



Μοντελοποίηση και Τεχνο-Οικονομική
Ανάλυση Παραγωγής Υδρογόνου και
Ανάκτησης Απορριπτόμενης Θερμότητας

Τομέας: Θερμότητας

Επιβλέπων: Σωτήριος Καρέλλας, Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, 2024

MARKOS CHANDRAS

Modeling and Techno-Economic
Analysis of Hydrogen Production
and Waste Heat Utilization



SCHOOL OF MECHANICAL ENGINEERING

Section: Thermal Engineering

Supervisor: Sotirios Karellas, Professor NTUA

Athens, 2024

Ευχαριστίες

Με την ολοκλήρωση της διπλωματικής εργασίας μου και της φοίτησης μου στην σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, οφείλω να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή Σωτήριο Καρέλλα για την ανάθεση της παρούσας εργασίας και για την έμπνευση που αποτέλεσε κατά την διάρκεια των σπουδών μου, εκθέτοντας με σε αντικείμενα μεγάλου επιστημονικού ενδιαφέροντος.

Παράλληλα, θα ήθελα να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου στον υποψήφιο διδάκτορα Νίκο Σκορδούλια για την καθοδήγηση που μου προσέφερε σε όλα τα στάδια της εκπόνησης της εργασίας.

Τέλος, θα ήθελα να αφιερώσω την εργασία μου και την προσπάθεια που κατέβαλα κατά την διάρκεια των σπουδών μου, στην οικογένεια μου, στην οποία οφείλω σε μεγάλο βαθμό ό,τι είμαι έως και σήμερα.

Έχω διαβάσει και κατανοήσει τους κανόνες για τη λογοκλοπή και τον τρόπο σωστής αναφοράς των πηγών που περιέχονται στον οδηγό συγγραφής Διπλωματικών Εργασιών. Δηλώνω ότι, από όσα γνωρίζω, το περιεχόμενο της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας είναι προϊόν δικής μου εργασίας και υπάρχουν αναφορές σε όλες τις πηγές που χρησιμοποίησα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτή τη Διπλωματική εργασία είναι του συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών ή του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Μάρκος Χανδράς

Περίληψη

Η επιτακτική ανάγκη της ενεργειακής μετάβασης και της απεξάρτησης από τα ορυκτά καύσιμα και τις εκπομπές των αερίων του θερμοκηπίου, προϋποθέτει την ανάδειξη κλιματικά ουδέτερων ενεργειακών φορέων και την σύζευξη των ενεργειακών τομέων. Η παραπάνω απαίτηση έχει αναγνωριστεί από την διεθνή κοινότητα και μετουσιώνεται σε στρατηγική μέσω της χάραξης κοινών πολιτικών που στοχεύουν στο να κλιμακώσουν μια παγκόσμια οικονομία υδρογόνου και στο να αυξήσουν την ενεργειακή απόδοση προωθώντας την διασύνδεση των ενεργειακών συστημάτων και τεχνολογιών.

Η παρούσα εργασία πραγματεύεται την μοντελοποίηση και την τεχνο-οικονομική αξιολόγηση ενός συστήματος παραγωγής υδρογόνου, στο οποίο οι ενεργειακές απώλειες που εκδηλώνονται με απόρριψη θερμότητας, αξιοποιούνται από διαφορετικές τεχνολογίες ανάκτησης απορριπτόμενης θερμότητας. Συγκεκριμένα, σε περιβάλλον AspenPlus® προσομοιώνεται η λειτουργία ενός συστήματος ηλεκτρόλυσης Μεμβράνης Ανταλλαγής Πρωτονίων (PEM) της τάξης του 1 MW και μελετάται η σύζευξη του με Οργανικό Κύκλο Rankine (ORC), Αντλία Θερμότητας Υψηλών Θερμοκρασιών (HTHP) και Δίκτυα Τηλεθέρμανσης (DHN), με σκοπό την αξιοποίηση της απορριπτόμενης θερμότητας. Τα συζευγμένα ενεργειακά συστήματα αξιολογούνται τεχνο-οικονομικά, ως προς τον ολικό βαθμό απόδοσης, την αποφυγή των άμεσων εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα και τους οικονομικούς δείκτες της επένδυσης, ώστε να διαπιστωθεί η σκοπιμότητα του συνδυασμού τεχνολογιών ανάκτησης θερμότητας με το σύστημα παραγωγής υδρογόνου.

Η ανάλυση έδειξε πως κατά τον χρονικό ορίζοντα του έργου και για τα βέλτιστα σενάρια, είναι εφικτή η επίτευξη μέσου βαθμού απόδοσης 97.41%, η αποφυγή εκπομπής 30,400 *tn CO₂* και η βελτίωση των οικονομικών δεικτών *NPV* και *IRR* σε 1.65 εκ. € και 12.95% αντίστοιχα.

Abstract

The urgent need for energy transition and decoupling from fossil fuels and greenhouse gas emissions requires the emergence of climate-neutral energy carriers and the coupling of energy sectors. This requirement has been recognized by the international community and is being translated into a strategy through the development of common policies aimed at scaling up and consolidating a global hydrogen economy and increasing energy efficiency by promoting the connection of energy technologies and systems.

The current diploma thesis addresses the modelling and techno-economic evaluation of a hydrogen production system in which energy losses manifested by heat rejection are exploited by different waste heat recovery technologies. In particular, the operation of a 1 MW Proton Exchange Membrane (PEM) electrolysis system is simulated in an AspenPlus[®] environment and its coupling with Organic Rankine Cycle (ORC), High Temperature Heat Pump (HTHP) and District Heating Networks (DHN), is studied in order to recover waste heat. The final coupled energy systems are techno-economically evaluated in terms of overall efficiency, direct carbon dioxide emission savings and economic indicators of the investment, to determine the feasibility of combining heat recovery technologies with the hydrogen production system.

The analysis showed that over the project time horizon and for the best-case scenarios, it is feasible to achieve an average efficiency of 97.41%, avoid CO_2 emissions of 30,400 *tn* and improve the economic indicators *NPV* και *IRR* to 1.65 *m. €* and 12.95% respectively.

Περιεχόμενα

Ευχαριστίες.....	i
Περίληψη.....	iv
Abstract	v
Περιεχόμενα	vii
Συνοτομεύσεις – Αρκτικόλεξα	x
Σύμβολα	xi
Σταθερές και Αδιάστατα Μεγέθη	xii
Δείκτες.....	xiii
1 Εισαγωγή	1
1.1 Πλαίσιο.....	1
1.2 Σκοπός, Στόχοι και Ερωτήματα.....	2
1.3 Οριοθέτηση	2
2 Ενεργειακή Μετάβαση	3
2.1 Κλιματική Αλλαγή	3
2.1.1 Αιτίες	3
2.1.2 Επιπτώσεις.....	5
2.2 Διεθνής και Ευρωπαϊκή Κλιματική Πολιτική	6
2.3 Το Υδρογόνο ως Μέσο Απανθρακοποίησης.....	7
2.3.1 Power-to-Hydrogen, PtH	8
2.3.2 Power-to-Gas, PtG.....	8
2.3.3 Power-to-Liquid, PtL.....	8
2.3.4 Power-to-Chemicals, PtC	9
2.3.5 Power-to-Power, PtP	9
2.4 Ευρωπαϊκή Πολιτική για το Υδρογόνο.....	10
3 Θεωρητικό Υπόβαθρο.....	13
3.1 Χρωματική Κατηγοριοποίηση Υδρογόνου	13
3.2 Επισκόπηση και Προοπτικές Μεθόδων Παραγωγής Υδρογόνου	14
3.3 Παραγωγή Πράσινου Υδρογόνου	15
3.3.1 Αρχές Ηλεκτρόλυσης Νερού	15
3.3.2 Θερμοδυναμική Ηλεκτρόλυσης Νερού	15
3.4 Τεχνολογίες Ηλεκτρόλυσης Νερού	18
3.4.1 Αλκαλική Ηλεκτρόλυση Νερού, AEL.....	18
3.4.2 Ηλεκτρόλυση Μembrάνης Ανταλλαγής Πρωτονίων, PEMEL.....	19
3.4.3 Ηλεκτρόλυση Στερεού Οξειδίου, SOEL.....	21

