Οι PEM κυψέλες υδρογόνου λειτουργούν σε σχετικά χαμηλές θερμοκρασίες, κάτω από 120°C. Προκλήσεις στον σχεδιασμό αυτής της διάταξης αποτελούν ο τρόπος απομάκρυνσης της περίσσειας νερού και της υγρασίας του αέρα, αλλά και η ευαισθησία του καταλύτη στο μονοξείδιο του άνθρακα και στο θείο, γεγονός που καθιστά απαραίτητη την τροφοδοσία υδρογόνου υψηλής καθαρότητας, εάν αυτό παράγεται από ορυκτά και όχι ανανεώσιμες πηγές. Κατάλληλο για ελαφρά οχήματα και συστήματα μικρής ισχύος[28,29].

- II. Alkaline Fuel Cells (AFC): οι αλκαλικές κυψέλες υδρογόνου χρησιμοποιούν ένα διάλυμα υδροξειδίου του καλίου σε νερό ως ηλεκτρολύτη, ενώ ως καταλύτης μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένα ευρύ φάσμα από μέταλλα χωρίς υψηλή αξία. Οι θερμοκρασία λειτουργία κυμαίνεται ανάμεσα στους 100°C και στους 250°C. Και σε αυτή την εφαρμογή απαιτείται υδρογόνο υψηλής καθαρότητας. Χρησιμοποιείται κυρίως σε διαστημικές εφαρμογές[28,29].
- III. Phosphoric Acid Fuel Cells (PAFC): εδώ χρησιμοποιείται ως ηλεκτρολύτης υγρό φωσφορικό οξύ και ο καταλύτης κατασκευάζεται από λευκόχρυσο. Οι μεγαλύτερες θερμοκρασίες λειτουργίας 150°C-220°C καθιστούν τον καταλύτη λιγότερο ευαίσθητο στην παρουσία μονοξειδίου του άνθρακα και άλλων επιμολύνσεων. Κατάλληλο για συστήματα μεγάλης ισχύος μέχρι 200KW[28,29].
- IV. Molten Carbonate Fuel Cells (MCFC): είναι κυψέλες που έχουν πολύ υψηλές θερμοκρασίες λειτουργίας μεταξύ 600°C και 700°C. Ο ηλεκτρολύτης αποτελείται από ένα μείγμα τηγμένου ανθρακικού άλατος που περιέχεται σε μια πορώδη, κεραμική μήτρα οξειδίου του αλουμινίου. Κατάλληλο για συστήματα μεσαίας και μεγάλης ισχύος μέχρι και απαιτήσεις MW[28,29].
- V. Solid Oxide Fuel Cells (SOFC): χρησιμοποιούν ένα σκληρό, μη πορώδες κεραμικό για ηλεκτρολύτη και λειτουργούν ανάμεσα στους 650°C και 1000°C. Οι μεγάλες θερμοκρασίες τα απαλλάσσουν από την ανάγκη χρήσης καταλυτών από υψηλής αξίας μέταλλα. Κατά την λειτουργία του συντελείται η αναμόρφωση των καυσίμων, με αποτέλεσμα να είναι συμβατά με πληθώρα καυσίμων. Κατάλληλο για όλα τα μεγέθη συστημάτων από 2KW μέχρι και MW[28,29].

2.3.4. Μηχανές εσωτερικής καύσης υδρογόνου

Το υδρογόνο έχει χρησιμοποιηθεί μέχρι τώρα σε μηχανές εσωτερικής καύσης ως συμπληρωματικό καύσιμο, για την δημιουργία μειγμάτων με συμβατικά ορυκτά καύσιμα. Πολλές από τις ιδιότητες του, καθιστούν το υδρογόνο μια ελκυστική επιλογή για καύσιμο στις συγκεκριμένες μηχανές. Η τιμή ενέργειας ανάφλεξης είναι ιδιαίτερα χαμηλή, ειδικότερα μια τάξη μεγέθους μικρότερη από τα ορυκτά. Επίσης, η υψηλή θερμοκρασία αυτανάφλεξης διαδραματίζει κυρίαρχο ρόλο στον λόγο συμπίεσης της μηχανής και επηρεάζει την μέγιστη παραγόμενη ισχύ. Έχει παρατηρηθεί ότι ακόμα και μικρές ποσότητες υδρογόνου σε μείγμα καυσίμου βελτιώνουν την απόδοση της μηχανής και μειώνουν τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα. Πέραν των άλλων, το υδρογόνο μπορεί να χρησιμοποιηθεί και ως αποκλειστικό καύσιμο με την απαίτηση μεγαλύτερου μεγέθους κυλίνδρου και επακόλουθα της μηχανής. Ωστόσο, ο επιπλέον χώρος που χρειάζεται μπορεί να εξισωθεί με τον χώρο που απελευθερώνεται από την απουσία συστημάτων διαχείρισης των μονοξειδίων του αζώτου.

Μια ακόμη επιλογή είναι το μείγμα καυσίμων, αυτή τη φορά με κυρίαρχο το υδρογόνο συνοδευόμενο από μικρές ποσότητες ντίζελ. Σε αυτές τις εφαρμογές κατά την έγχυση υδρογόνου στους κυλίνδρους προστίθεται και μια μικρή ποσότητα ντίζελ ώστε να βοηθήσει την έναυση της καύσης. Η περιεκτικότητα σε υδρογόνο μπορεί να φτάσει μέχρι και 85%. Ανάλογα με τις απαιτήσεις ισχύος αυξάνεται η περιεκτικότητα σε υδρογόνο αλλά και το μέγεθος της μηχανής. Με το μεγάλο εύρος ανάφλεξης που χαρακτηρίζει το υδρογόνο, η μηχανές μπορούν να λειτουργήσουν σε λόγους συμπίεσης από 34:1 έως και 180:1. Τέλος, παρόλο που το υδρογόνο συμβάλει στην μείωση των εκπομπών μονοξειδίων του αζώτου, υπάρχει πάντα η πιθανότητα να απαιτηθεί η χρήση τεχνολογιών μείωσης τους, κάτι που συνδέεται άμεσα με την αναλογία καυσίμου και αέρα στον θάλαμο καύσης [27,38].



Σχήμα 2.9. Διαδικασία εσωτερικής καύσης υδρογόνου-πετρελαίου (στο 3^ο στάδιο διακρίνεται η μικρή ποσότητα πετρελαίου για την υποβοήθηση της έναυσης) [38].

3. Πολυκριτηριακές Μέθοδοι Λήψης Αποφάσεων

Οι πολυκριτηριακές μέθοδοι λήψης αποφάσεων (MCDA) είναι ένα εργαλείο το οποίο μπορεί να εφαρμοστεί στην λήψη σύνθετων αποφάσεων. Εφαρμόζονται κυρίως σε προβλήματα τα οποία απαιτούν την επιλογή μίας ανάμεσα σε πλήθος εναλλακτικών. Τα βασικά βήματα των συγκεκριμένων μεθόδων είναι [31]:

- η διαίρεση της απόφασης σε επιμέρους μικρότερα τμήματα
- η ανάλυση κάθε τμήματος
- η ενσωμάτωση του στο τελικό αποτέλεσμα

Παρακάτω θα αναλυθούν οι μέθοδοι υπεροχής (Outranking Methods), και συγκεκριμένα οι 2 βασικές οικογένειες τους, η ELECTRE και η PROMETHEE.

3.1. Μέθοδοι ELECTRE

Οι μέθοδοι ELECTRE είναι κατάλληλες για περιπτώσεις λήψης αποφάσεων με τα εξής χαρακτηριστικά [31]:

1. Το μοντέλο λήψης απόφασης περιέχει τουλάχιστον 3 κριτήρια.

Και τουλάχιστον ένα από τα ακόλουθα

2. Οι διαθέσιμες επιλογές αξιολογούνται με έναν περιοδικό τρόπο.
3. Υπάρχει ισχυρή ανομοιογένεια ανάμεσα στα κριτήρια
4. Όταν η αντιστάθμιση της απώλειας από ένα κριτήριο με το κέρδος από ένα άλλο δεν είναι αποδεκτή για την λήψη απόφασης.

5. Για τουλάχιστον ένα κριτήριο ισχύει ο ακόλουθος ισχυρισμός: μικρές διαφορές στην αξιολόγηση δεν είναι σημαντικές στην τελική απόφαση, ωστόσο η συσσώρευση πολλών μικρών διαφορών μπορεί να καταστεί σημαντική [31].

Οι μέθοδοι ELECTRE βασίζονται στην ανά ζεύγη σύγκριση των επιλογών σε κάθε μεμονωμένο κριτήριο με βάση τις επιδόσεις τους και τις ενδοκριτηριακές προτιμήσεις του λήπτη απόφασης. Η διαδικασία αποτελείται από 2 επιμέρους διεργασίες. Την κατασκευή μίας η περισσότερων σχέσεων υπεροχής και την διαδικασία εκμετάλλευσης. Η κατασκευή των σχέσεων υπεροχής στοχεύει στην σύγκριση των διάφορων διαθέσιμων επιλογών με έναν κατανοητό τρόπο ανά ζεύγη, και με την σειρά της η διαδικασία εκμετάλλευσης κατατάσσει τα αποτελέσματα. Μια εναλλακτική α θεωρούμε πως υπερισχύει μιας άλλης εναλλακτικής β εφόσον προκύπτουν επαρκείς αποδείξεις, που να τεκμηριώνουν πως η α είναι τουλάχιστον όσο αποδοτική λύση όσο η β ενώ δεν υπάρχουν σημαντικές αποδείξεις που να υποστηρίζουν το αντίθετο. Η σημαντικότητα του κάθε κριτηρίου ορίζεται με της βαρύτητας του.

3.1.1. ELECTRE I

Η συγκεκριμένη μέθοδος πρακτικά δεν έχει κάποιο ενδιαφέρον, εξαιτίας της φύσης και της πολυπλοκότητας της διαδικασίας λήψης αποφάσεων στον πραγματικό κόσμο, οι οποίες χαρακτηρίζονται από ένα ευρύ φάσμα ποιοτικών και ποσοτικών συνεπειών, οδηγώντας πολλές φορές σε αντικρουόμενα κριτήρια. Η μέθοδος είναι πολύ απλή, και μπορεί να εφαρμοστεί μόνο όταν όλα τα κριτήρια είναι αριθμημένα στην ίδια κλίμακα και σε κοντινά εύρη.

Με δεδομένο ένα σύνολο εναλλακτικών A , δεν επιδιώκεται πάντα να εντοπιστεί η καλύτερη εναλλακτική αλλά ένα υποσύνολο εναλλακτικών K όπου $K \subset A$ οι οποίες θα υπερισχύουν των υπολοίπων. Το πρόβλημα καθορίζεται από ένα σύνολο εναλλακτικών και κριτηρίων με γνώμονα τα οποία γίνεται η αξιολόγηση των επιλογών. Αρχικά πραγματοποιείται ο έλεγχος συμβατότητας και ασυμβατότητας για κάθε πιθανό ζεύγος εναλλακτικών. Από το προηγούμενο βήμα προκύπτει ο πίνακας υπεροχής και το αντίστοιχο γράφημα υπεροχής από το οποίο προκύπτει το υποσύνολο των πιθανών βέλτιστων επιλογών[30].

Τα βήματα της μεθόδου είναι τα εξής:

1. Σχεδίαση του πίνακα απόφασης A , ο οποίος αποτελείται από εναλλακτικές, κριτήρια αξιολόγησης, βάρη, βέτο [30].

$$A = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{1n} \\ x_{m1} & x_{mn} \end{bmatrix} \quad (5)$$

Όπου A_1, A_2, \dots, A_m , είναι οι εναλλακτικές, C_1, C_2, \dots, C_n , είναι τα κριτήρια και x_{ij} είναι η τιμή της εναλλακτικής A_i αναφορικά με το κριτήριο C_j .

Επιπλέον δίνονται τα βάρη w_1, w_2, \dots, w_n , για κάθε ένα από τα κριτήρια και οι τιμές veto v_1, v_2, \dots, v_n , [30].

2. Δημιουργία του πίνακα συμφωνίας πραγματοποιώντας έλεγχο συμφωνίας για κάθε ζευγάρι εναλλακτικών του πίνακα A , βάσει του τύπου [30]:

$$C(A_i, A_j) = \sum_{\forall k \in \{k | x_{ik} - x_{jk} \geq 0\}} w_k \quad (6)$$

3. Εκτέλεση του ελέγχου ασυμφωνίας για κάθε ζευγάρι εναλλακτικών ως προς τα κριτήρια του πίνακα A, βάσει του τύπου [30]:

$$D_k(A_i, A_j) = \begin{cases} 0 & \text{εάν } x_{jk} - x_{ik} < v_k \\ 1 & \text{εάν } x_{jk} - x_{ik} \geq v_k \end{cases} \quad (7)$$

Όπου $k=1,2,\dots,n$

4. Δημιουργία του πίνακα υπεροχής αξιοποιώντας τα αποτελέσματα των ελέγχων συμφωνίας και ασυμφωνίας, με χρήση των τύπων [30]:

$$A_i S A_j \Leftrightarrow C(A_i, A_j) \geq s \wedge D_k(A_i, A_j) = 0 \quad (8)$$

$$O_{ij} = 1 \Leftrightarrow A_i S A_j \quad (9)$$

όπου s είναι το κατώφλι συμφωνίας που έχει οριστεί

5. Σχεδίαση του διαγράμματος υπεροχής αξιοποιώντας τον πίνακα υπεροχής που κατασκευάστηκε προηγουμένως. Το διάγραμμα υπεροχής είναι μια γραφική αναπαράσταση των εναλλακτικών που υπερισχύουν όλων των υπολοίπων. Για την κατασκευή του ακολουθούνται τα παρακάτω βήματα [30]:

- Κάθε εναλλακτική επιλογή αποτελεί έναν κόμβο στο γράφημα

Κάθε σχέση υπεροχής $A_i S A_j$ αποτελεί κατευθυνόμενη ακμή από τον κόμβο A_i προς τον κόμβο A_j

3.2. Μέθοδοι PROMETHEE

Οι μέθοδοι πολυκριτήριας ανάλυσης Preference Ranking Optimization METHod for Enrichment Evaluation (PROMETHEE) αναπτύχθηκαν από τους Brans, Mareschal και Vincke (1986), και συγκαταλέγονται στην ευρύτερη οικογένεια των μεθόδων υπεροχής με την διαφορά ότι δεν εφαρμόζεται βέτο, γεγονός που τις διαφοροποιεί από μη αντισταθμιστικές μεθόδους όπως οι ELECTRE. Οι μέθοδοι υπεροχής, οι οποίες αναπτύχθηκαν από τον Roy περιέχουν ένα σύνολο μεθοδολογιών που καθιστά εφικτή την ανάπτυξη συγκρίσεων ανά ζεύγη μεταξύ των εναλλακτικών. Οι PROMETHEE I και II αποτελούν μεθόδους διμερούς σύγκρισης. Η σχέση υπεροχής συμβολίζεται με το γράμμα S και μεταφράζεται στο ότι μία επιλογή a είναι τουλάχιστον εξίσου καλή με τη b με την σχέση [30]:

$$aSb, \forall (a, b) \in A(10)$$

όπου A το σύνολο δράσεων.

Η σχέση υπεροχής εμπεριέχει τις εξής σχέσεις: της ισχυρής προτίμησης (P), τη σχέση της ασθενούς προτίμησης (Q) και την σχέση αδιαφορίας (I), και εκφράζεται με τον εξής τύπο:

$$S = P \cup Q \cup I(11)$$

Για τις σχέσεις μπορεί να ισχύει κάτι από τα παρακάτω:

- Η a προτιμάται από την b
- Η a είναι αδιάφορη της b
- Η a δεν συγκρίνεται με την b

Τρεις βασικές αξίες που ξεχωρίζουν τις μεθόδους PROMETHEE σε σχέση με άλλες της ίδιας κατηγορίας [30]:

- α) επέκταση στην έννοια των κριτηρίων, (προτείνονται νέες συναρτήσεις κριτηρίων)
- β) εκτιμώμενη σχέση υπεροχής
- γ) εκμετάλλευση της σχέσης υπεροχής

Στις μεθόδους PROMETHEE παρέχεται η δυνατότητα χρήσης ψευδοκριτηρίων μέσω της αξιοποίησης των εξής κατωφλιών: αδιαφορίας (q), προτίμησης (p) και μέσω του ενδιάμεσου κατωφλιού μεταξύ q και p (s). [30].

Οι μέθοδοι περιέχουν τα ακόλουθα βήματα [30]:

1. Υπολογισμός βαρών κριτηρίων: Για τον υπολογισμό των βαρών ισχύουν τα εξής:
 - α) λήψη των τιμών από τον αποφασίζοντα β) ορισμός των βαρών ως ισοδύναμα μεταξύ τους γ)επιλογή μιας μεθόδου για την εκτίμηση και αντιστοίχιση της βαρύτητας στα κριτήρια. Το άθροισμα των βαρών ισούται πάντα με 1.
2. Υπολογισμός συνάρτησης προτίμησης: χρήση της έννοιας του γενικευμένου κριτηρίου προκειμένου να γίνει η μοντελοποίηση της αξίας που αποδίδει ο αποφασίζοντας στην διαφορά $g_j(a) - g_j(b)$, στο κριτήριο j για το ζεύγος δράσεων (a,b). Αυτό γίνεται με χρήση της συνάρτησης προτίμησης:

$$P_j(a, b) = F[d_j(a, b)] \forall (a, b) \in A$$

3. Υπολογισμός του πολυκριτηρίου δείκτη προτίμησης: Ο δείκτης εκφράζει τον βαθμό ολικής προτίμησης της a έναντι της b. Ισχύει η παρακάτω σχέση:

$$(a, b) = \sum_{j=1}^n w_j P_j(a, b) \quad (12)$$

Όπου: w_j : βάρος j -οστού κριτηρίου και $P_j(a,b)$: Αποτέλεσμα συνάρτησης προτίμησης για το j κριτήριο ανάμεσα στις δράσεις a, b

4. Υπολογισμός των ροών υπεροχής: οι εναλλακτικές που υπάρχουν είναι οι ακόλουθες:
 - Θετική ροή, που δείχνει την υπεροχή της εναλλακτικής a σε σχέση με όλες τις υπόλοιπες.
 - Αρνητική ροή, που δείχνει την υπεροχή όλων των υπόλοιπων σε σχέση με την a
 - Καθαρή ροή, που είναι ένα ολικό μέτρο αξιολόγησης της εναλλακτικής a σε σχέση με όλες τις υπόλοιπες.