3.4.4	Περιφερειακά Συστήματα Συστήματος Ηλεκτρόλυσης	22
3.5	Σύγκριση Τεχνολογιών Ηλεκτρόλυσης.....	23
3.6	Ανάκτηση Απορριπτόμενης Θερμότητας.....	26
3.6.1	Οργανικός Κύκλος Rankine, ORC	27
3.6.2	Αντλία Θερμότητας Υψηλών Θερμοκρασιών, ΗΤΗΡ	30
3.6.3	Δίκτυα Τηλεθέρμανσης, DHN	33
4	Μεθοδολογία.....	37
4.1	Θεωρητική Μοντελοποίηση PEMEL	37
4.1.1	Περιγραφή προγράμματος HYFLEXPOWER.....	37
4.1.2	Χαρακτηριστικά PEM Silyzer 200 – Siemens.....	38
4.1.3	Ηλεκτροχημικό Μοντέλο	39
4.1.4	Θερμικό Μοντέλο.....	43
4.2	Μοντελοποίηση PEMEL σε περιβάλλον AspenPlus®	45
4.2.1	Μοντέλο Συστήματος Ηλεκτρόλυσης Μεμβράνης Ανταλλαγής Πρωτονίων ..	45
4.2.2	Μοντέλο Ψύξης PEMEL	46
4.3	Αξιοποίηση Απορριπτόμενης Θερμότητας PEMEL – Τεχνική Ανάλυση.....	49
4.3.1	Οργανικός Κύκλος Rankine, ORC	49
4.3.2	Δίκτυο Τηλεθέρμανσης Χαμηλών Θερμοκρασιών, LTDHN.....	55
4.3.3	Αντλία Θερμότητας Υψηλών Θερμοκρασιών, ΗΤΗΡ	56
4.3.4	Δίκτυο Τηλεθέρμανσης Υψηλών Θερμοκρασιών, ΗΤDHN	61
4.3.5	Τροφοδοσία Συστήματος Ηλεκτρόλυσης με Ηλεκτρική Ενέργεια και Συντελεστής Φορτίου	62
1.1.1	Επίδραση Γήρανσης και Φορτίου στον Βαθμό Απόδοσης του PEMEL.....	63
4.3.6	Μέσοι Βαθμοί Απόδοσης	65
4.4	Αξιοποίηση Απορριπτόμενης Θερμότητας PEMEL – Περιβαλλοντική Ανάλυση.....	66
4.5	Αξιοποίηση Απορριπτόμενης Θερμότητας PEMEL – Οικονομική Ανάλυση.....	67
4.5.1	Σταθμισμένα Κόστη Παραγωγής Ενεργειακών Αγαθών	67
4.5.2	Ταμειακές Ροές	69
4.5.3	Κριτήρια Αξιολόγησης Επενδύσεων.....	70
4.5.4	Δεδομένα και Παραδοχές Οικονομικής Ανάλυσης.....	71
5	Αποτελέσματα.....	75
5.1	Αποτελέσματα Τεχνικής Ανάλυσης.....	75
5.1.1	Θεωρητική Μοντελοποίηση PEMEL.....	75
5.1.2	Μοντελοποίηση PEMEL σε Περιβάλλον AspenPlus®	77
5.1.3	Μοντελοποίηση ORC σε Περιβάλλον AspenPlus®	78
5.1.4	Μοντελοποίηση ΗΤΗΡ σε Περιβάλλον AspenPlus®	84

5.1.5	Ποσδιδόμενη Θερμότητα στο DHN.....	87
5.1.6	Συνθήκες Λειτουργίας ΡΕΜΕΛ.....	88
5.1.7	Μέσοι Βαθμοί/Συντελεστές Απόδοσης.....	91
5.2	Αποτελέσματα Περιβαλλοντικής Ανάλυσης	94
5.3	Αποτελέσματα Οικονομικής Ανάλυσης	96
5.3.1	Σταθμισμένα Κόστη.....	96
5.3.2	Κριτήρια Αξιολόγησης Επενδύσεων.....	99
6	Συμπεράσματα – Μελλοντική Εργασία.....	103
6.1	Συμπεράσματα	103
6.2	Μελλοντική Εργασία.....	104
	Κατάλογος Πινάκων	105
	Κατάλογος Διαγραμμάτων	106
	Κατάλογος Εικόνων	108
	Κατάλογος Αναφορών.....	109

Συντομεύσεις – Αρκτικόλεξα

AEL	Alkaline Electrolysis
CCS	Carbon Capture and Storage
CCUS	Carbon Capture Utilisation and Storage
COP	Conference of the Parties
DAC	Direct Air Capture
DHN	District Heating Network
ETS	Emmission Trading System
EU	European Union
GHG	Greenhouse Gases
GIS	Geographic Information System
GWP	Global Warming Potential
HER	Hydrogen Evolution Reaction
HEX	Heat Exchanger
HTDHN	High Temperature District Heating Network
HTHP	High Temperature Heat Pump
IHX	Internal Heat Exchanger
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
IPCEI	Important Projects of Common European Interest
KPI	Key Performance Indicators
LTDHN	Low Temperature District Heating Network
ODP	Ozon Depletion Potential
OER	Oxygen Evolution Reaction
ORC	Organic Rankine Cycle
PEM	Proton Exchange Membrane
PEMEL	Proton Exchange Membrane Electrolysis
PtC	Power to Chemicals
PtG	Power to Gas
PtH	Power to Hydrogen
PtL	Power to Liquid
PtP	Power to Power
PV	Photovoltaic
RFNBO	Renewable Fuels of Non-Biological Origin
SMR	Steam Methane Reforming
SNG	Synthetic Natural Gas
SOEL	Solid Oxide Electrolysis
SPE	Solid Polymer Electrolyzer
ULTDH	Ultra Low Temperature District Heating Network
UNFCC	United Nations Framework Convention on Climate Change
ΑΠΕ	Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας
ΕΕ	Ευρωπαϊκή Ένωση
ΣΗΘ	Συμπαράγωγή Ηλεκτρισμού και Θερμότητας

Σύμβολα

A	Επιφάνεια Κελιού	cm^2
$A_{electricity}$	Δαπάνες Ηλεκτρικής Ενέργειας	€
A_{water}	Δαπάνες Νερού	€
C_{buffer}	Χωρητικότητα Δεξαμενής Νερού	kWh
cf	Συντελεστής Φορτίου – Capacity Factor	%
C	Εκροές/Τιμή	€
$CAPEX$	Capital Expenditure – Κεφαλαιακές Δαπάνες	€
CF	Καθαρές Ροές	€
CI	Ένταση Άνθρακα	kg_{CO_2-eq}/MWh
C_{th}	Θερμική Αγωγιμότητα	kJ/K
d	Πλάτος Κελιού	cm
deg	Γήρανση	%
DA	Απόσβεση	€
$EBITDA$	Κέρδη προ Τόκων Φόρων και Αποσβέσεων	€
EBT	Κέρδη προ Φόρων	€
h	Συντελεστής Μεταφοράς Θερμότητας	$W/m^2 \cdot K$
h_c	Ύψος Κελιού	cm
HHV	Ανώτερη Θερμογόνος Ικανότητα	kWh/kg
i	Πυκνότητα Ρεύματος	A/cm^2
i	Επιτόκιο Αναγωγής	%
I	Ρεύμα	A
In	Εισροές	€
IRR	Internal Rate of Return – Εσωτερικός Βαθμός Απόδοσης	%
k	Θερμική Αγωγιμότητα	$W/m \cdot K$
l	Φορτίο	%
$LCOE$	Levelized Cost of Energy – Σταθμισμένο Κόστος Ενέργειας	€/MWh
$LCOH$	Levelized Cost of Hydrogen – Σταθμισμένο Κόστος Ενέργειας	€/kg
$LCOHeat$	Levelized Cost of Heat – Σταθμισμένο Κόστος Θερμότητας	€/MWh
$LCOSteam$	Levelized Cost of Steam – Σταθμισμένο Κόστος Ατμού	€/kg
\dot{m}	Παροχή Μάζας	kg/h
\dot{n}	Μοριακή Παροχή	mol/s
N	Διάρκεια Ζωής	έτη
NE	Καθαρά Κέρδη	€
NPV	Net Present Value – Καθαρή Παρούσα Αξία	€
$OPEX$	Operational Expenditure – Λειτουργικές Δαπάνες	€
$O\&M$	Operation & Maintenance	€
p	Πίεση	bar
\bar{p}	Μερική Πίεση	Pa

P	Ισχύς	kW
PP	Ελάχιστη Θερμοκρασιακή Διαφορά	K
Q	Θερμότητα	kW
R_{mem}	Ωμική Αντίσταση Μεμβράνης	Ω
RC	Κόστος Αντικατάστασης	ϵ
RV	Υπολειμματική Αξία	ϵ
T	Θερμοκρασία	K
Tax	Φόρος	ϵ
U_{act}	Τάση Ενεργοποίησης	V
U_{conc}	Τάση Συγκέντρωσης	V
U_{ohm}	Ωμική Τάση	V
U_{ocv}	Τάση Ανοιχτού Κυκλώματος	V
U_{rev}	Αντιστρέψιμη Τάση	V
U_{tn}	Θερμοουδέτερη Τάση	V
\dot{v}	Παροχή Όγκου	m^3/h
v_w	Ταχύτητα Ανέμου	m/s
VAT	Value-Added Tax	$\%$
w	Μήκος Κελιού	cm
δ	Πάχος Μεμβράνης	cm
ΔG	Ελεύθερη Ενέργεια Gibbs	$kJ/kmol$
ΔH	Συνολική Ενέργεια-Ενθαλπία	$kJ/kmol$
ΔP	Διαφορά Πίεσης	bar
ΔS	Εντροπία	$kJ/kmol \cdot K$
η	Βαθμός Απόδοσης	$\%$
θ	Θερμοκρασία	$^{\circ}C$
λ	Περιεκτικότητα Μεμβράνης σε Νερό	$\%$
ν	Κινηματικό Ιξώδες	$kg/m \cdot s$
σ	Αγωγιμότητα Μεμβράνης	S/cm

Σταθερές και Αδιάστατα Μεγέθη

CoP	Συντελεστής Θερμικής Απόδοσης	$[-]$
F	Σταθερά Faraday	$96485 C/mol$
N_{cell}	Αριθμός Κελίων	$[-]$
Nu	Αριθμός Nusselt	$[-]$
Pr	Αριθμός Prandtl	$[-]$
R	Παγκόσμια Σταθερά αερίων	$8.3145 J/mol \cdot K$
Re	Αριθμός Reynolds	$[-]$
a	Συντελεστής Μεταφοράς Φορτίου	$[-]$
ϵ	Συντελεστής Εκπομπής	$[-]$
π	Λόγος Συμπίεσης	$[-]$
σ	Σταθερά Stephan-Boltzman	$5.67 \cdot 10^{-8} W/m^2 K^4$

Δείκτες

<i>0</i>	Αρχικές Συνθήκες
<i>an</i>	Άνοδος
<i>act</i>	Πραγματικός
<i>cat</i>	Κάθοδος
<i>cell</i>	Κελί Ηλεκτρόλυσης
<i>comp</i>	Συμπιεστής
<i>cond</i>	Συμπυκνωτής
<i>cons</i>	Καταναλισκόμενο
<i>conv</i>	Συναγωγή
<i>cool</i>	Ψυκτικό
<i>deion</i>	Απιονισμένο Νερό
<i>el</i>	Ηλεκτρική
<i>electricity</i>	Ηλεκτρική Ενέργεια
<i>env</i>	Περιβάλλον
<i>eq</i>	Ισοδύναμο
<i>evap</i>	Εξατμιστής
<i>exhaust</i>	Καυσαέρια
<i>exp</i>	Εκτονωτής
<i>F</i>	Κατά Faraday
<i>gen</i>	Παραγόμενο
<i>HEX</i>	Εναλλάκτης Θερμότητας
<i>in</i>	Εισερχόμενο
<i>loss</i>	Απώλειες
<i>NGBoiler</i>	Λέβητας Φυσικού Αερίου
<i>net</i>	Καθαρή
<i>nom</i>	Ονομαστικό Φορτίο
<i>perm</i>	Διαπερατότητα
<i>prod</i>	Παραγόμενο
<i>pump</i>	Αντλία
<i>rad</i>	Ακτινοβολία
<i>return</i>	Επιστροφή
<i>SC</i>	Υπόψυξη
<i>SH</i>	Υπερθέρμανση
<i>sink</i>	Απαγωγός Θερμότητας
<i>source</i>	Θερμική Πηγή
<i>stack</i>	Κυψέλη Ηλεκτρόλυσης
<i>supply</i>	Παροχή
<i>t</i>	Περίοδος
<i>th</i>	Θερμική
<i>out</i>	Εξερχόμενο
<i>water</i>	Νερό

1 Εισαγωγή

1.1 Πλαίσιο

Το υδρογόνο τυγχάνει νέας και ταχέως αυξανόμενης προσοχής στην Ευρώπη και σε όλο τον κόσμο, καθώς δύναται να χρησιμοποιηθεί ως πρώτη ύλη, ως καύσιμο ή ως φορέας ενέργειας και αποθήκευσης και έχει πολλές πιθανές εφαρμογές στους τομείς της βιομηχανίας, των μεταφορών, της ενέργειας και των κτιρίων. Το πιο σημαντικό είναι ότι δεν εκπέμπει CO_2 κατά την χρήση του, αποτελώντας έτσι μια λύση για την απαλλαγή από τις εκπομπές άνθρακα των βιομηχανικών διεργασιών και των οικονομικών τομέων, η απανθρακοποίηση των οποίων είναι τόσο επείγουσα όσο και δύσκολο να επιτευχθεί. Όλα τα παραπάνω καθιστούν το υδρογόνο αναγκαίο για τη στήριξη της δέσμευσης της ΕΕ να επιτύχει ουδέτερο ισοζύγιο διοξειδίου του άνθρακα έως το 2050 και για την παγκόσμια προσπάθεια εφαρμογής της συμφωνίας του Παρισιού.

Ωστόσο, σήμερα το υδρογόνο αντιπροσωπεύει ένα μικρό κλάσμα του ενεργειακού μείγματος και εξακολουθεί να παράγεται σε μεγάλο βαθμό από ορυκτά καύσιμα, ιδίως από φυσικό αέριο ή γαιάνθρακα, ενώ για να συμβάλει στην κλιματική ουδετερότητα, θα πρέπει να αποκτήσει πολύ μεγαλύτερη κλίμακα και η παραγωγή του να απαλλαγεί πλήρως από τις εκπομπές CO_2 [1].

Η απαίτηση παραγωγής υδρογόνου χαμηλών εκπομπών, επιταχύνει την ανάπτυξη τεχνολογιών παραγωγής πράσινου υδρογόνου, οι οποίες εδράζονται κατά κύριο λόγο στην αρχή της ηλεκτρόλυσης, της διάσπασης δηλαδή του νερού στα δομικά του στοιχεία, υδρογόνο και οξυγόνο, με την εφαρμογή ηλεκτρικής, και ενίοτε θερμικής, ενέργειας. Στην προσπάθεια για κλιμάκωση της παγκόσμιας οικονομίας ανανεώσιμου υδρογόνου, βασικό ανάχωμα συνιστά η έλλειψη οικονομικής ανταγωνιστικότητας των πράσινων τεχνολογιών έναντι στις συμβατικές τεχνολογίες παραγωγής υδρογόνου από ορυκτά καύσιμα, και η επενδυτική ανασφάλεια που αυτό προκαλεί. Το χάσμα αυτό επιχειρείται να γεφυρωθεί μέσω μηχανισμών επιχορήγησης των πράσινων τεχνολογιών σε όλο το μήκος της αλυσίδας αξίας, της μείωσης του κεφαλαιουχικού κόστους με αξιοποίηση οικονομιών κλίμακας και μαζικής παραγωγής και της βελτίωσης του βαθμού απόδοσης τους μέσω έρευνας και ανάπτυξης. Παράλληλα στα παραπάνω προστίθεται και η επιβολή περιορισμών και προστίμων στις συμβατικές τεχνολογίες υψηλής έντασης εκπομπών CO_2 [2], [3].