5. Κατάταξη ως προς τις θετικές η αρνητικές ροές.

3.3. Μέθοδοι προσδιορισμού βαρών κριτηρίων

3.3.1. Analytic Hierarchy Process (AHP)

Η AHP δημιουργήθηκε το 1980 από τον Saaty και στηρίζεται στην σχετική υπεροχή κάθε κριτηρίου συγκριτικά με κάθε ένα από τα υπόλοιπα, και δημιουργείται από μια σύγκριση κατά ζεύγη αξιοποιώντας μια αριθμητική κλίμακα. Το πρώτο βήμα στη διαδικασία προσδιορισμού των βαρών μέσω της AHP είναι η κατασκευή ενός πίνακα για την εκτέλεση συγκρίσεων ανά ζεύγη, στον οποίο καταγράφεται η προτίμηση του αποφασίζοντα στα υπό εξέταση κριτήρια. Η είσοδος του πίνακα βασίζεται σε μια πρότυπη κλίμακα που αξιοποιείται για τις συγκρίσεις (κλίμακα του Saaty). Η κλίμακα αυτή παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.1 [30]:

Ένταση Σχετικής Σημασίας	Ορισμός
1	Ίσης σπουδαιότητας
2	
3	Μέτρια σπουδαιότητα
4	
5	Σημαντική σπουδαιότητα
6	
7	Πολύ ισχυρή ή αποδεδειγμένη σπουδαιότητα
8	
9	Μέγιστη σπουδαιότητα
Οι ενδιάμεσες τιμές 2, 4, 6, 8 χρησιμοποιούνται όταν απαιτείται συμβιβασμός	

Σχήμα 3.1. Κλίμακα AHP για αξιολόγηση βαρών.

Στη συνέχεια ο αποφασίζων αποδίδει την σχετική σημαντικότητα μεταξύ των κριτηρίων και τα εισάγει στον πίνακα συγκρίσεων ο οποίος έχει την εξής μορφή:

C_{ij}	g_1	g_2	...	g_i	...	g_n
g_1	1					
g_2		1				
...			(1)			
g_i				$P_c[g_i, g_i]$		
...					(1)	
g_n						1

Σχήμα 3.2. Πίνακας συγκρίσεων AHP [30].

Τα στοιχεία της διαγωνίου θα είναι ίσα με 1.

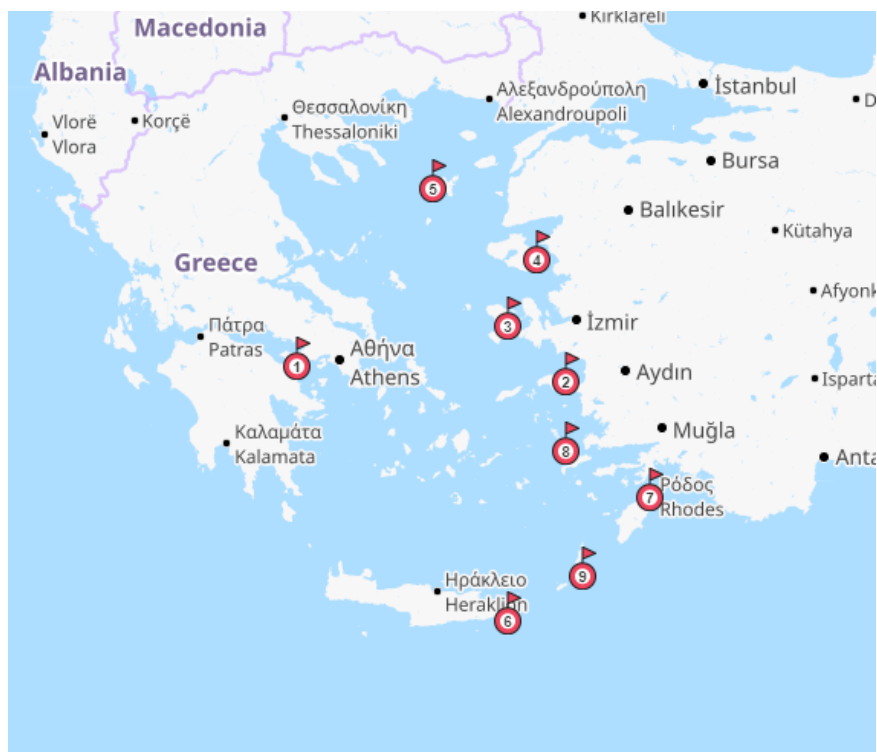
Στην συνέχεια υπολογίζονται:

- Το άθροισμα ανά στήλη και διαιρείται το κάθε στοιχείο με το αντίστοιχο άθροισμα για να δημιουργηθεί ο κανονικοποιημένος πίνακας
- Το άθροισμα ανά γραμμή
- Το τελικό βάρος του κριτηρίου

4. Βελτιστοποίηση εφοδιαστικής αλυσίδας

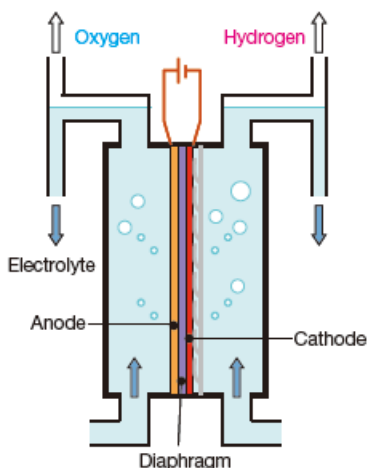
4.1. Περιγραφή εφοδιαστικής αλυσίδας

Η εφοδιαστική αλυσίδα που μελετάται στην παρούσα εργασία αφορά τον εφοδιασμό των νήσων του Αιγαίου με υδρογόνο και ειδικότερα σε υγροποιημένη μορφή, το οποίο θα χρησιμοποιηθεί σε εργοστάσια παραγωγής ισχύος για την κάλυψη μέρους των ενεργειακών αναγκών τους, οι οποίες δεν δύναται να ικανοποιηθούν πλήρως από τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Τα νησιά που περιέχονται στην εφοδιαστική αλυσίδα είναι τα εξής: Σάμος, Χίος, Λέσβος, Λήμνος, Κρήτη, Ρόδος, Κάλυμνος, Κάρπαθος.



Σχήμα 4.1. Σημεία εφοδιαστικής αλυσίδας στον χάρτη.

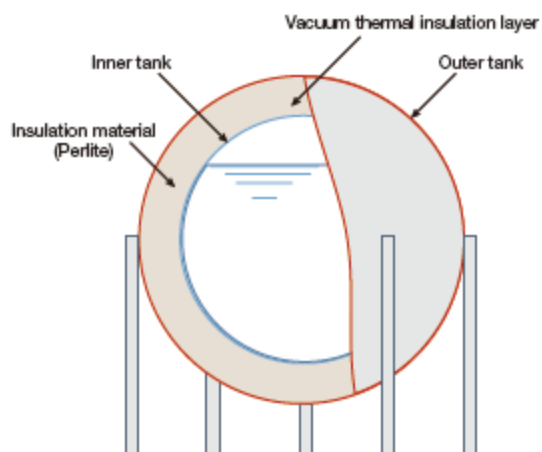
Αρχικά το εργοστάσιο παραγωγής υδρογόνου θεωρείται ότι βρίσκεται στους Αγίους Θεοδώρους, Κορινθίας. Η συγκεκριμένη τοποθεσία επιλέχθηκε καθώς ήδη υπάρχει μονάδα παραγωγής υδρογόνου, το οποίο προέρχεται από φυσικό αέριο και αξιοποιείται για διεργασίες στην παραγωγική διαδικασία. Στην δική μας περίπτωση το παραγόμενο υδρογόνο θα είναι πράσινο, απαλλαγμένο από εκπομπές του διοξειδίου του άνθρακα, δηλαδή παράγεται μέσω ηλεκτρόλυσης με νερό, ηλεκτρικής ενέργειας που προέρχεται από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Η παραγωγή γίνεται μέσω κυψελών με αλκαλικούς καταλύτες, στις οποίες με την παρουσία του ηλεκτρικού ρεύματος γίνεται ο διαχωρισμός των μορίων του νερού σε αέριο υδρογόνο στο καθόδιο και οξυγόνο στο ανόδιο.



Σχήμα 4.2. Διάταξη παραγωγής υδρογόνου σε κυψέλη με αλκαλικό καταλύτη [33].

Στην συνέχεια ακολουθεί η αποθήκευση του σε δεξαμενές υγροποιημένου υδρογόνου, σε θερμοκρασία -253°C και πίεση 1bar. Επιλέχθηκε ο συγκεκριμένος τύπος αποθήκευσης καθώς αυξάνει σημαντικά την πυκνότητα του υδρογόνου, με αποτέλεσμα να μπορούν να μεταφερθούν μεγαλύτερες ποσότητες. Κατά την αποθήκευση σε υγροποιημένη μορφή, οι ποσότητες που αεριοποιούνται θα εκτονώνονται από την δεξαμενή και θα προωθούνται για την εκ νέου υγροποίηση τους στα τελικά στάδια της παραγωγικής διαδικασίας, δηλαδή στο στάδιο της υγροποίησης του παραγόμενου υδρογόνου από την αέρια μορφή. Οι δεξαμενές

όπως φαίνεται και στο Σχήμα 4.3 ενδιάμεσα των τοιχωμάτων περιέχουν κενό για να περιοριστεί στο μέγιστο η μετάδοση θερμότητας μέσω αγωγής και συναγωγής προς το περιβάλλον. Επίσης, για να ελαχιστοποιηθεί η επιφάνεια ανταλλαγής θερμότητας μεταξύ της δεξαμενής και του περιβάλλοντος επιλέγεται συνήθως σφαιρικό σχήμα δεξαμενής καθώς έχει την βέλτιστη αναλογία επιφάνειας και όγκου



Σχήμα 4.3. Διαμόρφωση τοιχωμάτων δεξαμενών υδροποιημένου υδρογόνου [33].

Η φόρτωση αλλά και η εκφόρτωση του υδροποιημένου υδρογόνου στα δεξαμενόπλοια, πραγματοποιείται μέσω μια διάταξης ενός περιστρεφόμενου συστήματος βραχίονα, με προσαρμοσμένο έναν ελαστικό αγωγό. Με το συγκεκριμένο σύστημα το οποίο έχει αναπτυχθεί από την Kawasaki είναι δυνατή σύνδεση δεξαμενών που βρίσκονται στην στεριά με τα δεξαμενόπλοια χωρίς να επηρεάζεται η όλη κατασκευή από την κίνηση του πλοίου εξαιτίας των κυματισμών. Αυτό επιτυγχάνεται με την χρήση ευκάμπτων αγωγών, οι οποίοι είναι πολύ καλά μονωμένοι ώστε να διατηρείται το υδρογόνο στην υγρή του μορφή, και αυτό επιτυγχάνεται και σε αυτήν την περίπτωση με την δημιουργία κενού ανάμεσα στα στρώματα μόνωσης των αγωγών.



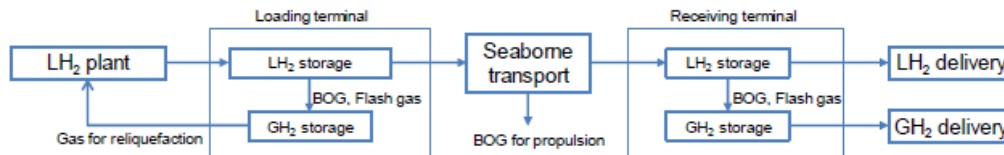
Σχήμα 4.4. Σύστημα περιστρεφόμενου βραχίονα για μεταφορά υδρογόνου (Kawasaki) [33].

Η μεταφορά του υδρογόνου στα επιμέρους νησιά εκτελείται με δεξαμενόπλοια μεταφοράς υγροποιημένου υδρογόνου, η χωρητικότητα των οποίων ποικίλει ανάλογα με την περίσταση. Όταν φτάσουν στον προορισμό τους, θα εκφορτώνονται με το ίδιο σύστημα σε αντίστοιχες δεξαμενές των λιμανιών του εκάστοτε νησιού. Τέλος, η μεταφορά προς τα εργοστάσια παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας θα πραγματοποιείται με φορτηγά κατάλληλα για την μεταφορά υγροποιημένου υδρογόνου.



Σχήμα 4.5. Δεξαμενόπλοιο μεταφοράς LH₂.

Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας στις μονάδες παραγωγής ισχύος των επιλεγμένων νησιών, είναι εφικτή μέσω τουρμπίνων που χρησιμοποιούν ως καύσιμο το υδρογόνο. Συνοπτικά τα στάδια της εφοδιαστικής αλυσίδας παρουσιάζονται στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 4.6: Διαγραμματική απεικόνιση εφοδιαστικής αλυσίδας LH₂ [33].

4.2. Διαδικασία βελτιστοποίησης εφοδιαστικής αλυσίδας

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω οι σταθμοί της εφοδιαστικής αλυσίδας είναι οι εξής:

1. Εργοστάσιο Παραγωγής – Άγιοι Θεόδωροι
2. Σάμος
3. Χίος
4. Λέσβος
5. Λήμνος
6. Κρήτη – Αθερινόλακος
7. Ρόδος
8. Κάλυμνος
9. Κάρπαθος

Το πρώτο στάδιο για την υλοποίηση της βελτιστοποίησης είναι ο προσδιορισμός των απαιτούμενων ποσοτήτων υδρογόνου για το κάθε νησί. Αρχικά, από τα δελτία μηνιαίας παραγωγής μη διασυνδεδεμένων νήσων του ΑΔΜΗΕ για το 2020 προσδιορίστηκαν τα

ποσά ηλεκτρικής ενέργειας που παράγει κάθε νησί από ΑΠΕ και μονάδες παραγωγής ισχύος. Στη συνέχεια αποφασίστηκε να μελετηθούν 2 σενάρια:

- A. Διείσδυση ανανεώσιμων πηγών σε ποσοστό 40% της συνολικής ηλεκτροπαραγωγής
- B. Διείσδυση ανανεώσιμων πηγών σε ποσοστό 60% της συνολικής ηλεκτροπαραγωγής

Ενώ οι εξεταζόμενες εναλλακτικές που εξετάστηκαν είναι :

- α) Ξεχωριστά το κάθε ένα με δρομολόγιο από το λιμάνι του εργοστασίου παραγωγής με ποσότητα καυσίμων για έναν μήνα.
- β) Ξεχωριστά το κάθε ένα με δρομολόγιο από το λιμάνι του εργοστασίου παραγωγής με ποσότητα καυσίμων για 15 ημέρες.
- γ) Κυκλικό δρομολόγιο περνώντας με την σειρά από όλα τα νησιά με ποσότητα υδρογόνου για έναν μήνα.
- δ) Κυκλικό δρομολόγιο περνώντας με την σειρά από όλα τα νησιά με ποσότητα υδρογόνου για 15 ημέρες.

Αφού καθορίστηκαν τα απαιτούμενα ποσά ενέργειας σε MWh από το άθροισμα των μηνιαίων δελτίων του ΑΔΜΗΕ και λαμβάνοντας υπόψη την διείσδυση των ΑΠΕ, ακολούθησε η μετατροπή τους σε τόνους υδρογόνου που πρέπει να καταναλωθούν από μια τουρμπίνα παραγωγής ηλεκτρικής ισχύος μέσω τους ακόλουθου τύπου.

$$LH_2 \text{ consumption} = \frac{\text{Electricity Prod}_{(8000hrs)} * \text{Heat Rate}}{LHV_{H_2}}$$

Όπου :

- Heat rate = 6981kJ/kWh (Turbine: Siemens SGT-600)
- LHV= 141.7 MJ/kg
- Density_{LH2}= 71kg/m³

Από την εφαρμογή της παραπάνω σχέσης προέκυψαν οι ποσότητες για την διάρκεια ενός έτους, και στην συνέχεια έγινε η αναγωγή σε 30 και 15 ημέρες αντίστοιχα. Σε κάθε περίπτωση οι ποσότητες έλαβαν μια προσαύξηση 10% για τις υπόλοιπες ανάγκες ενεργειακής κάλυψης από υδρογόνο αλλά και ως απόθεμα ασφαλείας. Οι ποσότητες έχουν εκφραστεί τόσο σε m³ όσο και σε τόνους. Αξίζει να σημειωθεί πως στην περίπτωση της Κρήτης και με δεδομένο ότι θα έχουν ολοκληρωθεί και οι 2 διασυνδέσεις θεωρούμε απλά την λειτουργία 2 εφεδρικών μονάδων στον Αθρινόλακο σε μέσο φορτίο για 7000 hrs/year. Ακολουθούν συγκεντρωτικοί πίνακες με τις απαιτούμενες ποσότητες υδροποιημένου υδρογόνου για τα 2 σενάρια:

	ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ (tn)	ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ (m3)	ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ (m3) (ΑΝΑ ΜΕΡΑ)	ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ (m3) (ΑΝΑ ΜΕΡΑ+10%)	ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ (m3) (ΓΙΑ 30 ΗΜΕΡΕΣ)	ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ (tn) (ΓΙΑ 30 ΗΜΕΡΕΣ)	ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ (m3) (ΓΙΑ 15 ΗΜΕΡΕΣ)	ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ (tn) (ΓΙΑ 15 ΗΜΕΡΕΣ)
ΣΑΜΟΣ	3.748,8	52.799,9	158,4	174,2	5.227,2	371,1	2.613,6	185,6
ΧΙΟΣ	5.938,9	83.645,8	250,9	276,0	8.280,9	587,9	4.140,5	294,0
ΛΕΣΒΟΣ	8.569,0	120.690,5	362,1	398,3	11.948,4	848,3	5.974,2	424,2
ΛΗΜΝΟΣ	1.731,1	24.381,1	73,1	80,5	2.413,7	171,4	1.206,9	85,7
ΚΡΗΤΗ	17.794,9	250.632,4	751,9	827,1	24.812,6	1.761,7	12.406,3	880,8
ΡΟΔΟΣ	18.846,3	265.440,3	796,3	876,0	26.278,6	1.865,8	13.139,3	932,9
ΚΑΛΥΜΝΟΣ	9.321,1	131.283,7	393,9	433,2	12.997,1	922,8	6.498,5	461,4
ΚΑΡΠΑΘΟΣ	954,6	13.444,7	40,3	44,4	1.331,0	94,5	665,5	47,3

Πίνακας 4.1 Ποσότητες υδρογόνου για διείσδυση ΑΠΕ 40%.

	ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ (tn)	ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ (m3)	ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ (m3) (ΑΝΑ ΜΕΡΑ)	ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ (m3) (ΑΝΑ ΜΕΡΑ+10%)	ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ (m3) (ΓΙΑ 30 ΗΜΕΡΕΣ)	ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ (tn) (ΓΙΑ 30 ΗΜΕΡΕΣ)	ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ (m3) (ΓΙΑ 15 ΗΜΕΡΕΣ)	ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ (tn) (ΓΙΑ 15 ΗΜΕΡΕΣ)
ΣΑΜΟΣ	2.499,2	35.199,9	105,6	116,2	3.484,8	247,4	1.742,4	123,7
ΧΙΟΣ	3.959,2	55.763,9	167,3	184,0	5.520,6	392,0	2.760,3	196,0
ΛΕΣΒΟΣ	5.712,7	80.460,3	241,4	265,5	7.965,6	565,6	3.982,8	282,8
ΛΗΜΝΟΣ	1.154,0	16.254,0	48,8	53,6	1.609,2	114,2	804,6	57,1
ΚΡΗΤΗ	11.863,3	167.088,3	501,3	551,4	13.541,7	1.174,5	6.770,9	587,2
ΡΟΔΟΣ	12.564,2	176.960,2	530,9	584,0	14.519,1	1.243,9	7.259,5	621,9
ΚΑΛΥΜΝΟΣ	6.214,1	87.522,4	262,6	288,8	8.664,7	615,2	4.332,4	307,6
ΚΑΡΠΑΘΟΣ	636,4	8.963,2	26,9	29,6	887,4	63,0	443,7	31,5

Πίνακας 4.2 Ποσότητες υδρογόνου για διείσδυση ΑΠΕ 60%.

Ακολουθεί η ανάλυση των κριτηρίων για την αξιολόγηση των εναλλακτικών.

Το πρώτο κριτήριο που επιλέχθηκε ήταν η απόσταση ανάμεσα στις διάφορες δυνατές διαδρομές. Συγκεντρωτικά στον πίνακα 4.3 φαίνονται οι αποστάσεις σε ναυτικά μίλια (nm). Ο συγκεκριμένος πίνακας χρησιμοποιείται και ως είσοδος στον κώδικα που χρησιμοποιήθηκε (ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ) για την εύρεση της βέλτιστης διαδρομής στις εναλλακτικές που περιέχουν κυκλικά δρομολόγια. Για τον υπολογισμό των επιμέρους αποστάσεων χρησιμοποιήθηκε η πλατφόρμα Searoutes (<https://classic.searoutes.com/>).

	ΕΡΓΟΣΤΑΣΙΟ	ΣΑΜΟΣ	ΧΙΟΣ	ΛΕΣΒΟΣ	ΛΗΜΝΟΣ	ΚΡΗΤΗ	ΡΟΔΟΣ	ΚΑΛΥΜΝΟΣ
ΕΡΓΟΣΤΑΣΙΟ	0	225	215	266	215	277	302	242
ΣΑΜΟΣ	225	0	56	113	167	224	154	63
ΧΙΟΣ	215	56	0	60	108	235	179	106
ΛΕΣΒΟΣ	266	113	60	0	94	291	235	162
ΛΗΜΝΟΣ	215	167	108	94	0	320	287	212
ΚΡΗΤΗ	277	224	235	291	320	0	140	137
ΡΟΔΟΣ	302	154	179	235	287	140	0	87
ΚΑΛΥΜΝΟΣ	242	63	106	162	212	137	87	0

Πίνακας 4.3 Πίνακας αποστάσεων μεταξύ σταθμών.

Μετά από εφαρμογή του αλγόριθμου εύρεσης συντομότερης διαδρομής αυτή που προέκυψε ήταν η εξής κυκλική:

Εργοστάσιο-Λήμνος-Λέσβος-Χίος-Σάμος-Κάλυμνος-Ρόδος-Κάρπαθος-Κρήτη-Εργοστάσιο

Οι αποστάσεις, που είναι ίδιες και στα 2 σενάρια παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.4:

ΚΡΙΤΗΡΙΟ	ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΗ 1	ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΗ 2	ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΗ 3	ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΗ 4
C1-ΑΠΟΣΤΑΣΗ (nm)	4020	8040	993	1986

Πίνακας 4.4 Συνολικές αποστάσεις κάθε εναλλακτικής.

Το δεύτερο κριτήριο είναι ο χρόνος ταξιδιού. Θεωρούμε ταχύτητα πλοίου 15knots. Στον συνολικό χρόνο ταξιδιού συνυπολογίζεται ο χρόνος φόρτωσης και εκφόρτωσης του υδρογόνου καθώς και επιπλέον 4 ώρες σε κάθε λιμάνι για την προετοιμασία της εκφόρτωσης [39]. Ο ρυθμός φόρτωσης είναι $6000\text{m}^3/\text{hr}$ ενώ ο ρυθμός εκφόρτωσης $3000\text{m}^3/\text{hr}$. Αναλυτικοί πίνακες υπολογισμού ακολουθούν στο παράρτημα. Τα αποτελέσματα φαίνονται παρακάτω:

ΚΡΙΤΗΡΙΟ	ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΗ 1	ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΗ 2	ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΗ 3	ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΗ 4
C2-ΧΡΟΝΟΣ (hrs)	346,6	614,6	144,8	211,0

Πίνακας 4.5 Συνολικοί χρόνοι κάθε εναλλακτικής-Α Σενάριο

ΚΡΙΤΗΡΙΟ	ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΗ 1	ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΗ 2	ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΗ 3	ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΗ 4
C2-ΧΡΟΝΟΣ (hrs)	328,1	596,1	126,3	192,5

Πίνακας 4.6 Συνολικοί χρόνοι κάθε εναλλακτικής-B Σενάριο

Το 3^ο κριτήριο αποτελούν τα έξοδα ναύλων. Συγκεκριμένα, εκτιμάται ότι το κόστος μεταφοράς υδρογόνου θα είναι 2.5 φορές ακριβότερο από το αντίστοιχο του LNG [32,33]. Για το Α Σενάριο για την 1^η εναλλακτική επιλέχθηκε tanker χωρητικότητας 30000m^3 το κόστος του οποίου ανέρχεται στα $94000\text{€}/\text{day}$. Για την 2^η εναλλακτική tanker χωρητικότητας 15000m^3 με κόστος $70500\text{€}/\text{day}$, ενώ για την 3^η αντίστοιχα tanker χωρητικότητας 100000m^3 με κόστος είναι $194250\text{€}/\text{day}$. Τέλος για την 4^η εναλλακτική θεωρούμε tanker χωρητικότητας 75000m^3 με κόστος $158500\text{€}/\text{day}$.

Για το Β Σενάριο για την 1^η και 2^η εναλλακτική επιλέχθηκε tanker χωρητικότητας 15000m^3 το κόστος του οποίου ανέρχεται στα $70500\text{€}/\text{day}$, ενώ για την 3^η αντίστοιχα tanker χωρητικότητας 75000m^3 με κόστος είναι $158500\text{€}/\text{day}$. Τέλος για την 4^η εναλλακτική θεωρούμε tanker χωρητικότητας 30000m^3 με κόστος $94000\text{€}/\text{day}$ [39].

Τελικά με βάση τα παραπάνω καταλήγουμε:

ΚΡΙΤΗΡΙΟ	ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΗ 1	ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΗ 2	ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΗ 3	ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΗ 4
C3-ΕΞΟΔΑ ΝΑΥΛΩΝ (€)	1.126.707 €	1.805.388 €	1.171.975 €	1.393.479 €

Πίνακας 4.7 Συνολικοί έξοδα ναύλων κάθε εναλλακτικής-Α Σενάριο

ΚΡΙΤΗΡΙΟ	ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΗ 1	ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΗ 2	ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΗ 3	ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΗ 4
C3-ΕΞΟΔΑ ΝΑΥΛΩΝ (€)	963.794 €	1.751.044 €	834.106 €	1.271.302 €

Πίνακας 4.8 Συνολικοί έξοδα ναύλων κάθε εναλλακτικής-Β Σενάριο

Το τέταρτο κριτήριο αφορά την κατανάλωση καυσίμου του κάθε tanker. Για το Α Σενάριο για την 1^η εναλλακτική επιλέχθηκε tanker χωρητικότητας 30000m³ η κατανάλωση του οποίου είναι 26,5tn/day. Για την 2^η εναλλακτική tanker χωρητικότητας 15000m³ με κατανάλωση 18tn/day, ενώ για την 3^η αντίστοιχα tanker χωρητικότητας 100000m³ με κατανάλωση 136tn/day.. Τέλος για την 4^η εναλλακτική θεωρούμε tanker χωρητικότητας 75000m³ με κατανάλωση 117tn/day.

Για το Β Σενάριο για την 1^η και 2^η εναλλακτική επιλέχθηκε tanker χωρητικότητας 15000m³ και κατανάλωση 18tn/day, ενώ για την 3^η αντίστοιχα tanker χωρητικότητας 75000m³ με κατανάλωση 117tn/day. Τέλος για την 4^η εναλλακτική θεωρούμε tanker χωρητικότητας 30000m³ με κατανάλωση 26,5tn/day.

Με βάση τους καθαρούς χρόνους ταξιδιού καταλήγουμε:

ΚΡΙΤΗΡΙΟ	ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΗ 1	ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΗ 2	ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΗ 3	ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΗ 4
C4-ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ ΚΑΥΣΙΜΟΥ (tn)	228,34	402,0	375,1	645,5

Πίνακας 4.10 Συνολική κατανάλωση καυσίμου κάθε εναλλακτικής-Α Σενάριο

ΚΡΙΤΗΡΙΟ	ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΗ 1	ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΗ 2	ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΗ 3	ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΗ 4
C4-ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ ΚΑΥΣΙΜΟΥ (tn)	201,00	402,0	322,7	146,2

Πίνακας 4.11 Συνολική κατανάλωση καυσίμου κάθε εναλλακτικής-B Σενάριο

Το πέμπτο κριτήριο που επιλέχθηκε είναι το κόστος επίσκεψης των λιμένων. Υποθέτουμε τα παρακάτω [39]:

-Κάθε επίσκεψη στα μικρά λιμάνια των νησιών κοστίζει 23500€ (αναφερόμαστε στο ξεφόρτωμα)

-Εργατικά κόστη: 280€/hr (αναφερόμαστε στο ξεφόρτωμα)

Και καταλήγουμε:

ΚΡΙΤΗΡΙΟ	ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΗ 1	ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΗ 2	ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΗ 3	ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΗ 4
C5-ΚΟΣΤΟΣ ΛΙΜΕΝΩΝ (€)	205.668 €	393.668 €	205.668 €	393.668 €

Πίνακας 4.12 Συνολικά κόστη λιμένων κάθε εναλλακτικής-A Σενάριο

ΚΡΙΤΗΡΙΟ	ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΗ 1	ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΗ 2	ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΗ 3	ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΗ 4
C5-ΚΟΣΤΟΣ ΛΙΜΕΝΩΝ (€)	202.196 €	390.196 €	202.196 €	390.196 €

Πίνακας 4.13 Συνολικά κόστη λιμένων κάθε εναλλακτικής-B Σενάριο

Έκτο και τελευταίο κριτήριο είναι ο περιβαλλοντικός δείκτης ΕΕΟΙ, που είναι ένα μέτρο για το πόσο φορτίο μεταφέρεται συγκριτικά με το πόσο καύσιμο καταναλώνεται και κατ' επέκταση πόσοι ρύποι εκπέμπονται. Η σχέση υπολογισμού είναι [39]:

$$EEOI * 10^{-6} = \frac{\sum FC_j C_{Fj}}{m_{cargo} * D}$$

Όπου:

FC_j : η μάζα καυσίμου που καταναλώνεται

C_{Fj} : μια αδιάστατη τιμή που εκφράζει την σχέση ανάμεσα στα γραμμάρια καυσίμου που καταναλώνονται και στα γραμμάρια CO_2 που εκπέμπονται.

D: η απόσταση που διανύεται

m_{cargo} : το φορτίο που μεταφέρεται

Με $C_{fj}=3.206$ για diesel-electric κινητήρα.

Αναλυτικοί υπολογισμοί των δεικτών ακολουθούν στο παράρτημα.

ΚΡΙΤΗΡΙΟ	ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΗ 1	ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΗ 2	ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΗ 3	ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΗ 4
C6-ΕΕΟΙ	7.918,68	15503,2	341,7	1175,7

Πίνακας 4.14 Δείκτης ΕΕΟΙ κάθε εναλλακτικής-Α Σενάριο

ΚΡΙΤΗΡΙΟ	ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΗ 1	ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΗ 2	ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΗ 3	ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΗ 4
C6-ΕΕΟΙ	11.877,92	23.254,59	512,51	1763,6

Πίνακας 4.15 Δείκτης ΕΕΟΙ κάθε εναλλακτικής-Β Σενάριο

Και συνολικά οι πίνακες κριτηρίων για τις 2 εναλλακτικές είναι ο ακόλουθος:

ΚΡΙΤΗΡΙΑ	ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΗ 1	ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΗ 2	ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΗ 3	ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΗ 4
C1-ΑΠΟΣΤΑΣΗ (nm)	4020	8040	993	1986
C2-ΧΡΟΝΟΣ (hrs)	346,6	614,6	144,8	211,0
C3-ΕΞΟΔΑ ΝΑΥΛΩΝ (€)	1.126.707 €	1.805.388 €	1.171.975 €	1.393.479 €
C4-ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ ΚΑΥΣΙΜΟΥ (tn)	228,34	402,0	375,1	645,5
C5-ΚΟΣΤΟΣ ΛΙΜΕΝΩΝ (€)	205.668 €	393.668 €	205.668 €	393.668 €
C6-ΕΕΟΙ	7.918,68	15503,2	341,7	1175,7

Πίνακας 4.16 Συγκεντρωτικές τιμές κριτηρίων-Α-Σενάριο

ΚΡΙΤΗΡΙΑ	ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΗ 1	ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΗ 2	ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΗ 3	ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΗ 4
C1-ΑΠΟΣΤΑΣΗ (nm)	4020	8040	993	1986
C2-ΧΡΟΝΟΣ (hrs)	328,1	596,1	126,3	192,5
C3-ΕΞΟΔΑ ΝΑΥΛΩΝ (€)	963.794 €	1.751.044 €	834.106 €	1.271.302 €
C4-ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ ΚΑΥΣΙΜΟΥ (tn)	201,00	402,0	322,7	146,2
C5-ΚΟΣΤΟΣ ΛΙΜΕΝΩΝ (€)	202.196 €	390.196 €	202.196 €	390.196 €
C6-ΕΞΟΙ	11.877,92	23.254,59	512,51	1763,6

Πίνακας 4.17 Συγκεντρωτικές τιμές κριτηρίων-B-Σενάριο

Αφού υπολογιστήκαν οι τιμές για τα κριτήρια της κάθε εναλλακτικής το επόμενο βήμα είναι ο καθορισμός της βαρύτητας του εκάστοτε κριτηρίου. Η βαρύτητα υπολογίστηκε με χρήση της Analytic Hierarchy Process (AHP), και συγκεκριμένα ενός λογισμικού που την υλοποιεί (AHP Calculator). Η AHP μέθοδος κάνει διμερείς συγκρίσεις μεταξύ δύο κριτηρίων αξιολογώντας τη σπουδαιότητα του ενός έναντι του άλλου. Οι συγκρίσεις αυτού του τύπου χρησιμοποιούνται κυρίως για τον προσδιορισμό του βάρους των κριτηρίων. Ο υπεύθυνος λήψης αποφάσεων πρέπει να συγκρίνει τα κριτήρια σε ζεύγη για να προσδιορίσει τη σχετική σημασία κάθε κριτηρίου, χρησιμοποιώντας μια προκαθορισμένη κλίμακα εννέα σημείων που δείχνει το σχετικό σημασία ενός κριτηρίου έναντι του άλλου.

Αποφασίστηκε να γίνει η σύγκριση των εναλλακτικών με εφαρμογή 3 διαφορετικών τρόπων κατανομής της βαρύτητας στα κριτήρια:

1. Ίδια βαρύτητα σε όλα τα κριτήρια
2. Μεγαλύτερη βαρύτητα στα περιβαλλοντικά κριτήρια (C6)
3. Μεγαλύτερη βαρύτητα στα οικονομικά κριτήρια (C3,C5)

Η αξιολόγηση για την κατανομή της βαρύτητας μέσω της ΑΗΡ που φαίνεται στο Σχήμα 4.7 και στο 4.8, γίνεται μέσω της σύγκρισης ανά ζεύγη, και ειδικότερα στα κριτήρια που αποφασίστηκε να δοθεί έμφαση, βαθμολογήθηκαν με 8 σε σχέση με τα υπόλοιπα, ενώ όταν θεωρούμε ασθενή ή οριακή υπεροχή το αντίστοιχο κριτήριο βαθμολογείται με 4.