Η ηλεκτρόλυση Μembrάνης Ανταλλαγής Πρωτονίων (PEM) είναι μια από τις πλέον υποσχόμενες τεχνολογίες ηλεκτρόλυσης, κυρίως εξαιτίας του μικρού απαιτούμενου χρόνου εκκίνησης της, που την καθιστά κατάλληλη για τροφοδοσία με ηλεκτρική ενέργεια από ανανεώσιμες πηγές. Ο βαθμός απόδοσης συστήματος μιας τέτοιας εγκατάστασης κυμαίνεται μεταξύ 60% - 80%, με τις απώλειες ενέργειας να απορρίπτονται με την μορφή θερμότητας στο περιβάλλον. Η αξιοποίηση της θερμότητας αυτής σε ένα ενοποιημένο σύστημα παραγωγής υδρογόνου και ανάκτησης απορριπτόμενης θερμότητας, δύναται να αυξήσει τον συνολικό βαθμό απόδοσης και να αναδείξει την οικονομική σκοπιμότητα του [4].

1.2 Σκοπός, Στόχοι και Ερωτήματα

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η μοντελοποίηση ενός συστήματος PEMEL και η διερεύνηση της επίδρασης της σύζευξης του με διαφορετικές τεχνολογίες αξιοποίησης της απορριπτόμενης θερμότητας της ηλεκτρολυτικής συστοιχίας.

Στόχος είναι ο καθορισμός των συνθηκών λειτουργίας των επιμέρους υποσυστημάτων και η ανάδειξη της σκοπιμότητας της σύζευξης τους, μέσω της αξιολόγησης των τεχνολογικών, περιβαλλοντικών και οικονομικών δεικτών του τελικού συστήματος.

Για να κατανοηθούν πλήρως οι δυνατότητες και η σκοπιμότητα της αξιοποίησης της απορριπτόμενης θερμότητας ενός συστήματος ηλεκτρόλυσης προκύπτουν τα εξής ερωτήματα που επιχειρείται να διασαφηνιστούν με την παρούσα εργασία:

- Ποια είναι η αρχή λειτουργίας ενός συστήματος ηλεκτρόλυσης Μεμβράνης Ανταλλαγής Πρωτονίων ;
- Πόση θερμότητα απορρίπτεται από το σύστημα ηλεκτρόλυσης ;
- Με ποιον τρόπο και σε τι ποσοστό δύναται αυτή να ανακτηθεί ;
- Ποιες τεχνολογίες ανάκτησης θερμότητας μπορούν να αξιοποιηθούν στην συγκεκριμένη εφαρμογή ;
- Ποιος είναι ο βαθμός απόδοσης του τελικού συστήματος ;
- Ποια είναι η αποφυγή CO_2 του συζευγμένου συστήματος σε σύγκριση με συμβατικές τεχνολογίες ;
- Πως επηρεάζει η σύζευξη των τεχνολογιών τους οικονομικούς δείκτες της επένδυσής ;

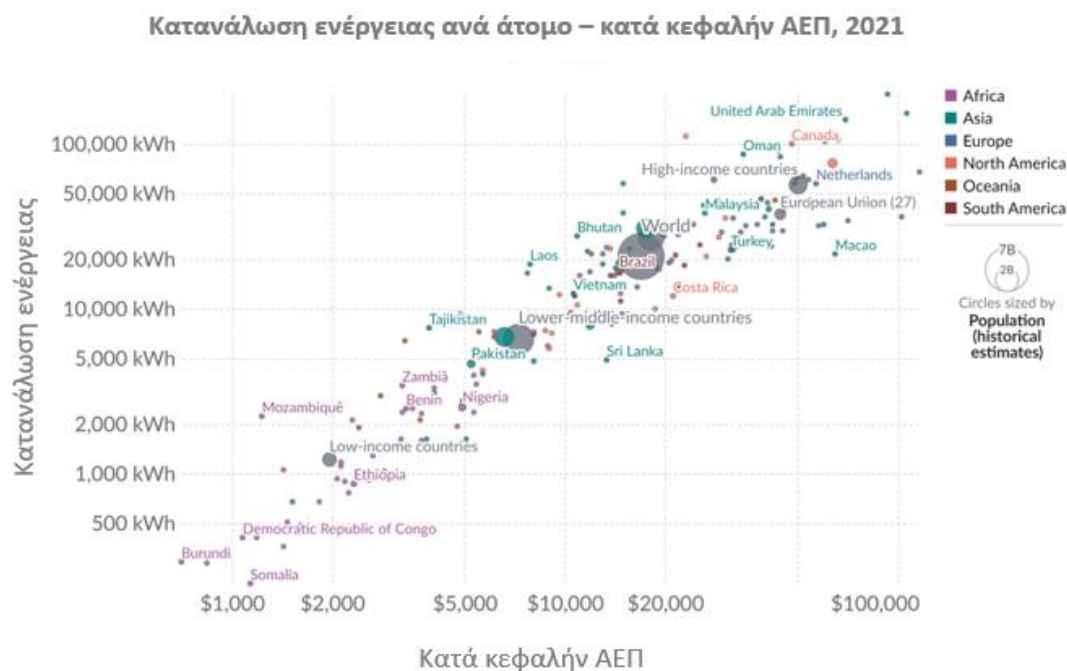
1.3 Οριοθέτηση

Στην παρούσα εργασία η μοντελοποίηση και η τεχνική ανάλυση του συστήματος ηλεκτρόλυσης Μεμβράνης Ανταλλαγής Πρωτονίων, των συστημάτων ανάκτησης θερμότητας και συγκεκριμένα του Οργανικού Κύκλου Rankine (ORC), της Αντλίας Θερμότητας Υψηλών Θερμοκρασιών (HTHP) και των Δικτύων Τηλεθέρμανσης (DHN), πραγματοποιείται σε μόνιμη κατάσταση. Παράλληλα, η οικονομική και τεχνική ανάλυση εστιάζεται αποκλειστικά στην παραγωγή υδρογόνου και την αξιοποίηση της απορριπτόμενης, από την ηλεκτρολυτική συστοιχία, θερμότητας, με τα στάδια του απιονισμού του χρησιμοποιούμενου νερού, της συμπίεσης και αποθήκευσης του παραγόμενου υδρογόνου και της πιθανής αξιοποίησης του παραγόμενου οξυγόνου να είναι εκτός πεδίου ενδιαφέροντος της εργασίας. Τέλος, θεωρείται πως η παραγωγή των εκρών των συστημάτων ανάκτησης θερμότητας, συμπίπτει χρονικά με την κατανάλωση τους, με την περίπτωση δυναμικής ζήτησης να μην εξετάζεται στην παρούσα εργασία.

2 Ενεργειακή Μετάβαση

2.1 Κλιματική Αλλαγή

Περισσότερα από 10,000 χρόνια συνεχούς και επιταχυνόμενης προόδου έχουν φέρει τον ανθρώπινο πολιτισμό να απειλεί το ίδιο το θεμέλιο που τον επέτρεψε: την σταθερότητα του κλίματος της Γης. Οι φυσικές εκδηλώσεις ενός μεταβαλλόμενου κλίματος γίνονται όλο και πιο εμφανείς παγκοσμίως, συνοδευόμενες από κοινωνικοοικονομικές επιπτώσεις. Και οι δύο θα συνεχίσουν να αυξάνονται, πιθανότατα με μη γραμμικό τρόπο, μέχρι ο κόσμος να μεταβεί σε μια κλιματικά ουδέτερη οικονομία [5].