A - wrt AHP priorities - or B?		Equal	How much more?
1	<input checked="" type="radio"/> C1-ΑΠΟΣΤΑΣΗ	<input type="radio"/> C2-ΧΡΟΝΟΣ	<input checked="" type="radio"/> 1 <input type="radio"/> 2 <input type="radio"/> 3 <input type="radio"/> 4 <input type="radio"/> 5 <input type="radio"/> 6 <input type="radio"/> 7 <input type="radio"/> 8 <input type="radio"/> 9
2	<input type="radio"/> C1-ΑΠΟΣΤΑΣΗ	<input checked="" type="radio"/> C3-ΕΞΟΔΑ ΝΑΥΛΩΝ	<input type="radio"/> 2 <input type="radio"/> 3 <input checked="" type="radio"/> 4 <input type="radio"/> 5 <input type="radio"/> 6 <input type="radio"/> 7 <input type="radio"/> 8 <input type="radio"/> 9
3	<input checked="" type="radio"/> C1-ΑΠΟΣΤΑΣΗ	<input type="radio"/> C4-ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ ΚΑΥΣΙΜΟΥ	<input checked="" type="radio"/> 1 <input type="radio"/> 2 <input type="radio"/> 3 <input type="radio"/> 4 <input type="radio"/> 5 <input type="radio"/> 6 <input type="radio"/> 7 <input type="radio"/> 8 <input type="radio"/> 9
4	<input type="radio"/> C1-ΑΠΟΣΤΑΣΗ	<input checked="" type="radio"/> C5-ΕΡΓΑΤΙΚΑ ΚΟΣΤΗ	<input type="radio"/> 2 <input type="radio"/> 3 <input checked="" type="radio"/> 4 <input type="radio"/> 5 <input type="radio"/> 6 <input type="radio"/> 7 <input type="radio"/> 8 <input type="radio"/> 9
5	<input type="radio"/> C1-ΑΠΟΣΤΑΣΗ	<input checked="" type="radio"/> C6-ΕΕΟΙ	<input type="radio"/> 2 <input type="radio"/> 3 <input type="radio"/> 4 <input type="radio"/> 5 <input type="radio"/> 6 <input type="radio"/> 7 <input checked="" type="radio"/> 8 <input type="radio"/> 9
6	<input type="radio"/> C2-ΧΡΟΝΟΣ	<input checked="" type="radio"/> C3-ΕΞΟΔΑ ΝΑΥΛΩΝ	<input type="radio"/> 2 <input type="radio"/> 3 <input checked="" type="radio"/> 4 <input type="radio"/> 5 <input type="radio"/> 6 <input type="radio"/> 7 <input type="radio"/> 8 <input type="radio"/> 9
7	<input checked="" type="radio"/> C2-ΧΡΟΝΟΣ	<input type="radio"/> C4-ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ ΚΑΥΣΙΜΟΥ	<input checked="" type="radio"/> 1 <input type="radio"/> 2 <input type="radio"/> 3 <input type="radio"/> 4 <input type="radio"/> 5 <input type="radio"/> 6 <input type="radio"/> 7 <input type="radio"/> 8 <input type="radio"/> 9
8	<input type="radio"/> C2-ΧΡΟΝΟΣ	<input checked="" type="radio"/> C5-ΕΡΓΑΤΙΚΑ ΚΟΣΤΗ	<input type="radio"/> 2 <input type="radio"/> 3 <input checked="" type="radio"/> 4 <input type="radio"/> 5 <input type="radio"/> 6 <input type="radio"/> 7 <input type="radio"/> 8 <input type="radio"/> 9
9	<input type="radio"/> C2-ΧΡΟΝΟΣ	<input checked="" type="radio"/> C6-ΕΕΟΙ	<input type="radio"/> 2 <input type="radio"/> 3 <input type="radio"/> 4 <input type="radio"/> 5 <input type="radio"/> 6 <input type="radio"/> 7 <input checked="" type="radio"/> 8 <input type="radio"/> 9
10	<input checked="" type="radio"/> C3-ΕΞΟΔΑ ΝΑΥΛΩΝ	<input type="radio"/> C4-ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ ΚΑΥΣΙΜΟΥ	<input type="radio"/> 2 <input type="radio"/> 3 <input checked="" type="radio"/> 4 <input type="radio"/> 5 <input type="radio"/> 6 <input type="radio"/> 7 <input type="radio"/> 8 <input type="radio"/> 9
11	<input checked="" type="radio"/> C3-ΕΞΟΔΑ ΝΑΥΛΩΝ	<input type="radio"/> C5-ΕΡΓΑΤΙΚΑ ΚΟΣΤΗ	<input checked="" type="radio"/> 1 <input type="radio"/> 2 <input type="radio"/> 3 <input type="radio"/> 4 <input type="radio"/> 5 <input type="radio"/> 6 <input type="radio"/> 7 <input type="radio"/> 8 <input type="radio"/> 9
12	<input type="radio"/> C3-ΕΞΟΔΑ ΝΑΥΛΩΝ	<input checked="" type="radio"/> C6-ΕΕΟΙ	<input type="radio"/> 2 <input type="radio"/> 3 <input type="radio"/> 4 <input type="radio"/> 5 <input type="radio"/> 6 <input type="radio"/> 7 <input checked="" type="radio"/> 8 <input type="radio"/> 9
13	<input type="radio"/> C4-ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ ΚΑΥΣΙΜΟΥ	<input checked="" type="radio"/> C5-ΕΡΓΑΤΙΚΑ ΚΟΣΤΗ	<input type="radio"/> 2 <input type="radio"/> 3 <input checked="" type="radio"/> 4 <input type="radio"/> 5 <input type="radio"/> 6 <input type="radio"/> 7 <input type="radio"/> 8 <input type="radio"/> 9
14	<input type="radio"/> C4-ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ ΚΑΥΣΙΜΟΥ	<input checked="" type="radio"/> C6-ΕΕΟΙ	<input type="radio"/> 2 <input type="radio"/> 3 <input type="radio"/> 4 <input type="radio"/> 5 <input type="radio"/> 6 <input type="radio"/> 7 <input checked="" type="radio"/> 8 <input type="radio"/> 9
15	<input type="radio"/> C5-ΕΡΓΑΤΙΚΑ ΚΟΣΤΗ	<input checked="" type="radio"/> C6-ΕΕΟΙ	<input type="radio"/> 2 <input type="radio"/> 3 <input type="radio"/> 4 <input type="radio"/> 5 <input type="radio"/> 6 <input type="radio"/> 7 <input checked="" type="radio"/> 8 <input type="radio"/> 9

Σχήμα 4.7: Κατάταξη κριτηρίων για έμφαση στο περιβάλλον.

A - wrt AHP priorities - or B?		Equal	How much more?
1	<input checked="" type="radio"/> C1-ΑΠΟΣΤΑΣΗ	<input type="radio"/> C2-ΧΡΟΝΟΣ	<input checked="" type="radio"/> 1 <input type="radio"/> 2 <input type="radio"/> 3 <input type="radio"/> 4 <input type="radio"/> 5 <input type="radio"/> 6 <input type="radio"/> 7 <input type="radio"/> 8 <input type="radio"/> 9
2	<input type="radio"/> C1-ΑΠΟΣΤΑΣΗ	<input checked="" type="radio"/> C3-ΕΞΟΔΑ ΝΑΥΛΩΝ	<input type="radio"/> 2 <input type="radio"/> 3 <input checked="" type="radio"/> 4 <input type="radio"/> 5 <input type="radio"/> 6 <input type="radio"/> 7 <input type="radio"/> 8 <input type="radio"/> 9
3	<input checked="" type="radio"/> C1-ΑΠΟΣΤΑΣΗ	<input type="radio"/> C4-ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ ΚΑΥΣΙΜΟΥ	<input checked="" type="radio"/> 1 <input type="radio"/> 2 <input type="radio"/> 3 <input type="radio"/> 4 <input type="radio"/> 5 <input type="radio"/> 6 <input type="radio"/> 7 <input type="radio"/> 8 <input type="radio"/> 9
4	<input type="radio"/> C1-ΑΠΟΣΤΑΣΗ	<input checked="" type="radio"/> C5-ΕΡΓΑΤΙΚΑ ΚΟΣΤΗ	<input type="radio"/> 2 <input type="radio"/> 3 <input checked="" type="radio"/> 4 <input type="radio"/> 5 <input type="radio"/> 6 <input type="radio"/> 7 <input type="radio"/> 8 <input type="radio"/> 9
5	<input type="radio"/> C1-ΑΠΟΣΤΑΣΗ	<input checked="" type="radio"/> C6-ΕΕΟΙ	<input type="radio"/> 2 <input type="radio"/> 3 <input type="radio"/> 4 <input type="radio"/> 5 <input type="radio"/> 6 <input type="radio"/> 7 <input checked="" type="radio"/> 8 <input type="radio"/> 9
6	<input type="radio"/> C2-ΧΡΟΝΟΣ	<input checked="" type="radio"/> C3-ΕΞΟΔΑ ΝΑΥΛΩΝ	<input type="radio"/> 2 <input type="radio"/> 3 <input checked="" type="radio"/> 4 <input type="radio"/> 5 <input type="radio"/> 6 <input type="radio"/> 7 <input type="radio"/> 8 <input type="radio"/> 9
7	<input checked="" type="radio"/> C2-ΧΡΟΝΟΣ	<input type="radio"/> C4-ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ ΚΑΥΣΙΜΟΥ	<input checked="" type="radio"/> 1 <input type="radio"/> 2 <input type="radio"/> 3 <input type="radio"/> 4 <input type="radio"/> 5 <input type="radio"/> 6 <input type="radio"/> 7 <input type="radio"/> 8 <input type="radio"/> 9
8	<input type="radio"/> C2-ΧΡΟΝΟΣ	<input checked="" type="radio"/> C5-ΕΡΓΑΤΙΚΑ ΚΟΣΤΗ	<input type="radio"/> 2 <input type="radio"/> 3 <input checked="" type="radio"/> 4 <input type="radio"/> 5 <input type="radio"/> 6 <input type="radio"/> 7 <input type="radio"/> 8 <input type="radio"/> 9
9	<input type="radio"/> C2-ΧΡΟΝΟΣ	<input checked="" type="radio"/> C6-ΕΕΟΙ	<input type="radio"/> 2 <input type="radio"/> 3 <input type="radio"/> 4 <input type="radio"/> 5 <input type="radio"/> 6 <input type="radio"/> 7 <input checked="" type="radio"/> 8 <input type="radio"/> 9
10	<input checked="" type="radio"/> C3-ΕΞΟΔΑ ΝΑΥΛΩΝ	<input type="radio"/> C4-ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ ΚΑΥΣΙΜΟΥ	<input type="radio"/> 2 <input type="radio"/> 3 <input checked="" type="radio"/> 4 <input type="radio"/> 5 <input type="radio"/> 6 <input type="radio"/> 7 <input type="radio"/> 8 <input type="radio"/> 9
11	<input checked="" type="radio"/> C3-ΕΞΟΔΑ ΝΑΥΛΩΝ	<input type="radio"/> C5-ΕΡΓΑΤΙΚΑ ΚΟΣΤΗ	<input checked="" type="radio"/> 1 <input type="radio"/> 2 <input type="radio"/> 3 <input type="radio"/> 4 <input type="radio"/> 5 <input type="radio"/> 6 <input type="radio"/> 7 <input type="radio"/> 8 <input type="radio"/> 9
12	<input type="radio"/> C3-ΕΞΟΔΑ ΝΑΥΛΩΝ	<input checked="" type="radio"/> C6-ΕΕΟΙ	<input type="radio"/> 2 <input type="radio"/> 3 <input type="radio"/> 4 <input type="radio"/> 5 <input type="radio"/> 6 <input type="radio"/> 7 <input checked="" type="radio"/> 8 <input type="radio"/> 9
13	<input type="radio"/> C4-ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ ΚΑΥΣΙΜΟΥ	<input checked="" type="radio"/> C5-ΕΡΓΑΤΙΚΑ ΚΟΣΤΗ	<input type="radio"/> 2 <input type="radio"/> 3 <input checked="" type="radio"/> 4 <input type="radio"/> 5 <input type="radio"/> 6 <input type="radio"/> 7 <input type="radio"/> 8 <input type="radio"/> 9
14	<input type="radio"/> C4-ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ ΚΑΥΣΙΜΟΥ	<input checked="" type="radio"/> C6-ΕΕΟΙ	<input type="radio"/> 2 <input type="radio"/> 3 <input type="radio"/> 4 <input type="radio"/> 5 <input type="radio"/> 6 <input type="radio"/> 7 <input checked="" type="radio"/> 8 <input type="radio"/> 9
15	<input type="radio"/> C5-ΕΡΓΑΤΙΚΑ ΚΟΣΤΗ	<input checked="" type="radio"/> C6-ΕΕΟΙ	<input type="radio"/> 2 <input type="radio"/> 3 <input type="radio"/> 4 <input type="radio"/> 5 <input type="radio"/> 6 <input type="radio"/> 7 <input checked="" type="radio"/> 8 <input type="radio"/> 9

Σχήμα 4.8: Κατάταξη κριτηρίων για έμφαση στην οικονομία.

Και ο πίνακας με την βαρύτητα ανά περίπτωση:

	C1	C2	C3	C4	C5	C6
Ουδέτερη	16,7%	16,7%	16,7%	16,7%	16,7%	16,7%
Περιβαλλοντική	4,3%	4,3%	13,6%	4,3%	13,6%	60%
Οικονομική	3,6%	3,6%	38,7%	3,6%	38,7%	12%

Πίνακας 4.18 Συγκεντρωτικές τιμές βαρύτητας κριτηρίων

Αφού ορίστηκαν και οι τιμές της βαρύτητας των κριτηρίων, επόμενο βήμα είναι η επιλογή της καλύτερης εναλλακτικής με εφαρμογή της πολυκριτηριακής μεθόδου PROMETHEE I καθώς, η χρησιμοποίηση της δίνει την δυνατότητα τόσο της πλήρους αλλά και της εν μέρει ταξινόμησης εναλλακτικών, είναι γενικά αποτελεσματική όταν εφαρμόζεται σε περίπλοκα προβλήματα, ειδικά εκείνα που περιέχουν πολλαπλά κριτήρια, συμπεριλαμβανομένων διαφόρων παραγόντων που επηρεάζουν την απόφαση. Επιπλέον, ως μέθοδος, είναι μια από τις πιο φιλικές και κατανοητές προς το χρήστη, ενώ επίσης χρησιμοποιήθηκε με μεγάλη επιτυχία σε διάφορα προβλήματα στον πραγματικό κόσμο. Η σύγκριση των εναλλακτικών πραγματοποιήθηκε μέσω του ελεύθερου λογισμικού Visual PROMETHEE Academic.

Ακολουθούν στιγμιότυπα από τη συμπλήρωση των απαραίτητων δεδομένων για την υλοποίηση της σύγκρισης και κατάταξης των εναλλακτικών:

	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Scenario1	Απόσταση	Χρόνος	Εξοδα ναύλων	Κατανάλωση...	Κόστη Λιμένων	EEOI
Unit	nm	hrs	€	tn	€	
Cluster/Group	◆	◆	◆	◆	◆	◆
Preferences						
Min/Max	min	min	min	min	min	min
Weight	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16
Preference Fn.	Linear	Linear	Linear	Linear	Linear	Linear
Thresholds	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute
- Q: Indifference	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
- P: Preference	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00
- S: Gaussian	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
Statistics						
Minimum	993,00	144,80	1126707,00	228,34	205668,00	341,70
Maximum	8040,00	614,60	1805388,00	645,50	393668,00	15503,20
Average	3759,75	329,25	1374387,25	412,74	299668,00	6234,65
Standard Dev.	2701,36	180,09	268534,15	149,76	94000,00	6104,50
Evaluations						
<input checked="" type="checkbox"/> EN. 1	4020,00	346,60	1126707,00	228,34	205668,00	7918,00
<input checked="" type="checkbox"/> EN. 2	8040,00	614,60	1805388,00	402,00	393668,00	15503,20
<input checked="" type="checkbox"/> EN. 3	993,00	144,80	1171975,00	375,10	205668,00	341,70
<input checked="" type="checkbox"/> EN. 4	1986,00	211,00	1393479,00	645,50	393668,00	1175,70

Σχήμα 4.9: Αρχείο εισόδου A_Σενάριο_Ουδέτερη προτίμηση.

		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Scenario1		Απόσταση	Χρόνος	Εξοδα ναύλων	Κατανάλωση...	Κόστη Λιμένων	EEOI
Unit		nm	hrs	€	tn	€	
Cluster/Group		◆	◆	◆	◆	◆	◆
Preferences							
Min/Max		min	min	min	min	min	min
Weight		0,04	0,04	0,14	0,04	0,14	0,60
Preference Fn.		Linear	Linear	Linear	Linear	Linear	Linear
Thresholds		absolute	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute
- Q: Indifference		1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
- P: Preference		2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00
- S: Gaussian		n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
Statistics							
Minimum		993,00	144,80	1126707,00	228,34	205668,00	341,70
Maximum		8040,00	614,60	1805388,00	645,50	393668,00	15503,20
Average		3759,75	329,25	1374387,25	412,74	299668,00	6234,65
Standard Dev.		2701,36	180,09	268534,15	149,76	94000,00	6104,50
Evaluations							
<input checked="" type="checkbox"/>	EN.1	4020,00	346,60	1126707,00	228,34	205668,00	7918,00
<input checked="" type="checkbox"/>	EN.2	8040,00	614,60	1805388,00	402,00	393668,00	15503,20
<input checked="" type="checkbox"/>	EN.3	993,00	144,80	1171975,00	375,10	205668,00	341,70
<input checked="" type="checkbox"/>	EN.4	1986,00	211,00	1393479,00	645,50	393668,00	1175,70

Σχήμα 4.10: Αρχείο εισόδου A_Σενάριο_ Περιβαλλοντική προτίμηση.

		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Scenario1		Απόσταση	Χρόνος	Εξοδα ναύλων	Κατανάλωση...	Κόστη Λιμένων	EEOI
Unit		nm	hrs	€	tn	€	
Cluster/Group		◆	◆	◆	◆	◆	◆
Preferences							
Min/Max		min	min	min	min	min	min
Weight		0,04	0,04	0,40	0,04	0,40	0,12
Preference Fn.		Linear	Linear	Linear	Linear	Linear	Linear
Thresholds		absolute	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute
- Q: Indifference		1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
- P: Preference		2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00
- S: Gaussian		n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
Statistics							
Minimum		993,00	144,80	1126707,00	228,34	205668,00	341,70
Maximum		8040,00	614,60	1805388,00	645,50	393668,00	15503,20
Average		3759,75	329,25	1374387,25	412,74	299668,00	6234,65
Standard Dev.		2701,36	180,09	268534,15	149,76	94000,00	6104,50
Evaluations							
<input checked="" type="checkbox"/>	EN.1	4020,00	346,60	1126707,00	228,34	205668,00	7918,00
<input checked="" type="checkbox"/>	EN.2	8040,00	614,60	1805388,00	402,00	393668,00	15503,20
<input checked="" type="checkbox"/>	EN.3	993,00	144,80	1171975,00	375,10	205668,00	341,70
<input checked="" type="checkbox"/>	EN.4	1986,00	211,00	1393479,00	645,50	393668,00	1175,70

Σχήμα 4.11: Αρχείο εισόδου A_Σενάριο_ Οικονομική προτίμηση.