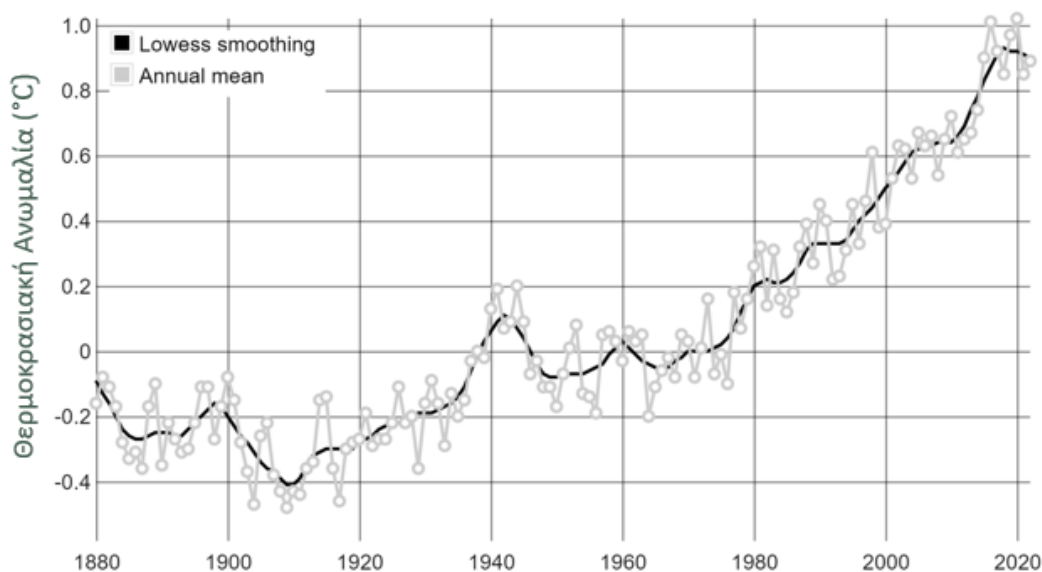


Διάγραμμα 2-1: Κατανάλωση ενέργειας ανά άτομο σε συνάρτηση με το κατά κεφαλήν ΑΕΠ, 2021 [6].

2.1.1 Αιτίες

Η κλιματική αλλαγή αναφέρεται στην μεταβολή του κλίματος του πλανήτη, εξαιτίας της αύξησης της θερμοκρασίας της Γης και της αλλαγής στην ένταση και στο μοτίβο των καιρικών φαινομένων. Η αύξηση της θερμοκρασίας οφείλεται εν μέρει σε φυσικές συνθήκες, όπως οι αλλαγές στην ηλιακή ακτινοβολία και η επίδραση των μεγάλων ηφαιστειακών εκρήξεων. Συγκεκριμένα όμως από το 1800, οι ανθρωπογενείς δραστηριότητες και κυρίως, η καύση ορυκτών καυσίμων όπως ο γαιάνθρακας, το πετρέλαιο και το φυσικό αέριο, η αποψίλωση των δασών και η κτηνοτροφία αποτελούν τους βασικούς παράγοντες της κλιματικής αλλαγής.

Η ανθρώπινη δραστηριότητα είναι υπεύθυνη σχεδόν για το σύνολο της παγκόσμιας υπερθέρμανσης τα τελευταία 200 χρόνια, με αποτέλεσμα ο πλανήτης να θερμαίνεται σήμερα με ταχύτερο ρυθμό από οποιαδήποτε άλλη στιγμή, τα τελευταία τουλάχιστον δύο χιλιάδες χρόνια. Αυτό έχει ως συνέπεια η μέση θερμοκρασία της επιφάνειας της Γης είναι σήμερα περίπου 1.1°C υψηλότερη από ό,τι ήταν στα τέλη του 1800 (πριν από τη βιομηχανική επανάσταση), θερμότερη από οποιαδήποτε άλλη στιγμή τα τελευταία 100.000 χρόνια, ενώ η τελευταία δεκαετία (2011-2020) ήταν η θερμότερη που έχει καταγραφεί ποτέ [7], [8].



Διάγραμμα 2-2: Μεταβολή της παγκόσμιας επιφανειακής θερμοκρασίας σε σύγκριση με τον μακροπρόθεσμο μέσο όρο από το 1951 έως το 1980 [9].

Ο κύριος παράγοντας της κλιματικής αλλαγής είναι το φαινόμενο του θερμοκηπίου κατά το οποίο η ατμόσφαιρα της Γης δεν μπορεί να αποβάλει πλήρως την ηλιακή ακτινοβολία προς τα ανώτερα στρώματα με αποτέλεσμα αυτή να παγιδεύεται και η επιφάνειά της Γης να θερμαίνεται, γεγονός που οφείλεται στα λεγόμενα αέρια του θερμοκηπίου (GHG).

Πολλά τα αέρια του θερμοκηπίου απαντώνται φυσικά στην ατμόσφαιρα, αλλά οι ανθρώπινες δραστηριότητες αυξάνουν τις συγκεντρώσεις ορισμένων εξ' αυτών όπως το διοξείδιο του άνθρακα (CO_2), το μεθάνιο (CH_4), τα οξείδια του αζώτου (NO_x), οι υδροφθοράνθρακες (CFC_s) και οι υπερφθοράνθρακες (PFC_s).

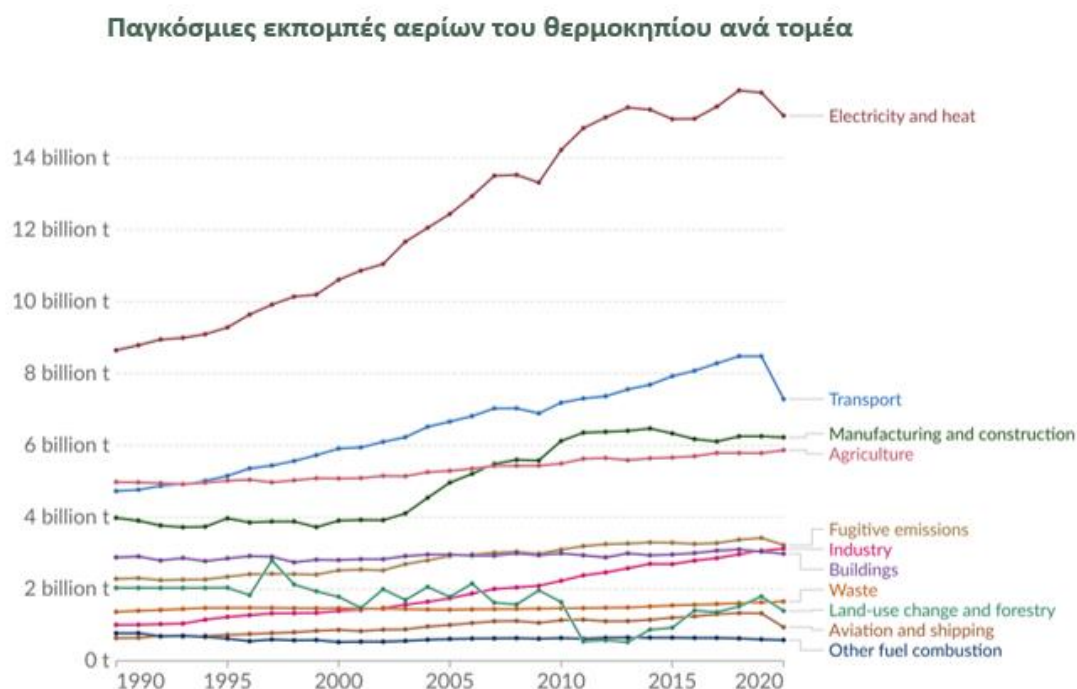
Το CO_2 παράγεται φυσικά από τα ζώα κατά την αναπνοή και μέσω της αποσύνθεσης της βιομάζας, ενώ το CO_2 που προέρχεται από την καύση των ορυκτών καυσίμων είναι ο βασικός υπεύθυνος της υπερθέρμανσης του πλανήτη. Μέχρι το 2020, η συγκέντρωσή του στην ατμόσφαιρα είχε αυξηθεί σε 48% σε σχέση με την προβιομηχανική περίοδο.

Το CH_4 είναι ισχυρότερο αέριο του θερμοκηπίου από το CO_2 αλλά έχει μικρότερη διάρκεια ζωής στην ατμόσφαιρα. Οι εκπομπές του προκύπτουν από την παραγωγή και μεταφορά άνθρακα, φυσικού αερίου και πετρελαίου, καθώς και από κτηνοτροφικές και άλλες

γεωργικές πρακτικές, τη χρήση γης και από την αποσύνθεση των οργανικών αποβλήτων σε χώρους υγειονομικής ταφής αστικών στερεών αποβλήτων.