	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
Scenario2	Απόσταση	Χρόνος	Εξοδα ναύλων	Κατανάλωση...	Κόστη Λιμένων	ΕΕΟΙ	
Unit	nm	hrs	€	tn	€		
Cluster/Group	◆	◆	◆	◆	◆	◆	
Preferences							
Min/Max	min	min	min	min	min	min	
Weight	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	
Preference Fn.	Linear	Linear	Linear	Linear	Linear	Linear	
Thresholds	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute	
- Q: Indifference	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	
- P: Preference	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	
- S: Gaussian	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	
Statistics							
Minimum	993,00	126,30	834106,00	146,20	202196,00	512,51	
Maximum	8040,00	596,10	1751044,00	402,00	390196,00	23254,59	
Average	3759,75	310,75	1205061,50	267,98	296196,00	9352,16	
Standard Dev.	2701,36	180,09	352952,79	100,34	94000,00	9156,73	
Evaluations							
<input checked="" type="checkbox"/>	EN. 1	4020,00	328,10	963794,00	201,00	202196,00	11877,92
<input checked="" type="checkbox"/>	EN. 2	8040,00	596,10	1751044,00	402,00	390196,00	23254,59
<input checked="" type="checkbox"/>	EN. 3	993,00	126,30	834106,00	322,70	202196,00	512,51
<input checked="" type="checkbox"/>	EN. 4	1986,00	192,50	1271302,00	146,20	390196,00	1763,60

Σχήμα 4.12: Αρχείο εισόδου B_Σενάριο_Ουδέτερη προτίμηση.

	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
Scenario2	Απόσταση	Χρόνος	Εξοδα ναύλων	Κατανάλωση...	Κόστη Λιμένων	ΕΕΟΙ	
Unit	nm	hrs	€	tn	€		
Cluster/Group	◆	◆	◆	◆	◆	◆	
Preferences							
Min/Max	min	min	min	min	min	min	
Weight	0,04	0,04	0,14	0,04	0,14	0,60	
Preference Fn.	Linear	Linear	Linear	Linear	Linear	Linear	
Thresholds	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute	
- Q: Indifference	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	
- P: Preference	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	
- S: Gaussian	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	
Statistics							
Minimum	993,00	126,30	834106,00	146,20	202196,00	512,51	
Maximum	8040,00	596,10	1751044,00	402,00	390196,00	23254,59	
Average	3759,75	310,75	1205061,50	267,98	296196,00	9352,16	
Standard Dev.	2701,36	180,09	352952,79	100,34	94000,00	9156,73	
Evaluations							
<input checked="" type="checkbox"/>	EN. 1	4020,00	328,10	963794,00	201,00	202196,00	11877,92
<input checked="" type="checkbox"/>	EN. 2	8040,00	596,10	1751044,00	402,00	390196,00	23254,59
<input checked="" type="checkbox"/>	EN. 3	993,00	126,30	834106,00	322,70	202196,00	512,51
<input checked="" type="checkbox"/>	EN. 4	1986,00	192,50	1271302,00	146,20	390196,00	1763,60

Σχήμα 4.13: Αρχείο εισόδου B_Σενάριο_ Περιβαλλοντική προτίμηση.

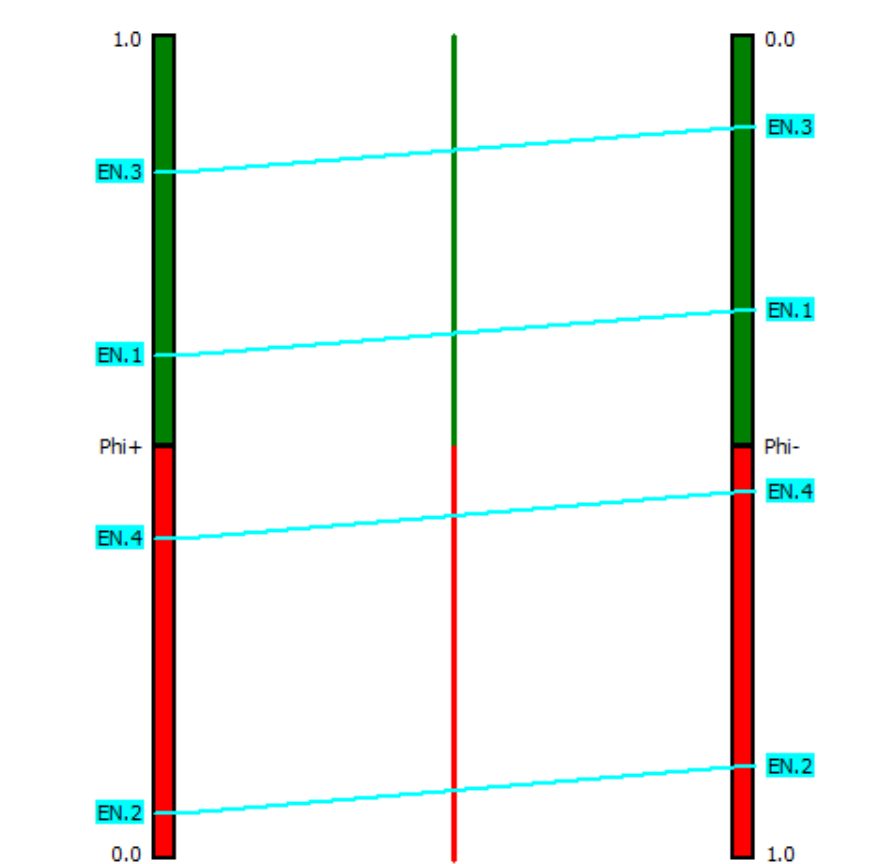
	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Scenario2	Απόσταση	Χρόνος	Έξοδα ναύλων	Κατανάλωση...	Κόστη Λιμένων	ΕΕΟΙ
Unit	nm	hrs	€	tn	€	
Cluster/Group	◆	◆	◆	◆	◆	◆
Preferences						
Min/Max	min	min	min	min	min	min
Weight	0,04	0,04	0,40	0,04	0,40	0,12
Preference Fn.	Linear	Linear	Linear	Linear	Linear	Linear
Thresholds	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute
- Q: Indifference	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
- P: Preference	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00
- S: Gaussian	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
Statistics						
Minimum	993,00	126,30	834106,00	146,20	202196,00	512,51
Maximum	8040,00	596,10	1751044,00	402,00	390196,00	23254,59
Average	3759,75	310,75	1205061,50	267,98	296196,00	9352,16
Standard Dev.	2701,36	180,09	352952,79	100,34	94000,00	9156,73
Evaluations						
<input checked="" type="checkbox"/> EN.1	4020,00	328,10	963794,00	201,00	202196,00	11877,92
<input checked="" type="checkbox"/> EN.2	8040,00	596,10	1751044,00	402,00	390196,00	23254,59
<input checked="" type="checkbox"/> EN.3	993,00	126,30	834106,00	322,70	202196,00	512,51
<input checked="" type="checkbox"/> EN.4	1986,00	192,50	1271302,00	146,20	390196,00	1763,60

Σχήμα 4.14: Αρχείο εισόδου Β_Σενάριο_ Οικονομική προτίμηση.

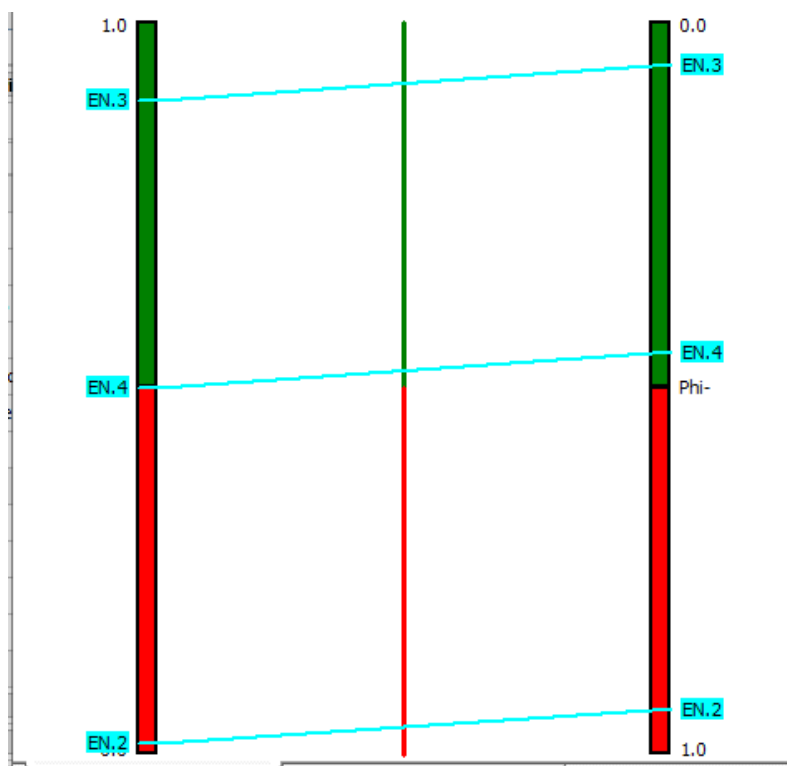
4.3. Αποτελέσματα & Σχολιασμός

Με βάση όλα τα παραπάνω και χρήση του λογισμικού Visual PROMETHEE Academic προέκυψαν τα αποτελέσματα για τα 2 σενάρια που υποτέθηκαν εξαρχής.

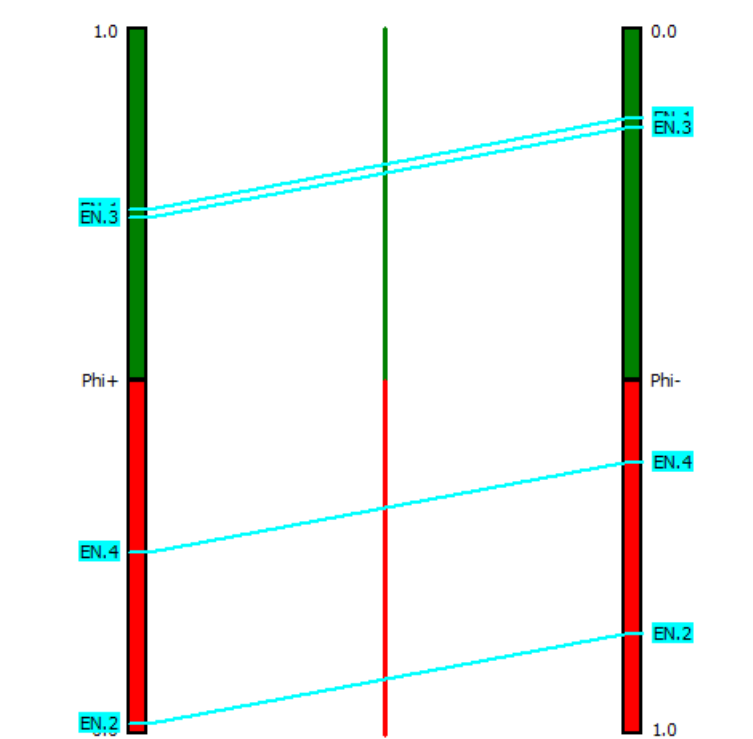
A-Σενάριο:



Σχήμα 4.15: Κατάταξη εναλλακτικών A Σενάριο-Ουδέτερη προτίμηση.



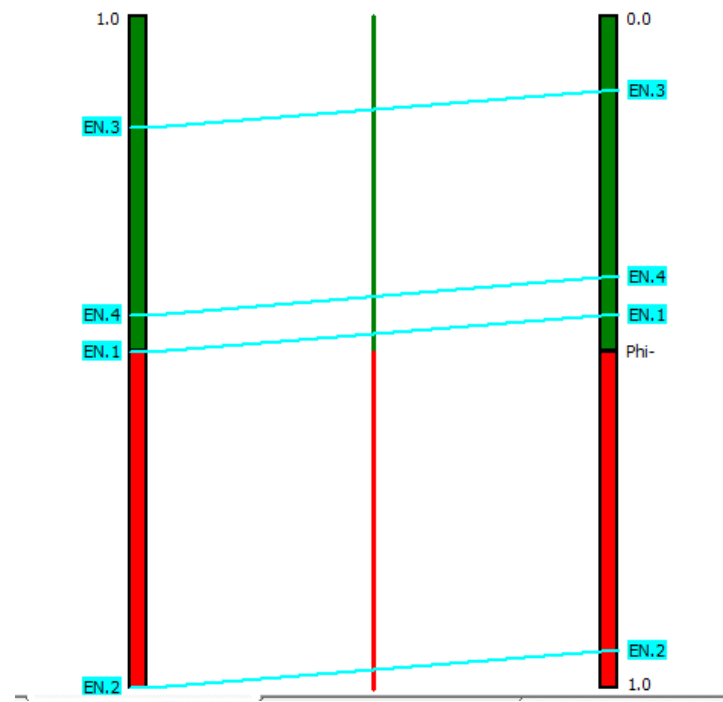
Σχήμα 4.16: Κατάταξη εναλλακτικών Α Σενάριο-Περιβαλλοντική προτίμηση.



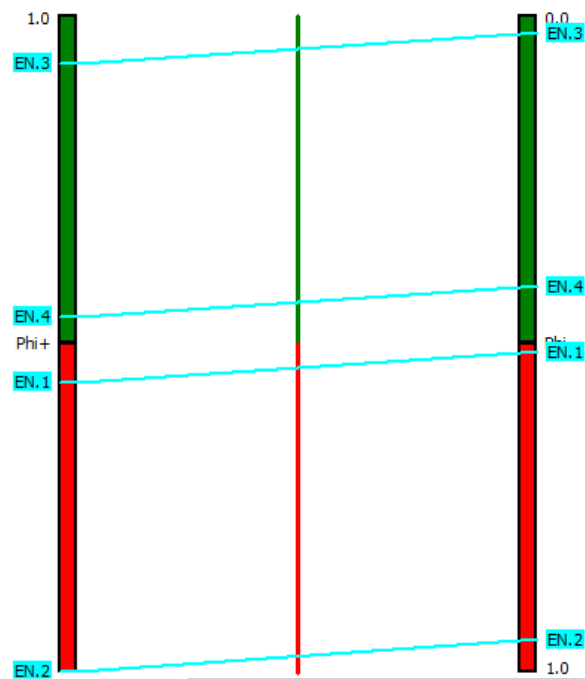
Σχήμα 4.17: Κατάταξη εναλλακτικών Α Σενάριο-Οικονομική προτίμηση.

Όπως φαίνεται παραπάνω σχετικά με τα αποτελέσματα του Α Σεναρίου μπορούμε να συμπεράνουμε τα εξής. Στην περίπτωση που δεν δόθηκε κάποια προτίμηση σε οποιοδήποτε κριτήριο παρατηρείται ότι η καλύτερη ξεκάθαρα εναλλακτική είναι η 3^η, δηλαδή κυκλικό δρομολόγιο με tanker χωρητικότητας 100000m³ που θα τροφοδοτεί τα νησιά με ποσότητα ώστε να καλύπτουν τις ενεργειακές τους ανάγκες για έναν μήνα. Δεύτερη ακολουθεί η 1^η εναλλακτική, δηλαδή η τροφοδοσία και πάλι των νησιών με φορτίο για έναν μήνα αλλά σε ξεχωριστά δρομολόγια αυτή την φορά με 2 μεγέθη tanker, 15000m³ και 30000m³. Τρίτη σε προτίμηση έρχεται η 4^η εναλλακτική δηλαδή αυτή του κυκλικού δρομολόγιου με τις μισές ποσότητες και χρήση tanker χωρητικότητας 75000m³. Χειρότερη με διαφορά εναλλακτική αποτελεί η 2^η, η οποία χρησιμοποιεί tanker χωρητικότητας 15000m³ και μεταφέρονται ποσότητες για 15ημέρες σε κάθε νησί. Παρόμοια εικόνα παρουσιάζουν και τα αποτελέσματα στην περίπτωση που δόθηκε βάρος στα περιβαλλοντικά κριτήρια, με την μόνη διαφορά να εντοπίζεται στο γεγονός ότι στην δεύτερη θέση παρουσιάζονται ως εξίσου καλές εναλλακτικές η 1^η και η 4^η, κάτι αναμενόμενο καθώς ο περιβαλλοντικός δείκτης της 4^{ης} είναι σαφώς καλύτερος, με αποτέλεσμα όταν δοθεί βαρύτητα στον ΕΕΟΙ να κερδίσει έδαφος η εναλλακτική. Στην τελευταία περίπτωση που δόθηκε έμφαση στα οικονομικά κριτήρια βλέπουμε ανατρέπεται η εικόνα και ως καλύτερη εναλλακτική παρουσιάζεται η 1^η με μικρή διαφορά από την 3^η, και αυτό οφείλεται στο υψηλό κόστος ναύλωσης των μεγάλων tanker. Τέλος, ακολουθούν οι 4^η και 2^η εναλλακτική με αρκετή διαφορά. Συνολικά, για το Α σενάριο καταλαβαίνουμε πως στην πλειοψηφία των περιπτώσεων η προτιμότερη εναλλακτική είναι η 3^η, με εξαίρεση την περίπτωση έμφασης στα οικονομικά κριτήρια, ενώ χειρότερη η 2^η σε όλο το πλήθος των περιπτώσεων.

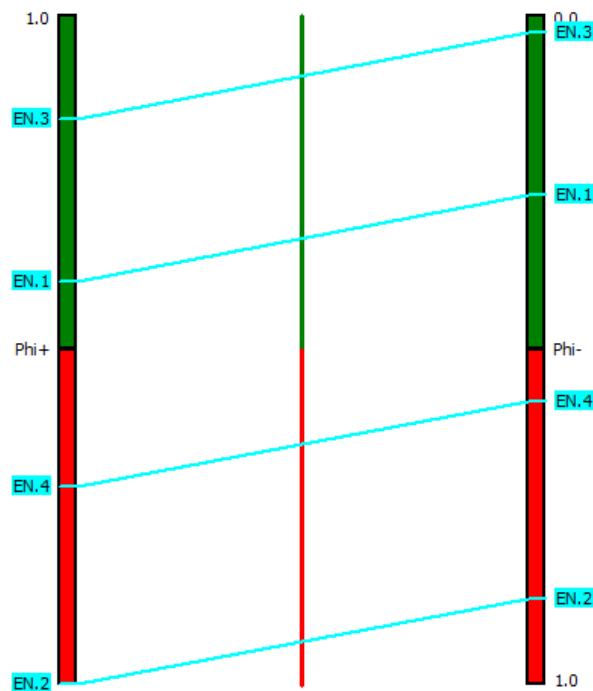
B-Σενάριο:



Σχήμα 4.18: Κατάταξη εναλλακτικών B Σενάριο-Ουδέτερη προτίμηση.



Σχήμα 4.19: Κατάταξη εναλλακτικών B Σενάριο-Περιβαλλοντική προτίμηση.



Σχήμα 4.20: Κατάταξη εναλλακτικών Α Σενάριο-Οικονομική προτίμηση.

Όπως φαίνεται παραπάνω σχετικά με τα αποτελέσματα του Β Σεναρίου μπορούμε να συμπεράνουμε τα εξής. Στην περίπτωση που δεν δόθηκε κάποια προτίμηση σε οποιοδήποτε κριτήριο παρατηρείται ότι η καλύτερη ξεκάθαρα εναλλακτική είναι η 3^η, δηλαδή κυκλικό δρομολόγιο με tanker χωρητικότητας 75000m³ που θα τροφοδοτεί τα νησιά με ποσότητα ώστε να καλύπτουν τις ενεργειακές τους ανάγκες για έναν μήνα. Δεύτερη ακολουθεί η 4^η εναλλακτική, δηλαδή αυτή του κυκλικού δρομολόγιου με τις μισές ποσότητες και χρήση tanker χωρητικότητας 30000m³. Τρίτη σε προτίμηση έρχεται η 1^η εναλλακτική δηλαδή η τροφοδοσία και πάλι των νησιών με φορτίο για έναν μήνα αλλά σε ξεχωριστά δρομολόγια αυτή την φορά με tanker 15000m³. Χειρότερη με διαφορά εναλλακτική αποτελεί η 2^η, η οποία χρησιμοποιεί tanker χωρητικότητας 15000m³ και μεταφέρονται ποσότητες για 15ημέρες σε κάθε νησί. Σε σχέση με την αντίστοιχη περίπτωση του Α σεναρίου παρατηρείται διαφορά στην δεύτερη και τρίτη θέση, και

συγκεκριμένα έχουμε αντιμετάθεση των εναλλακτικών, αφού τώρα στη δεύτερη θέση κατατάσσεται η 4^η εναλλακτική. Αυτό εξηγείται από το γεγονός ότι στο Β Σενάριο με την μεγαλύτερη διείσδυση των ΑΠΕ οι μεταφερόμενες ποσότητες είναι μικρές και συνεπακόλουθα απαιτούνται δεξαμενόπλοια μικρότερης χωρητικότητας και χαμηλότερου κόστους, σε σχέση με το Α σενάριο που στα οικονομικά κριτήρια υστερούσαν τα κυκλικά δρομολόγια. Παρόμοια εικόνα παρουσιάζουν και τα αποτελέσματα στην περίπτωση που δόθηκε βάρος στα περιβαλλοντικά κριτήρια, όπου και πάλι η κατάταξη παραμένει ίδια. Στην τελευταία περίπτωση που δόθηκε έμφαση στα οικονομικά κριτήρια βλέπουμε ανατρέπεται η εικόνα καθώς στην δεύτερη θέση πλέον βρίσκεται η 1^η εναλλακτική, κάτι που δικαιολογείται από το χαμηλότερο κόστος ναύλωσης που στην συγκεκριμένη περίπτωση παίζει κυρίαρχο ρόλο. Συνολικά, για το Α σενάριο καταλαβαίνουμε πως στο σύνολο των περιπτώσεων η προτιμότερη εναλλακτική είναι η 3^η, ενώ χειρότερη η 2^η. Οι ενδιάμεσες θέσεις ποικίλουν ανάλογα με την εφαρμογή βαρύτητας στα διάφορα κριτήρια.

4.4. Ανάλυση Ευαισθησίας

Σαν τελευταίο κομμάτι της βελτιστοποίησης αποφασίστηκε να γίνει μια ανάλυση ευαισθησίας της εφοδιαστικής αλυσίδας. Ειδικότερα, αυτό που πρόκειται να μελετηθεί είναι ο τρόπος συμπεριφοράς της αλυσίδας όσον αφορά τις διαθέσιμες επιλογές, ως προς ενδεχόμενες αλλαγές σε στοιχεία που την χαρακτηρίζουν. Τα κριτήρια που θα διαφοροποιηθούν θα είναι αυτά που έχουν οικονομικό χαρακτήρα, δηλαδή το C3- Έξοδα Ναύλων και το C5 τα λειτουργικά έξοδα των λιμένων.

Για το κριτήριο που αφορά το κόστος ναύλωσης των δεξαμενόπλοιων, στο προηγούμενο μέρος θεωρήθηκε ότι θα είναι 2.5 φορές από το αντίστοιχο κόστος του LNG. Σε αυτή την περίπτωση θα θεωρηθούν πιο δυσμενείς οικονομικές συνθήκες, συνεπώς το κόστος θα είναι 3.5 μεγαλύτερο από του LNG. Επίσης, ισχύει αύξηση της τάξεως του 10% στα λειτουργικά έξοδα των λιμένων.

Οι διαφοροποιημένες τιμές των κριτηρίων για τα 2 βασικά σενάρια παρουσιάζονται συγκεντρωτικά στους πίνακες 4.19 και 4.20.

ΚΡΙΤΗΡΙΑ	ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΗ 1	ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΗ 2	ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΗ 3	ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΗ 4
C1-ΑΠΟΣΤΑΣΗ (nm)	4020	8040	993	1986
C2-ΧΡΟΝΟΣ (hrs)	346,6	614,6	144,8	211,0
C3-ΕΞΟΔΑ ΝΑΥΛΩΝ (€)	1.577.390 €	2.527.543 €	1.640.765 €	1.950.871 €
C4-ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ ΚΑΥΣΙΜΟΥ (tn)	228,34	402,0	375,1	645,5
C5-ΚΟΣΤΟΣ ΛΙΜΕΝΩΝ (€)	224.468 €	431.268 €	224.468 €	431.268 €
C6-ΕΕΟΙ	7.918,68	15503,2	341,7	1175,7

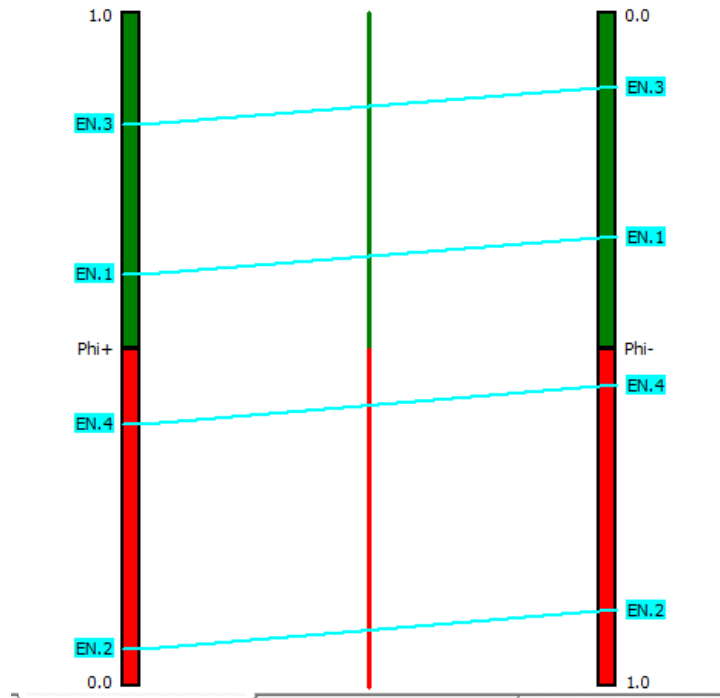
Πίνακας 4.19 Συγκεντρωτικές τιμές κριτηρίων-Α-Σενάριο_Ανάλυση Ευαισθησίας

ΚΡΙΤΗΡΙΑ	ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΗ 1	ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΗ 2	ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΗ 3	ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΗ 4
C1-ΑΠΟΣΤΑΣΗ (nm)	4020	8040	993	1986
C2-ΧΡΟΝΟΣ (hrs)	328,1	596,1	126,3	192,5
C3-ΕΞΟΔΑ ΝΑΥΛΩΝ (€)	1.349.311 €	2.451.461 €	1.167.749 €	1.779.823 €
C4-ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ ΚΑΥΣΙΜΟΥ (tn)	201,00	402,0	322,7	146,2
C5-ΚΟΣΤΟΣ ΛΙΜΕΝΩΝ (€)	220.996 €	427.796 €	220.996 €	427.796 €
C6-ΕΕΟΙ	11.877,92	23.254,59	512,51	1763,6

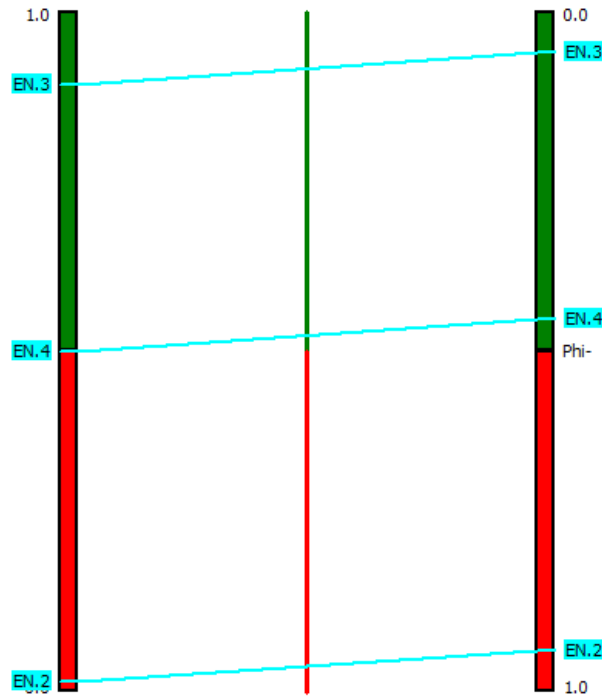
Πίνακας 4.20 Συγκεντρωτικές τιμές κριτηρίων-Β-Σενάριο_Ανάλυση Ευαισθησίας

Αφού υπολογίστηκαν τα ανανεωμένα στοιχεία για κάθε εναλλακτική, πραγματοποιήθηκε η σύγκρισή τους όπως και προηγουμένως για τις 3 διαφορετικές κατανομές της βαρύτητας των κριτηρίων. Ακολουθούν τα αποτελέσματα:

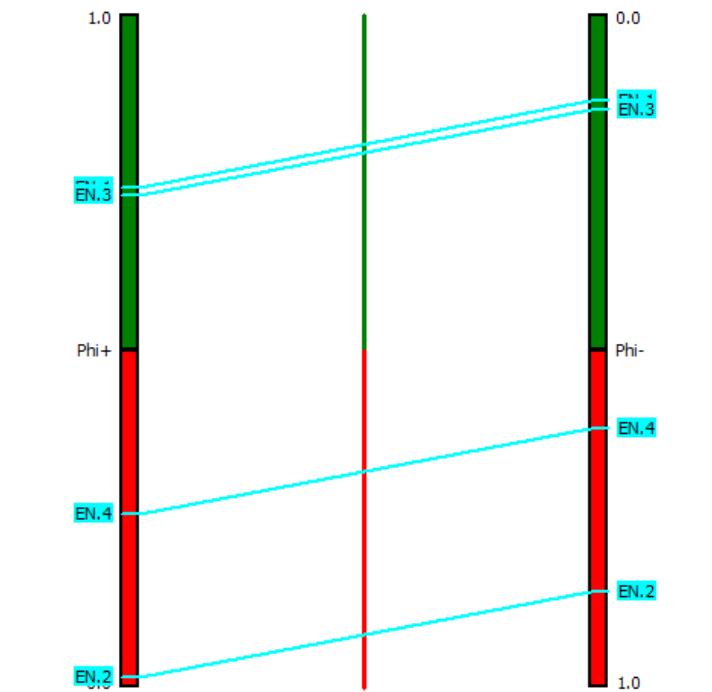
A-Σενάριο:



Σχήμα 4.21: Κατάταξη εναλλακτικών Α Σενάριο-Ουδέτερη προτίμηση_ Ανάλυση Ευαισθησίας.



Σχήμα 4.22: Κατάταξη εναλλακτικών Α Σενάριο-Περιβαλλοντική προτίμηση_ Ανάλυση Ευαισθησίας.

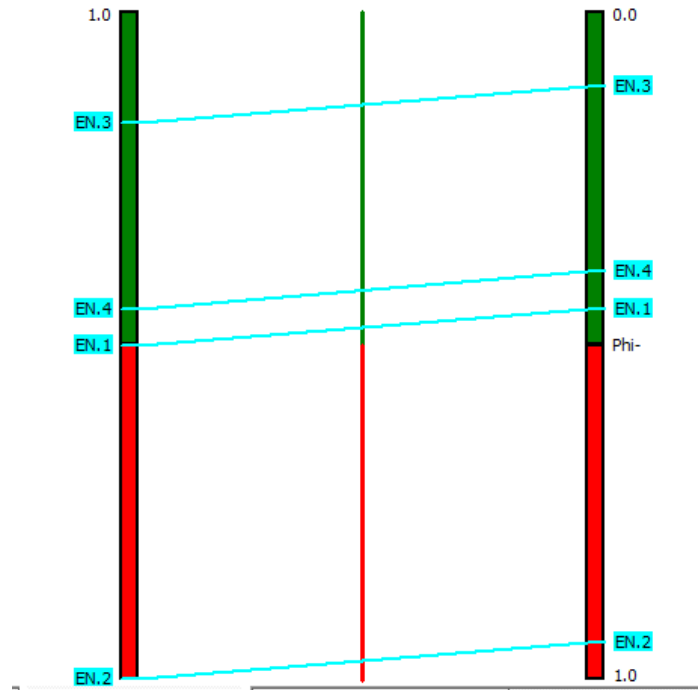


Σχήμα 4.23: Κατάταξη εναλλακτικών Α Σενάριο-Οικονομική προτίμηση_ Ανάλυση Ευαισθησίας.

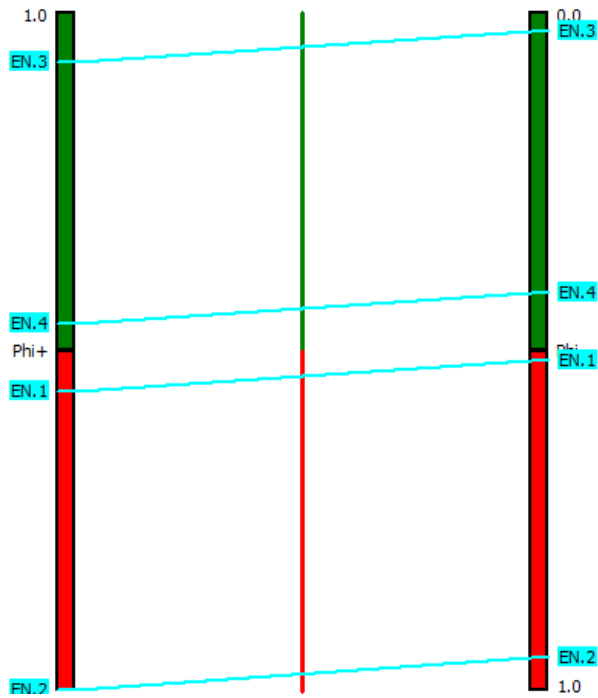
Όπως φαίνεται παραπάνω σχετικά με τα αποτελέσματα του Α Σεναρίου στην περίπτωση της ανάλυσης ευαισθησίας μπορούμε να συμπεράνουμε τα εξής. Στην περίπτωση που δεν δόθηκε κάποια προτίμηση σε οποιοδήποτε κριτήριο παρατηρείται ότι η καλύτερη ξεκάθαρα εναλλακτική εξακολουθεί να είναι η 3^η, δηλαδή κυκλικό δρομολόγιο με tanker χωρητικότητας 100000m³ που θα τροφοδοτεί τα νησιά με ποσότητα ώστε να καλύπτουν τις ενεργειακές τους ανάγκες για έναν μήνα. Δεύτερη ακολουθεί η 1^η εναλλακτική, δηλαδή η τροφοδοσία και πάλι των νησιών με φορτίο για έναν μήνα αλλά σε ξεχωριστά δρομολόγια αυτή την φορά με 2 μεγέθη tanker, 15000m³ και 30000m³. Τρίτη σε προτίμηση έρχεται η 4^η εναλλακτική δηλαδή αυτή του κυκλικού δρομολόγιου με τις μισές ποσότητες και χρήση tanker χωρητικότητας 75000m³. Χειρότερη με διαφορά εναλλακτική αποτελεί η 2^η, η οποία χρησιμοποιεί tanker χωρητικότητας 15000m³ και μεταφέρονται ποσότητες για 15ημέρες σε κάθε νησί. Παρόμοια εικόνα παρουσιάζουν και τα αποτελέσματα στην περίπτωση που δόθηκε βάρος στα περιβαλλοντικά κριτήρια, με την μόνη διαφορά να εντοπίζεται στο

γεγονός ότι στην δεύτερη θέση παρουσιάζονται ως εξίσου καλές εναλλακτικές η 1^η και η 4^η, κάτι αναμενόμενο καθώς ο περιβαλλοντικός δείκτης της 4^{ης} είναι σαφώς καλύτερος, με αποτέλεσμα όταν δοθεί βαρύτητα στον ΕΕΟΙ να κερδίσει έδαφος η εναλλακτική. Στην τελευταία περίπτωση που δόθηκε έμφαση στα οικονομικά κριτήρια βλέπουμε πως όπως αναμενόταν η εικόνα διαφοροποιείται καθώς πλέον η 1^η και 3^η εναλλακτική προκύπτει ότι είναι εξίσου επιθυμητές, και αυτό οφείλεται στην διαφορά κόστους ναύλωσης των μεγάλων tanker σε σχέση με τα μικρότερα, που πλέον εξαιτίας της υπόθεσης για αύξηση των ναύλων είναι ακόμα πιο έντονη. Τέλος, ακολουθούν οι 4^η και 2^η εναλλακτική με αρκετή διαφορά. Συνολικά, για το Α σενάριο καταλαβαίνουμε πως στην πλειοψηφία των περιπτώσεων και για την ανάλυση ευαισθησίας η προτιμότερη εναλλακτική είναι η 3^η, με εξαίρεση την περίπτωση έμφασης στα οικονομικά κριτήρια, ενώ χειρότερη η 2^η σε όλο το πλήθος των περιπτώσεων.