Τα NO_x , όπως και το CO_2 είναι αέρια του θερμοκηπίου με μεγάλη διάρκεια ζωής που συσσωρεύονται στην ατμόσφαιρα και παραμένουν για δεκαετίες ή και αιώνες. Αυτό το αέριο παράγεται κυρίως ως αποτέλεσμα μικροβιακής δράσης στο έδαφος, χρήσης λιπασμάτων που περιέχουν άζωτο, καύσης ξυλείας και στη χημική παραγωγή. Εκπέμπεται σε γεωργικές και βιομηχανικές δραστηριότητες και κυρίως κατά την καύση ορυκτών καυσίμων και στερεών αποβλήτων.

Οι CFC_s , χρησιμοποιούνται κυρίως για την απορρόφηση θερμότητας σε ψυκτικές εφαρμογές, ως προωθητικά σε σπρέι άσθματος και δοχεία σπρέι τεχνικού αεροζόλ και ως διογκωτικά για αφρούς και σε πυροσβεστήρες. Οι PFC_s είναι ενώσεις που χρησιμοποιούνται συνήθως σε βιομηχανικές διαδικασίες παραγωγής [10].



Διάγραμμα 2-3: Εξέλιξη παγκόσμιων εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου ανά τομέα [11].

2.1.2 Επιπτώσεις

Η αλλαγή του κλίματος αποτελεί πολύ σοβαρή απειλή και οι συνέπειές της επηρεάζουν πολλές διαφορετικές πτυχές της ανθρώπινης ύπαρξης σε όλες τις περιοχές του κόσμου. Η επίδραση της στο φυσικό περιβάλλον καθώς και σε όλες τις εκφάνσεις των φυσικών και ανθρώπινων συστημάτων έχει σημαντικό κοινωνικό, οικονομικό και υγειονομικό αντίκτυπο.

Η κλιματική αλλαγή έχει αυξήσει τη μέση θερμοκρασία του πλανήτη και οδηγεί σε συχνότερες ακραίες συνθήκες υψηλής θερμοκρασίας, όπως οι καύσωνες. Οι υψηλότερες θερμοκρασίες μπορούν να προκαλέσουν αυξημένη θνησιμότητα, μειωμένη

παραγωγικότητα, ζημιές στις υποδομές και μεταβολή της γεωγραφικής κατανομής των κλιματικών ζωνών, με τα πλέον ευάλωτα μέλη του πληθυσμού να είναι περισσότερο εκτεθειμένα στους κινδύνους.

Η στάθμη της θάλασσας ανέβηκε κατά τη διάρκεια του 20ού αιώνα, με την τάση αυτή να έχει επιταχυνθεί τις τελευταίες δεκαετίες. Η άνοδος οφείλεται κυρίως στη θερμική επέκταση των ωκεανών λόγω της αύξησης της θερμοκρασίας, καθώς και στην τήξη παγετώνων και του στρώματος πάγου της Ανταρκτικής.

Λόγω του μεταβαλλόμενου κλίματος παρατηρείται ήδη αύξηση της συχνότητας, της έντασης και της διάρκειας των περιόδων ξηρασίας, δηλαδή περιόδων με έλλειμμα διαθεσιμότητας ύδατος, το οποίο οφείλεται στον συνδυασμό έλλειψης βροχοπτώσεων και αύξησης της εξάτμισης των υδάτων. Οι ξηρασίες έχουν συχνά δευτερογενείς επιπτώσεις, για παράδειγμα στις υποδομές μεταφορών, στη γεωργία, στη δασοκομία, στα ύδατα, στη βιοποικιλότητα και συνδυάζονται με την μείωση της διαθεσιμότητας και της ποιότητας του γλυκού νερού και την εμφάνιση ανεξέλεγκτων πυρκαγιών.

Παράλληλα, απόρροια της κλιματικής αλλαγής είναι και η αύξηση των βροχοπτώσεων σε πολλές περιοχές. Οι έντονες βροχοπτώσεις για παρατεταμένες περιόδους οδηγούν κυρίως σε υπερχειλίση ποταμών, ενώ οι σύντομες, έντονες νεροποντές μπορούν να προκαλέσουν πλημμύρες κατάκλισης, κατά τις οποίες οι ακραίες βροχοπτώσεις προκαλούν πλημμύρες χωρίς υπερχειλίση υδατικού συστήματος [12], [13].

2.2 Διεθνής και Ευρωπαϊκή Κλιματική Πολιτική

Η εμβληματικότερη πολυμερής, διεθνής συνθήκη για την καταπολέμηση της κλιματικής αλλαγής, η «Συμφωνία του Παρισιού», πρόκειται για μια νομικά δεσμευτική συμφωνία που υιοθετήθηκε από 196 κράτη μέλη στο πλαίσιο της Σύμβασης Πλαισίου των Ηνωμένων Εθνών για την Κλιματική Αλλαγή (UNFCCC) στο Παρίσι το 2015 (COP21). Μακροπρόθεσμος στόχος της συμφωνίας είναι ο περιορισμός της ανόδου της παγκόσμιας θερμοκρασίας σε επίπεδα κάτω των 2°C, σε σχέση με τα προβιομηχανικά επίπεδα, προωθώντας τη σταθεροποίηση της ανόδου κάτω τους 1.5°C [14]. Ωστόσο, το 2018 η έκδοση της πρώτης λεπτομερούς ανάλυσης για τις καταστροφικές επιπτώσεις που θα είχε παγκοσμίως η άνοδος της μέσης θερμοκρασίας κατά 1.5°C από την Διακυβερνητική Επιτροπή για την Κλιματική Αλλαγή (IPCC), ώθησε την παγκόσμια κοινότητα να υιοθετήσει τον στόχο των 1.5°C [15].

Η Ευρώπη δείχνοντας τις προθέσεις της να ηγηθεί της παγκόσμιας προσπάθειας αναστολής της κλιματικής κρίσης, αποσκοπεί στο να αποτελέσει την πρώτη κλιματικά ουδέτερη ήπειρο έως το 2050, με ενδιάμεσο στόχο την εσωτερική μείωση των καθαρών εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου κατά τουλάχιστον 55%, σε σχέση με τα επίπεδα του 1990, έως το 2030 (Fit for 55%) στο πλαίσιο της Ευρωπαϊκής Πράσινης Συμφωνίας (European Green Deal), η οποία δρομολογήθηκε από την Ευρωπαϊκή Επιτροπή το 2019 και έλαβε νομική ισχύ με τον Ευρωπαϊκό Νόμο για το Κλίμα (European Climate Law) δύο χρόνια αργότερα [16], [17].

Οι παραπάνω αποφάσεις επικυρώθηκαν εκ νέου στην πιο πρόσφατη Σύμβαση Πλαισίου των Ηνωμένων Εθνών για την Κλιματική Αλλαγή (UNFCCC) στο Ντουμπάι τον περασμένο Δεκέμβριο (COP28). Στην διάσκεψη, η Ευρωπαϊκή Ένωση και οι παγκόσμιοι ηγέτες

δεσμεύτηκαν εκ νέου να επιτύχουν τους στόχους της «Συμφωνίας του Παρισιού» και να περιορίσουν την αύξηση της μέσης παγκόσμιας θερμοκρασίας στον 1.5°C. Συμφώνησαν να επιταχύνουν την κατάργηση των ορυκτών καυσίμων και να αναλάβουν δράση για την μείωση των καθαρών εκπομπών CO₂ κατά 43% έως το 2030 με στόχο την επίτευξη της παγκόσμιας κλιματικής ουδετερότητας έως το 2050 [18].