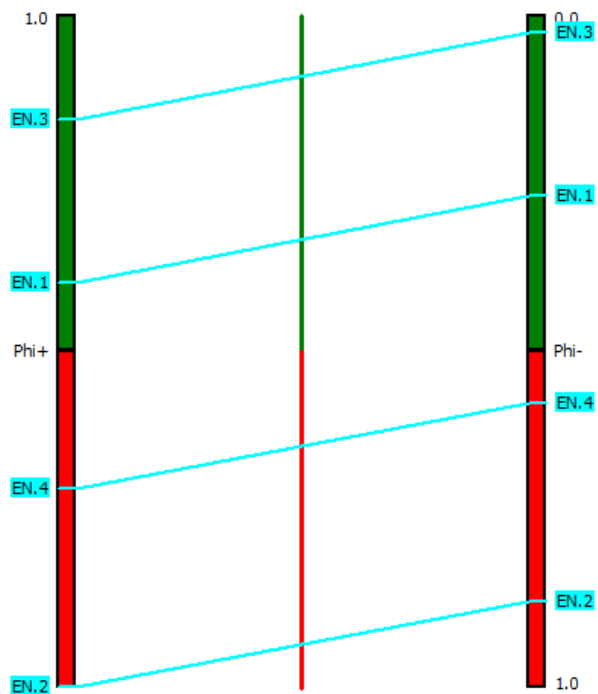
B-Σενάριο:



Σχήμα 4.24: Κατάταξη εναλλακτικών Β Σενάριο-Ουδέτερη προτίμηση_ Ανάλυση Ευαισθησίας.



Σχήμα 4.25: Κατάταξη εναλλακτικών Β Σενάριο-Περιβαλλοντική προτίμηση_ Ανάλυση Ευαισθησίας.



Σχήμα 4.25: Κατάταξη εναλλακτικών Β Σενάριο-Οικονομική προτίμηση_ Ανάλυση Ευαισθησίας.

Όπως φαίνεται παραπάνω σχετικά με τα αποτελέσματα του Β Σεναρίου στην περίπτωση της ανάλυσης ευαισθησίας μπορούμε να συμπεράνουμε τα εξής. Στην περίπτωση που δεν δόθηκε κάποια προτίμηση σε οποιοδήποτε κριτήριο παρατηρείται ότι η καλύτερη ξεκάθαρα εναλλακτική εξακολουθεί να είναι η 3^η, δηλαδή κυκλικό δρομολόγιο με tanker χωρητικότητας 75000m³ που θα τροφοδοτεί τα νησιά με ποσότητα ώστε να καλύπτουν τις ενεργειακές τους ανάγκες για έναν μήνα. Δεύτερη ακολουθεί η 4^η εναλλακτική, δηλαδή αυτή του κυκλικού δρομολόγιου με τις μισές ποσότητες και χρήση tanker χωρητικότητας 30000m³. Τρίτη σε προτίμηση έρχεται η 1^η εναλλακτική δηλαδή η τροφοδοσία και πάλι των νησιών με φορτίο για έναν μήνα αλλά σε ξεχωριστά δρομολόγια αυτή την φορά με tanker 15000m³. Χειρότερη με διαφορά εναλλακτική αποτελεί η 2^η, η οποία χρησιμοποιεί tanker χωρητικότητας 15000m³ και μεταφέρονται ποσότητες για 15ημέρες σε κάθε νησί. Σε σχέση με την αντίστοιχη περίπτωση του Α σεναρίου παρατηρείται διαφορά στην δεύτερη και τρίτη θέση, και συγκεκριμένα έχουμε αντιμετάθεση των εναλλακτικών, αφού τώρα στη δεύτερη θέση κατατάσσεται η 4^η εναλλακτική. Αυτό εξηγείται από το γεγονός ότι στο Β Σενάριο με την μεγαλύτερη διείσδυση των ΑΠΕ οι μεταφερόμενες ποσότητες είναι μικρές και συνεπακόλουθα απαιτούνται δεξαμενόπλοια μικρότερης χωρητικότητας και χαμηλότερου κόστους, σε σχέση με το Α σενάριο που στα οικονομικά κριτήρια υστερούσαν τα κυκλικά δρομολόγια. Παρόμοια εικόνα παρουσιάζουν και τα αποτελέσματα στην περίπτωση που δόθηκε βάρος στα περιβαλλοντικά κριτήρια, όπου και πάλι η κατάταξη παραμένει ίδια. Στην τελευταία περίπτωση που δόθηκε έμφαση στα οικονομικά κριτήρια βλέπουμε ανατρέπεται η εικόνα καθώς στην δεύτερη θέση πλέον βρίσκεται η 1^η εναλλακτική, κάτι που δικαιολογείται στην διαφορά κόστους ναύλωσης των μεγάλων tanker σε σχέση με τα μικρότερα, που πλέον εξαιτίας της υπόθεσης για αύξηση των ναύλων είναι ακόμα πιο έντονη. Συνολικά, για το Α σενάριο καταλαβαίνουμε πως στο σύνολο των περιπτώσεων και στην ανάλυση ευαισθησίας η προτιμότερη εναλλακτική είναι η 3^η, ενώ χειρότερη η 2^η. Οι ενδιάμεσες θέσεις ποικίλουν ανάλογα με την εφαρμογή βαρύτητας στα διάφορα κριτήρια.

5. Συμπεράσματα

Το υδρογόνο προς το παρόν βρίσκεται σε πολύ βασικά στάδια ανάπτυξης, καθώς οι τεχνολογίες που το υποστηρίζουν δεν έχουν φτάσει ακόμα στο επιθυμητό επίπεδο ωριμότητας. Θα χρειαστεί να ξεπεραστούν τεχνικές δυσκολίες που αφορούν όλη την εφοδιαστική αλυσίδα του υδρογόνου, από την παραγωγή, στην αποθήκευση, την μεταφορά και την τελική εκμετάλλευσή του, ενώ παράλληλα απαιτείται παράλληλα με την εξέλιξη της τεχνολογίας να γίνει και οικονομικά πιο προσιτό. Ωστόσο, παρόλες τις δυσκολίες το υδρογόνο δεν παύει να αποτελεί μια ελπιδοφόρα εναλλακτική καυσίμου, ικανή να οδηγήσει την ανθρωπότητα στην ενεργειακή μετάβαση και να συμβάλει στην απαλλαγή από τους ρύπους του άνθρακα, όπως αυτή έχει κριθεί αναγκαία σταδιακά μέχρι το 2050. Ειδικότερα, αναμένεται να διαδραματίσει σημαντικό ρόλο σε πολλές πτυχές του παγκόσμιου ενεργειακού συστήματος, όπως στην αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας, στις μεταφορές αλλά και στην παραγωγή ισχύος.

Στην παρούσα εργασία έγινε μια προσπάθεια να δημιουργηθεί μια εφοδιαστική αλυσίδα υδρογόνου στην Ελλάδα, προκειμένου να καλύψει ελλείμματα από τις ΑΠΕ στις ενεργειακές απαιτήσεις μη διασυνδεδεμένων νήσων, είτε για ηλεκτροπαραγωγή είτε ως καύσιμο σε μεταφορικά μέσα. Τόσο η μεταφορά όσο και η διανομή του υδρογόνου θεωρήθηκε ότι γίνεται σε υγροποιημένη μορφή. Πολλά δεδομένα ήταν αναγκαία να υποθεθούν καθώς δεν πρόκειται για μια εφοδιαστική αλυσίδα που έχει εξελιχθεί παρά μόνο σε λίγες περιπτώσεις ανά τον κόσμο. Το γενικό συμπέρασμα που προκύπτει μετά από την βελτιστοποίηση της εφοδιαστικής αλυσίδας, είναι πως κατά κύριο λόγο η βέλτιστη λύση για την μεταφορά και διανομή του υγροποιημένου υδρογόνου στα νησιά είναι τα κυκλικά δρομολόγια μεταφέροντας όσο το δυνατόν μεγαλύτερες ποσότητες, και ειδικά στην περίπτωση μας για την κάλυψη ενεργειακών αναγκών ενός μήνα. Ξεχωριστά δρομολόγια για κάθε νησί μπορεί ανά περιπτώσεις να είναι πιο συμφέροντα από οικονομική άποψη, ωστόσο το αποτύπωμα τους στην ατμόσφαιρα κρίνεται ιδιαίτερα αρνητικό.

Με βάση την παρούσα εργασία θα μπορούσε να μελετηθεί και ο σχεδιασμός μιας εφοδιαστικής αλυσίδας για χερσαίες μεταφορές υγροποιημένου υδρογόνου για την ηπειρωτική Ελλάδα, όπως επίσης και η ενδεχόμενη τροποποίηση του δικτύου φυσικού αερίου της χώρας για διανομή υδρογόνου.

Βιβλιογραφία

- 1) Ανακοίνωση της επιτροπής προς το Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο “Καθαρός πλανήτης για όλους Ένα ευρωπαϊκό, στρατηγικό, μακρόπνοο όραμα για μια ευημερούσα, σύγχρονη, ανταγωνιστική και κλιματικά ουδέτερη οικονομία”, Βρυξέλλες 28.11.2018.
- 2) Richard S. J. Tol, “Europe’s Climate Target for 2050: An Assessment”
- 3) Tsiko D., Papadimitriou C. N. , Psomopoulos C.S., Papadopoulos P. “Study and Analysis on EVs penetration scenarios based in prognostic tools.”
- 4) EU hydrogen policy “Hydrogen as an energy carrier for a climate-neutral economy”
- 5) Eurostat (2020). Greenhouse gas emission statistics – emission inventories.
- 6) European Environment Agency (2020) “Greenhouse gas emissions from transport in Europe”
- 7) European Commission (2017). “Statistical pocketbook.”
- 8) European Commission, Communication “A Renovation Wave for Europe.”
- 9) EHB “Analysing the future demand supply and transport of hydrogen”, June-2021 v3
- 10) Xianxian Xu, Quan Zhou, Dehai Yu “The future of hydrogen energy: Bio-hydrogen production technology”
- 11) Richa Kothari, D. Buddhi, R.L. Sawhney, “Comparison of environmental and economic aspects of various hydrogen production methods”, Thermal Energy Storage Laboratory, School of Energy & Environmental Studies, Faculty of Engineering Sciences, Devi Ahilya University, India 15 June 2006
- 12) Christophe Coutanceau, Stève Baranton, Thomas Audichon “*Hydrogen Electrochemical Production, Alkaline Water Electrolysis The electrolyte of alkaline water electrolysis systems is an aqueous solution of potassium or sodium hydroxide.*”, 2018
- 13) J.D. Holladay, J. Hu, D.L. King, Y. Wang “An overview of hydrogen production technologies”

- 14) Pavlos Nikolaidis, Andreas Poulikkas "A comparative overview of hydrogen production processes"
- 15) Γεώργιος Μαρνέλλος, "Ειδικά Κεφάλαια Παραγωγής Ενέργειας", Πανεπιστήμιο Δυτικής Μακεδονίας
- 16) Schlapbach L, Zuttel A. "Hydrogen-storage materials for mobile applications." *Nature* 2001
- 17) Valenti G. "Hydrogen liquefaction and liquid hydrogen storage. In: Compendium of hydrogen energy." Elsevier; 2015
- 18) Joakim Andersson*, Stefan Gronkvist "Large-scale storage of hydrogen", Division of Energy Processes, KTH Royal Institute of Technology
- 19) Xia YD, Yang ZX, Zhu YQ. "Porous carbon-based materials for hydrogen storage: advancement and challenges."
- 20) Blankenship TS, Mokaya R. "Cigarette butt-derived carbons have ultra-high surface area and unprecedented hydrogen storage capacity." *Energy Environ Sci* 2017;10(12):2552e62.
- 21) Klerke A, et al. "Ammonia for hydrogen storage: challenges and opportunities." *J Mater Chem* 2008;18(20):2304e10.
- 22) Cheddie D. "Ammonia as a hydrogen source for fuel cells: a review." In: Minic D, editor. *Hydrogen energy – challenges and perspectives*. Rijeka: InTech; 2012. Ch. 13.
- 23) Mukherjee S, et al. "Low-temperature ammonia decomposition catalysts for hydrogen generation." *Appl Catal B Environ* 2018;226:162e81.
- 24) Grasemann M, Laurency G. "Formic acid as a hydrogen source - recent developments and future trends." *Energy Environ Sci* 2012;5(8):8171e81.
- 25) Sponholz P, et al. "Towards a practical setup for hydrogen production from formic acid." *ChemSusChem* 2013;6(7):1172e6.
- 26) DNV, "HANDBOOK FOR HYDROGEN-FUELLED VESSELS," MarHySafe JDP Phase 1,1st Edition (2021-06)

- 27) ABS, "Guide for Fuel Cell Power Systems for Marine and Offshore Applications"
November 2019
- 28) Alkhaledi ,Suresh Sampath , Pericles Pilidis "Propulsion of a hydrogen-fuelled LH2 tanker ship" ,Thermal Power & Propulsion Engineering, Cranfield University,
- 29) Hui Xing et al. "Cell Power Systems for Maritime Applications: Progress and Perspectives"
- 30) Χ. ΔΟΥΚΑΣ, Ι. ΨΑΡΡΑΣ, "Πολυκριτηριακά Συστήματα Υποστήριξης Αποφάσεων", ΕΣΑΔ ΕΜΠ
- 31) Salvatore Greco "*Multiple Criteria Decision Analysis State of the Art Surveys*"
- 32) Charles Johnston et al. "Shipping the sunshine: An open-source model forcosting renewable hydrogen transport from Australia "
- 33) Kawasaki "Technical review-Special issue on hydrogen supply chain." No.182,February 2021
- 34) Xianxian Xu et al. "The future of hydrogen energy: Bio-hydrogen production technology"
- 35) IOANNIS D. SPYROU "DESIGN STUDY OF A STAND-ALONE HYDROGEN PRODUCTION SYSTEM POWERED BY PHOTOVOLTAICS AND ASSISTED BY BATTERIES WITH THE AIM OF ELECTROLYSER SUSTAINABLE OPERATION"
- 36) The World of Hydrogen. "What is hydrogen and how is it made?", 11-May-2021
- 37) Vanessa Tietze, et al. "Bulk Storage Vessels for Compressed and Liquid Hydrogen"
- 38) Sustainability Whitepaper ABS, "Hydrogen as marine fuel" , June 2021
- 39) Eleni Strantzali, " Intergrated decision support methodology for energy planning in decentralized regions"

Παράρτημα

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται οι ποσότητες ηλεκτρικής ενέργειας σε MWh για κάθε νησί όπως προέκυψαν από τα μηνιαία δελτία παραγωγής για τα μη διασυνδεδεμένα νησιά από τον ΑΔΜΗΕ. Φαίνονται οι ποσότητες για συμμετοχή 40% και 60% ΑΠΕ.

	40% ΑΠΕ	60% ΑΠΕ
ΚΡΗΤΗ	361.200	240.800
ΡΟΔΟΣ	382.541	255.027
ΛΕΣΒΟΣ	173.934	115.956
ΚΑΛΥΜΝΟΣ	189.200	126.133
ΛΗΜΝΟΣ	35.137	23.425
ΧΙΟΣ	120.547	80.364
ΣΑΜΟΣ	76.093	50.729
ΚΑΡΠΑΘΟΣ	19.376	12.917

Πίνακας 1: Απαιτούμενη ποσότητα ηλεκτρικής ενέργειας για κάθε σενάριο

Οι παραπάνω ποσότητες θα παραχθούν από υδρογόνο στις μονάδες του εκάστοτε νησιού.