2.3 Το Υδρογόνο ως Μέσο Απανθρακοποίησης

Η καταπολέμηση της κλιματικής αλλαγής θα απαιτήσει ριζική ενεργειακή μετάβαση. Ο ενεργειακός τομέας, που περιλαμβάνει την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, τις μεταφορές, τη θέρμανση και τη βιομηχανία, είναι υπεύθυνος για περισσότερο από το 70% των παγκόσμιων εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου. Η επίτευξη κλιματικής ουδετερότητας θα απαιτήσει να περιοριστεί σημαντικά η χρήση ορυκτών καυσίμων στον ενεργειακό τομέα, αντικαθιστώντας τα με ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και άλλα καύσιμα ουδέτερων η χαμηλών εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα, όσο το δυνατόν περισσότερο.

Ως άμεση συνέπεια, το μερίδιο της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές και κλιματικά ουδέτερους φορείς πρόκειται να αντικαταστήσει σταδιακά όλες τις σημερινές χρήσεις ορυκτών καυσίμων. Ένα τέτοιο επίτευγμα θα απανθρακοποιήσει σε μεγάλο βαθμό την ηλεκτρική ενέργεια έως το 2030 και θα την θέσει στην τροχιά της κλιματικής ουδετερότητας έως το 2050.

Ωστόσο, ο ενεργειακός μετασχηματισμός συνοδεύεται από μια σειρά προκλήσεων που πρέπει να αντιμετωπιστούν. Η σημαντική ανάπτυξη ανανεώσιμων πηγών ενέργειας θα απαιτήσει επίσης την ανάπτυξη λύσεων αποθήκευσης και έξυπνων δικτύων ικανών να αντιμετωπίσουν το μεταβλητό προφίλ παραγωγής. Ταυτόχρονα, ο εξηλεκτρισμός με χρήση ανανεώσιμων πηγών αναμένεται να απανθρακοποιήσει μεγάλο μερίδιο, αλλά όχι το σύνολο, της κατανάλωσης. Το υδρογόνο έχει μεγάλες δυνατότητες να γεφυρώσει ένα μέρος αυτού του χάσματος ως φορέας αποθήκευσης και ως φορέας μεταφοράς ενέργειας, εξασφαλίζοντας εφεδρείες για τις εποχικές διακυμάνσεις και σύνδεση των τόπων παραγωγής με πιο απομακρυσμένα κέντρα ζήτησης.

Ταυτόχρονα, το υδρογόνο μπορεί να αντικαταστήσει τα ορυκτά καύσιμα σε ορισμένες βιομηχανικές διεργασίες υψηλής έντασης άνθρακα, όπως στον τομέα του χάλυβα ή των χημικών, μειώνοντας τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου και ενισχύοντας περαιτέρω την ανταγωνιστικότητα των εν λόγω βιομηχανιών. Μπορεί να προσφέρει λύσεις για να μειώσει τις εκπομπές σε τμήματα του συστήματος μεταφορών στα οποία η μείωση αυτή είναι αδύνατο να σημειωθεί μέσω της ηλεκτροκίνησης. Η σταδιακή υιοθέτηση των λύσεων υδρογόνου μπορεί να συνδυαστεί με την αναπροσαρμογή της χρήσης και την επαναχρησιμοποίηση της υφιστάμενης υποδομής φυσικού αερίου για να μεταφέρει και να αποθηκεύσει αυτό το υδρογόνο, συμβάλλοντας στην επίτευξη των κλιματικών στόχων με ταχύτερο και οικονομικά αποδοτικό τρόπο [19].

Οι παραπάνω δυνατότητες και εφαρμογές του υδρογόνου, ως φορέα ενέργειας, σε ένα ενοποιημένο μελλοντικό βιώσιμο ενεργειακό σύστημα, συνοψίζονται με την σύλληψη Power-to-X, η οποία καταμερίζεται στα εξής «μονοπάτια»:

- Power-to-Hydrogen
- Power-to-Gas
- Power-to-Liquid
- Power-to-Chemicals
- Power-to-Power

2.3.1 Power-to-Hydrogen, PtH

Μεταξύ των ενεργειακών φορέων στους οποίους ο ηλεκτρισμός δύναται να μετατραπεί το υδρογόνο αποτελεί έναν ευέλικτο, μηδενικών εκπομπών ενεργειακό φορέα με εφαρμογές σε όλο το ενεργειακό φάσμα, αποτελώντας αναπόσπαστο μέρος του Power-to-X. Η εξάρτηση από τα ορυκτά καύσιμα, οι ανθρακικές εκπομπές και η επιβολή οικονομικών κυρώσεων που επιβάλλονται στις συμβατικές τεχνολογίες παραγωγής υδρογόνου, αποτελούν σημείο καμπής για την ευρεία υιοθέτηση τεχνολογιών ηλεκτρόλυσης του νερού, οι οποίες θα τροφοδοτούνται από την πλεονάζουσα ηλεκτρική ενέργεια των ΑΠΕ ή και από το δίκτυο. Το παραγόμενο υδρογόνο μπορεί να αποθηκευτεί και να μεταφερθεί σε δεξαμενές υψηλής συμπίεσης, να εγχυθεί στο δίκτυο φυσικού αερίου, να χρησιμοποιηθεί σε οχήματα βαρέως τύπου η από άμεσους βιομηχανικούς καταναλωτές και να συνδυαστεί με άλλες πρώτες ύλες για την παραγωγή διαφορετικών προϊόντων.

2.3.2 Power-to-Gas, PtG

Το PtG πρόκειται για προέκταση του PtH, κατά την οποία το υδρογόνο μετατρέπεται σε συνθετικό φυσικό αέριο (SNG), το οποίο επιτρέπει την μεταφορά της αποθηκευμένης σε αέριο ανανεώσιμης ενέργειας στις υπάρχουσες υποδομές. Το υδρογόνο αντιδρά με το CO_2 , σε μια χημική ή βιολογική αντίδραση μεθανοποίησης. Το αντιδρών CO_2 , δεσμεύεται σε πηγές υψηλής συγκέντρωσης ή ακόμη και από τον ατμοσφαιρικό αέρα (DAC), γεγονός που θα συμβάλει στην οικοδόμηση ενός ανθρακικά ουδέτερου, ή ακόμη και αρνητικού, ενεργειακού συστήματος. Εκτός της μεθανοποίησης του CO_2 , με ηλεκτρολυτικό υδρογόνο, το PtG περιλαμβάνει και την αναβάθμιση του βιοαερίου, το οποίο προέρχεται από την αεριοποίηση της βιομάζας ή την αναερόβια χώνευση οργανικών υλικών καθώς και την ηλεκτροχημική αναγωγή του CO_2 σε CO και την παραγωγή ενός ευρέος φάσματος ουσιών, όπως οι αλκοόλες, το μεθάνιο, το μεθανικό οξύ και άλλοι υδρογονάνθρακες.

2.3.3 Power-to-Liquid, PtL

Μια ακόμη εναλλακτική μέθοδος αξιοποίησης του δεσμευμένου CO_2 και του ηλεκτρολυτικού υδρογόνου είναι η παραγωγή υγρών καυσίμων, καθώς η μελλοντική οικονομία θα συνεχίζει να βασίζεται σε αυτά, ως ασφαλείς φορείς ενέργειας και μέσα χημικής αποθήκευσης χάρη στην υψηλή ενεργειακή πυκνότητά τους. Ένα από τα πράσινα καύσιμα, είναι η μεθανόλη προερχόμενη από την υδρογόνωση του CO_2 η την διαδικασία CAMERE κατά την οποία δύο αντιδραστήρες είναι συνδεδεμένοι σειριακά με σκοπό την

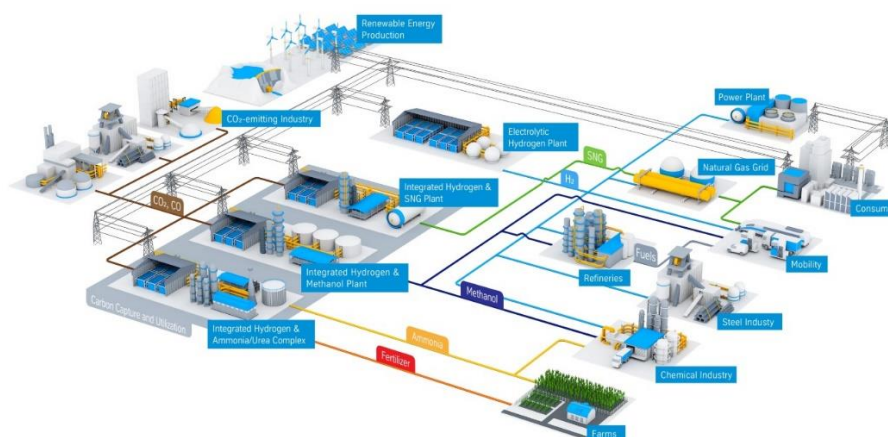
διάσπαση του CO_2 σε CO και H_2O και την αφυδάτωση του σε $CO/CO_2/H_2$ στον πρώτο (RWGS) και τη σύνθεση της μεθανόλης στον δεύτερο. Παράλληλα, η αφυδάτωση της μεθανόλης σε όξινο καταλύτη σε πίεση περιβάλλοντος αποτελεί βασική αντίδραση που αποδίδει διμεθυλαιθέρα, ένα εναλλακτικό υγρό καύσιμο καθαρής καύσης που δύναται να αντικαταστήσει το diesel και άλλα συμβατικά καύσιμα.