Ο υπολογισμός έγινε με βάση τον εξής τύπο:

$$LH_2 \text{ consumption} = \frac{Electricity \text{ Prod}_{(8000hrs)} * Heat \text{ Rate}}{LHV_{H_2}}$$

Όπου :

- Heat rate = 6981kJ/kWh (Turbine: Siemens SGT-600)
- LHV= 141.7 MJ/kg
- Density_{LH2}= 71kg/m³

	1/20	2/20	3/20	4/20	5/20	6/20	7/20	8/20	9/20	10/20	11/20	12/20	ΣΥΝΟΛΟ
ΚΡΗΤΗ	202.167	175.538	159.321	135.299	142.603	152.529	196.019	229.262	204.625	197.502	157.012	182.576	2.134.453
ΡΟΔΟΣ	48.154	44.134	38.272	30.107	30.238	30.598	54.308	68.965	65.109	53.450	32.668	41.089	537.093
ΛΕΣΒΟΣ	26.131	22.310	20.593	16.884	16.197	17.230	21.621	23.066	18.685	16.771	17.296	21.311	238.094
ΚΑΛΥΜΝΟΣ	22.487	19.777	18.251	14.602	14.754	17.121	29.109	35.095	32.359	26.849	15.699	18.926	265.029
ΛΗΜΝΟΣ	5.150	4.176	4.053	3.962	3.195	3.583	4.617	5.640	4.046	3.493	3.678	4.151	49.744
ΧΙΟΣ	19.779	16.557	15.083	11.843	10.810	12.259	16.373	17.263	14.069	12.548	13.207	16.055	175.846
ΣΑΜΟΣ	10.406	9.260	8.798	6.871	6.437	7.097	8.236	9.043	8.295	7.539	6.743	8.435	97.160
ΚΑΡΠΑΘΟΣ	2.443	2.048	2.020	1.688	1.691	1.864	2.706	3.529	2.839	2.181	1.983	2.435	27.428

Πίνακας 2: Μηνιαία Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας από Μονάδες Παραγωγής (MWh)-Μηνιαία Δελτία Παραγωγής ΑΔΜΗΕ 2020

	1/20	2/20	3/20	4/20	5/20	6/20	7/20	8/20	9/20	10/20	11/20	12/20	ΣΥΝΟΛΟ
ΚΡΗΤΗ	61.635	51.535	51.943	47.309	43.570	47.783	79.934	78.105	59.865	31.811	51.976	45.714	651.181
ΡΟΔΟΣ	7.501	7.171	7.630	5.222	5.738	7.423	15.448	15.403	11.822	7.525	4.796	4.795	100.474
ΛΕΣΒΟΣ	4.913	4.792	4.688	4.804	3.417	3.396	5.499	4.375	3.816	2.742	4.594	4.758	51.795
ΚΑΛΥΜΝΟΣ	5.074	4.491	4.322	3.066	3.118	3.469	6.111	6.194	4.295	2.853	3.583	3.728	50.304
ΛΗΜΝΟΣ	546	788	848	527	608	601	1.027	814	775	540	823	923	8.818
ΧΙΟΣ	2.349	2.131	2.205	2.074	1.785	1.591	2.649	2.634	2.012	1.317	2.184	2.135	25.065
ΣΑΜΟΣ	3.213	2.650	2.213	2.052	1.812	1.647	3.791	3.525	2.475	1.309	2.376	2.599	29.661
ΚΑΡΠΑΘΟΣ	511	451	445	439	356	340	603	485	410	240	303	284	4.865

Πίνακας 3: Μηνιαία Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας από ΑΠΕ (MWh)-Μηνιαία Δελτία Παραγωγής ΑΔΜΗΕ 2020

Α Σενάριο:

Υπολογισμός χρόνου

	ΑΠΟΣΤΑΣΗ (nm)	ΠΟΣΟΤΗΤΑ (m ³)	ΧΡΟΝΟΣ ΤΑΞΙΔΙΟΥ(hrs)	ΧΡΟΝΟΣ ΦΟΡΤΩΜΑΤΟΣ(hrs)	ΧΡΟΝΟΣ ΕΚΦΟΡΤΩΜΑΤΟΣ(hrs)	ΣΥΝΟΛΟ (days)
ΣΑΜΟΣ	225	5.227,2	30,00	0,87	5,74	1,53
ΧΙΟΣ	215	8.280,9	28,67	1,38	6,76	1,53
ΛΕΣΒΟΣ	266	11.948,4	35,47	1,99	7,98	1,89
ΛΗΜΝΟΣ	215	2.413,7	28,67	0,40	4,80	1,41
ΚΡΗΤΗ	277	24.812,6	36,93	4,14	12,27	2,22
ΡΟΔΟΣ	302	26.278,6	40,27	4,38	12,76	2,39
ΚΑΛΥΜΝΟΣ	242	12.997,1	32,27	2,17	8,33	1,78
ΚΑΡΠΑΘΟΣ	268	1.331,0	35,73	0,22	4,44	1,68

Η ταχύτητα του πλοίου είναι 15 κόμβοι, και οι ρυθμοί φόρτωσης και εκφόρτωσης 6000m³/h και 3000m³/h αντίστοιχα.

Υπολογισμός κόστους ναύλωσης

-Για ξεχωριστά δρομολόγια

	ΣΥΝΟΛΟ (days)	Κόστος
ΣΑΜΟΣ	1,53	107.552 €
ΧΙΟΣ	1,53	108.121 €
ΛΕΣΒΟΣ	1,89	133.482 €
ΛΗΜΝΟΣ	1,41	99.503 €
ΚΡΗΤΗ	2,22	208.914 €
ΡΟΔΟΣ	2,39	224.840 €
ΚΑΛΥΜΝΟΣ	1,78	125.623 €
ΚΑΡΠΑΘΟΣ	1,68	118.672 €

Ενδεικτικά τα κόστη για τα tanker είναι:

Εναλλακτική 1: για tanker χωρητικότητας 30000m³ το κόστος για LH₂ είναι 94000€/day.

Εναλλακτική 2: για tanker χωρητικότητας 15000m³ το κόστος για LH₂ είναι 70500€/day.

Εναλλακτική 3: για tanker χωρητικότητας 10000m³ το κόστος για LH₂ είναι 194250€/day

Εναλλακτική 4: για tanker χωρητικότητας 75000m³ το κόστος για LH₂ είναι 158500€/day.

Υπολογισμός ΕΕΟΙ

Η αντιστοίχιση αριθμών νησιών είναι η εξής:

1. Εργοστάσιο Παραγωγής – Άγιοι Θεόδωροι
2. Σάμος
3. Χίος
4. Λέσβος
5. Λήμνος
6. Κρήτη – Αθερινόλακος
7. Ρόδος
8. Κάλυμνος
9. Κάρπαθος

Παρακάτω ακολουθεί ο υπολογισμός του ΕΕΟΙ για κάθε εναλλακτική βάσει του τύπου:

$$EEOI * 10^{-6} = \frac{\sum FC_j C_{Fj}}{m_{cargo} * D}$$

Όπου:

FC_j : η μάζα καυσίμου που καταναλώνεται

C_{Fj} : μια αδιάστατη τιμή που εκφράζει την σχέση ανάμεσα στα γραμμάρια καυσίμου που καταναλώνονται και στα γραμμάρια CO_2 που εκπέμπονται.

D : η απόσταση που διανύεται

m_{cargo} : το φορτίο που μεταφέρεται

Με $C_{Fj}=3.206$ για diesel-electric κινητήρα.

ΕΕΟΙ-ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΗ 1

	ΑΠΟΣΤΑΣΗ(nm)	ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ (tn)	ΦΟΡΤΙΟ(tn)	ΕΕΟΙ
1-->2	225	11,25	371,1	863,92
2-->1	225	11,25	0	
1-->3	215	10,75	587,95	545,29
3-->1	215	10,75	0	
1-->4	266	13,30	848,33	377,92
4-->1	266	13,30	0,00	
1-->5	215	10,75	171,37	1870,76
5-->1	215	10,75	0,00	
1-->6	277,00	20,39	1761,70	267,92
6-->1	277,00	20,39	0,00	
1-->7	302,00	22,23	1865,78	252,97
7-->1	302,00	22,23	0,00	
1-->8	242,00	12,10	922,79	347,42
8-->1	242,00	12,10	0,00	
1-->9	268,00	13,40	94,50	3392,48
9-->1	268,00	13,40	0,00	
			sum	7918,68

ΕΕΟΙ-ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΗ 2

	ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ			
	ΑΠΟΣΤΑΣΗ(nm)	(tn)	ΦΟΡΤΙΟ(tn)	ΕΕΟΙ
1-->2	225	11,25	185,55	1727,84
2-->1	225	11,25	0	
1-->3	215	10,75	293,97	1090,58
3-->1	215	10,75	0	
1-->4	266	13,30	424,17	755,83
4-->1	266	13,30	0,00	
1-->5	215	10,75	85,69	3741,51
5-->1	215	10,75	0,00	
1-->6	277,00	13,85	880,85	363,97
6-->1	277,00	13,85	0,00	
1-->7	302,00	15,10	932,89	343,66
7-->1	302,00	15,10	0,00	
1-->8	242,00	12,10	461,40	694,85
8-->1	242,00	12,10	0,00	
1-->9	268,00	13,40	47,25	6784,97
9-->1	268,00	13,40	0,00	

sum

15503,20

ΕΕΟΙ-ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΗ 3

	ΑΠΟΣΤΑΣΗ(nm)	ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ (tn)	ΦΟΡΤΙΟ(tn)	ΕΕΟΙ
1-->5	215	81,22	6.623,6	341,67
5-->4	94	35,51	6.452,2	
4-->3	60	22,67	5.603,8	
3-->2	56	21,16	5.015,9	
2-->8	63	23,80	4.644,8	
8-->7	87	32,87	3.722,0	
7-->9	79	29,84	1.856,2	
9-->6	62	23,42	1.761,7	
6-->1	277	104,64	0,0	
sum		375,13		

ΕΕΟΙ-ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΗ 4

	ΑΠΟΣΤΑΣΗ(nm)	ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ (tn)	ΦΟΡΤΙΟ(tn)	ΕΕΟΙ	
1-->5	215	69,88	3.311,8	587,87	1175,75 (επί 2 λγω διπλού δρομολόγιου)
5-->4	94	30,55	3.226,1		
4-->3	60	19,50	2.801,9		
3-->2	56	18,20	2.508,0		
2-->8	63	20,48	2.322,4		
8-->7	87	28,28	1.861,0		
7-->9	79	25,68	928,1		
9-->6	62	20,15	880,8		
6-->1	277	90,03	0,0		
sum		322,73			

Β Σενάριο:

Υπολογισμός χρόνου

	ΑΠΟΣΤΑΣΗ (nm)	ΠΟΣΟΤΗΤΑ (m ³)	ΧΡΟΝΟΣ ΤΑΞΙΔΙΟΥ(hrs)	ΧΡΟΝΟΣ ΦΟΡΤΩΜΑΤΟΣ(hrs)	ΧΡΟΝΟΣ ΕΚΦΟΡΤΩΜΑΤΟΣ(hrs)	ΣΥΝΟΛΟ (days)
ΣΑΜΟΣ	225	3.484,8	30,00	0,58	5,16	1,49
ΧΙΟΣ	215	5.520,6	28,67	0,92	5,84	1,48
ΛΕΣΒΟΣ	266	7.965,6	35,47	1,33	6,66	1,81
ΛΗΜΝΟΣ	215	1.609,2	28,67	0,27	4,54	1,39
ΚΡΗΤΗ	277	13.541,7	36,93	2,26	8,51	1,99
ΡΟΔΟΣ	302	14.519,1	40,27	2,42	8,84	2,15
ΚΑΛΥΜΝΟΣ	242	8.664,7	32,27	1,44	6,89	1,69
ΚΑΡΠΑΘΟΣ	268	887,4	35,73	0,15	4,30	1,67

Η ταχύτητα του πλοίου είναι 15 κόμβοι, και οι ρυθμοί φόρτωσης και εκφόρτωσης 6000m³/h και 3000m³/h αντίστοιχα.

Υπολογισμός κόστους ναύλωσης

-Για ξεχωριστά δρομολόγια

	ΣΥΝΟΛΟ (days)	Κόστος
ΣΑΜΟΣ	1,49	104.993 €
ΧΙΟΣ	1,48	104.067 €
ΛΕΣΒΟΣ	1,81	127.633 €
ΛΗΜΝΟΣ	1,39	98.322 €
ΚΡΗΤΗ	1,99	140.131 €
ΡΟΔΟΣ	2,15	151.358 €
ΚΑΛΥΜΝΟΣ	1,69	119.260 €
ΚΑΡΠΑΘΟΣ	1,67	118.020 €

Ενδεικτικά τα κόστη για τα tanker είναι:

Εναλλακτική 1: για tanker χωρητικότητας 15000m³ το κόστος για LH₂ είναι 70500€/day

Εναλλακτική 2: για tanker χωρητικότητας 15000m³ το κόστος για LH₂ είναι 70500€/day.

Εναλλακτική 3: για tanker χωρητικότητας 75000m³ το κόστος για LH₂ είναι 158500€/day.

Εναλλακτική 4: για tanker χωρητικότητας 30000m³ το κόστος για LH₂ είναι 94000€/day.

Υπολογισμός ΕΕΟΙ

ΕΕΟΙ-ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΗ 1				
ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ				
	ΑΠΟΣΤΑΣΗ(nm)	(tn)	ΦΟΡΤΙΟ(tn)	ΕΕΟΙ
1-->2	225	11,25	247,4	1295,77
2-->1	225	11,25	0	
1-->3	215	10,75	392,0	817,93
3-->1	215	10,75	0	
1-->4	266	13,30	565,6	566,88
4-->1	266	13,30	0,00	
1-->5	215	10,75	114,2	2806,13
5-->1	215	10,75	0,00	
1-->6	277,00	20,39	1.174,5	401,88
6-->1	277,00	20,39	0,00	
1-->7	302,00	22,23	1.243,9	379,46
7-->1	302,00	22,23	0,00	
1-->8	242,00	12,10	615,2	521,14
8-->1	242,00	12,10	0,00	
1-->9	268,00	13,40	63,0	5088,73
9-->1	268,00	13,40	0,00	
			sum	11877,92

ΕΕΟΙ-ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΗ 2

	ΑΠΟΣΤΑΣΗ(nm)	ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ (tn)	ΦΟΡΤΙΟ(tn)	ΕΕΟΙ
1-->2	225	11,25	123,7	2591,54
2-->1	225	11,25	0	
1-->3	215	10,75	196,0	1635,86
3-->1	215	10,75	0	
1-->4	266	13,30	282,8	1133,75
4-->1	266	13,30	0,00	
1-->5	215	10,75	57,1	5612,27
5-->1	215	10,75	0,00	
1-->6	277,00	13,85	587,2	545,95
6-->1	277,00	13,85	0,00	
1-->7	302,00	15,10	621,9	515,49
7-->1	302,00	15,10	0,00	
1-->8	242,00	12,10	307,6	1042,27
8-->1	242,00	12,10	0,00	
1-->9	268,00	13,40	31,5	10177,45
9-->1	268,00	13,40	0,00	

sum

23254,59

ΕΕΟΙ-ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΗ 3

	ΑΠΟΣΤΑΣΗ(nm)	ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ (tn)	ΦΟΡΤΙΟ(tn)	ΕΕΟΙ
1-->5	215	81,22	4.415,7	512,51
5-->4	94	35,51	4.301,5	
4-->3	60	22,67	3.735,9	
3-->2	56	21,16	3.343,9	
2-->8	63	23,80	3.096,5	
8-->7	87	32,87	2.481,3	
7-->9	79	29,84	1.237,5	
9-->6	62	23,42	1.174,5	
6-->1	277	104,64	0,0	
sum		375,13		

ΕΕΟΙ-ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΗ 4

	ΑΠΟΣΤΑΣΗ(nm)	ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ (tn)	ΦΟΡΤΙΟ(tn)	ΕΕΟΙ	
1-->5	215	69,88	2.207,9	881,81	
5-->4	94	30,55	2.150,7	1763,62 (επί 2 λγω διπλού δρομολόγιου)	
4-->3	60	19,50	1.867,9		
3-->2	56	18,20	1.672,0		
2-->8	63	20,48	1.548,3		
8-->7	87	28,28	1.240,7		
7-->9	79	25,68	618,7		
9-->6	62	20,15	587,2		
6-->1	277	90,03	0,0		
sum		322,73			

Κώδικας MATLAB εύρεση πιο σύντομης διαδρομής

```
function [OptimalTour,mincost]=tsp_dp1(cities, Dmatrix)

[NumOfCities,dummy]=size(cities);
Primes=primes(NumOfCities*10);

if nargin<2
    D=diag(inf*ones(1,NumOfCities));
    for i=1:NumOfCities
        for j=i+1:NumOfCities
            D(i,j)=norm(cities(i,:)-cities(j,:));
            D(j,i)=D(i,j);
        end
    end
else
    D=Dmatrix;
end
NumOfDataSets=1;
for i=2:NumOfCities
    NumOfDataSets=NumOfDataSets+nchoosek(NumOfCities,i);
end
Data(NumOfDataSets).S=[];
Data(NumOfDataSets).l=0;
Data(NumOfDataSets).cost=inf;
Data(NumOfDataSets).pre=[];
Data(NumOfDataSets).m=[];
LookUpTable(NumOfDataSets)=0;
Data(1).S=[1];
Data(1).l=1;
Data(1).cost=0;
Data(1).Pre=[];
Data(1).m=[];
for s=2:NumOfCities
    Data(s).S=[Data(1).S,s];
    Data(s).l=s;
    Data(s).cost=D(s,1);
    Data(s).Pre=1;
    Data(s).m=1;
    LUT=calcLUT(Data(s).S,s,Primes);
    LookUpTable(s)=LUT;
end
IndexStartPrevStep=2;
IndexLastStep=NumOfCities;
CurrentData=IndexLastStep;

for s=3:NumOfCities

    TempSets=nchoosek(2:NumOfCities,s-1);
    NumOfSets=size(TempSets);
    for j=1:NumOfSets(1)
        for k=1:NumOfSets(2)
```



```

        SminusSet=[1,TempSets(j,1:k-
1),TempSets(j,k+1:NumOfSets(2))];
        candidatecost(2:length(SminusSet))=inf;
        indices=[];
        for mm=2:length(SminusSet)
            LUV=calcLUT(SminusSet,SminusSet(mm),Primes);

index=find(LUV==LookUpTable(IndexStartPrevStep:IndexLastStep));
        index=index+IndexStartPrevStep-1;
        if index==0
            candidatecost(mm)=inf;
        else

candidatecost(mm)=Data(index).cost+D(SminusSet(mm),TempSets(j,k));
            indices(mm)=index;
        end
        end
        [mincost,indexcost]=min(candidatecost(2:end));
        CurrentData=CurrentData+1;
        Data(CurrentData).S=[1,TempSets(j,:)];
        Data(CurrentData).l=TempSets(j,k);
        Data(CurrentData).cost=mincost;
        Data(CurrentData).Pre=indices(indexcost+1);
        Data(CurrentData).m=SminusSet(indexcost+1);

LookUpTable(CurrentData)=calcLUT(Data(CurrentData).S,TempSets(j,k),Primes
);
        end
        end
        IndexStartPrevStep=IndexLastStep+1;
        IndexLastStep=CurrentData;
end
mm=0;
for i=IndexStartPrevStep:IndexLastStep
    mm=mm+1;
    candidatecost(mm)=Data(i).cost+D(Data(i).l,1);
end
[mincost,indexcost]=min(candidatecost);
Temp=Data(IndexStartPrevStep+indexcost-1);
OptimalTour=1;
while ~isempty(Temp.Pre)
    OptimalTour=[OptimalTour,Temp.l];
    Temp=Data(Temp.Pre);
end
OptimalTour=[OptimalTour,1];

function LUT=calcLUT(vec,last,Primes)
j=length(vec);
LUT=Primes(last);
for i=2:j
    LUT=LUT*Primes(vec(i));
end

```