2.3.4 Power-to-Chemicals, PtC

Η παραγωγή χημικών από ηλεκτρολυτικό υδρογόνο εστιάζεται κυρίως στην παραγωγή πράσινης αμμωνίας, η οποία σήμερα αποτελεί δομικό υλικό των γεωργικών λιπασμάτων ενώ μέλλεται να αποτελέσει φορέα υδρογόνου και ανανεώσιμο καύσιμο. Συγκεκριμένα το παραγόμενο ανανεώσιμο υδρογόνο σε συνδυασμό με το άζωτο προερχόμενο από την κλασματική απόσταξη του αέρα, συνθέτουν αμμωνία μέσω της αντίδρασης Haber-Bosh. Παράλληλα με την αμμωνία το υδρογόνο δύναται να χρησιμοποιηθεί και για την παραγωγή ελαφρών ολεφινών, όπως το αιθυλένιο και το προπυλένιο τα οποία αποτελούν δομικά στοιχεία της σημερινής χημικής βιομηχανίας.

2.3.5 Power-to-Power, PtP

Ορισμένοι από τους φορείς ενέργειας X που αναφέρθηκαν παραπάνω είναι δυνατόν να επαναμετατραπούν σε ηλεκτρική ενέργεια, παρέχοντας έτσι μια ενεργειακή λύση ανεξάρτητη των χρονικών και τοπογραφικών περιορισμών παραγωγής της πρωτογενούς ενέργειας. Ειδικότερα, το ίδιο το υδρογόνο δύναται να μετατραπεί σε ηλεκτρική ενέργεια μέσω κυψελών καυσίμου η ακόμα και θερμικών μηχανών, ενώ παράλληλα τα παραγόμενα από ηλεκτρολυτικό υδρογόνο ανανεώσιμα υγρά και αέρια καύσιμα, μπορούν εύκολα να αποθηκευτούν και να χρησιμοποιηθούν για την κάλυψη της ζήτησης, με αξιοποίηση ήδη υπάρχοντων συμβατικών υποδομών και τεχνολογιών, αφού προηγηθούν οι απαραίτητες μετατροπές [20], [21].



Εικόνα 2-1: Σχηματική αναπαράσταση Power-to-X [22].

2.4 Ευρωπαϊκή Πολιτική για το Υδρογόνο

Η ανάπτυξη του καθαρού υδρογόνου στο ενοποιημένο ενεργειακό σύστημα του μέλλοντος σε μεγάλη κλίμακα και με ταχείς ρυθμούς είναι καίριας σημασίας για να ανταποκριθεί η ΕΕ στις κλιματικές της φιλοδοξίες. Για να μπορέσει το υδρογόνο να διεκδικήσει αυτή τη θέση στο ενεργειακό μείγμα, θα απαιτηθεί, μεταξύ άλλων, η βελτίωση της ανταγωνιστικότητάς του έναντι άλλων ενεργειακών φορέων, η έρευνα και η καινοτομία σε πρωτοποριακές τεχνολογίες και ένα δίκτυο υποδομών που θα μπορεί να το μεταφέρει σε μία γεωγραφικά ευρεία αγορά.

Στο πλαίσιο αυτό εγκρίθηκε η «Στρατηγική για το υδρογόνο για μια κλιματικά ουδέτερη Ευρώπη» στις 8 Ιουλίου 2020 και πρότεινε σημεία δράσης πολιτικής σε 5 τομείς: επενδυτική στήριξη· στήριξη της παραγωγής και της ζήτησης· δημιουργία αγοράς και υποδομών υδρογόνου· έρευνα και συνεργασία και διεθνή συνεργασία και προέβλεπε τις εξής τρεις φάσεις [23]:

- 1^η φάση, 2020-2024: Εγκατάσταση ηλεκτρολυτικών κυψελών παραγωγής ανανεώσιμου υδρογόνου με ισχύ τουλάχιστον 6 GW στην ΕΕ και παραγωγή έως 1 εκατομμυρίου τόνων ανανεώσιμου υδρογόνου. Απανθρακοποίηση της υφιστάμενης παραγωγής υδρογόνου και διευκόλυνση της υιοθέτησης της κατανάλωσης υδρογόνου σε νέες εφαρμογές τελικής χρήσης.
- 2^η φάση, 2025-2030: Εγκατάσταση ηλεκτρολυτικών κυψελών ανανεώσιμου υδρογόνου ισχύος τουλάχιστον 40 GW και παραγωγή έως και 10 εκατομμυρίων τόνων ανανεώσιμου υδρογόνου στην ΕΕ. Υδρογόνο ως αναπόσπαστο μέρος ενός ενοποιημένου ενεργειακού συστήματος.
- 3^η φάση, 2030-2050: Επίτευξη ωριμότητας και ανάπτυξη ευρείας κλίμακας για τις τεχνολογίες υδρογόνου από ανανεώσιμες πηγές, χρήση σε όλους τους δύσκολα απανθρακοποιήσιμους τομείς, όπου άλλες εναλλακτικές λύσεις ενδέχεται να μην είναι εφικτές ή να έχουν υψηλότερο κόστος.

Την ίδια ακριβώς περίοδο με την έγκριση της στρατηγικής της ΕΕ για το υδρογόνο, η Ευρωπαϊκή Επιτροπή παρουσίασε την «Στρατηγική της ΕΕ για την Ενοποίηση του Ενεργειακού Συστήματος», της οποίας το υδρογόνο αποτελεί σημαντικό μέρος. Στόχος αυτής είναι η διασύνδεση των διαφόρων φορέων ενέργειας μεταξύ τους και με τους τομείς τελικής χρήσης με στόχο την βελτιστοποίηση του ενεργειακού συστήματος στο σύνολό του.

Έκτοτε, η δέσμη μέτρων «Fit for 55» τον Ιούλιο του 2021, υπέβαλε μια σειρά νομοθετικών προτάσεων που μετουσιώνουν την ευρωπαϊκή στρατηγική για το υδρογόνο σε συγκεκριμένο ευρωπαϊκό πλαίσιο πολιτικής. Σε συνδυασμό με την δέσμη μέτρων για την «Αγορά Υδρογόνου και Απανθρακοποιημένου Φυσικού Αερίου», υποβλήθηκαν οι προτάσεις για τον καθορισμό στόχων για την υιοθέτηση του ανανεώσιμου υδρογόνου στη βιομηχανία και τις μεταφορές καθώς και για τη στήριξη της δημιουργίας ειδικών υποδομών και μιας αποδοτικής αγοράς υδρογόνου.

Με τη δημοσίευση του σχεδίου «REPowerEU» τον Μάιο του 2022, η Επιτροπή συμπληρώνει την εφαρμογή της στρατηγικής της ΕΕ για το υδρογόνο για την περαιτέρω αύξηση των ευρωπαϊκών φιλοδοξιών για το ανανεώσιμο υδρογόνο ως σημαντικού φορέα ενέργειας για την απεξάρτηση από τις εισαγωγές ρωσικού φυσικού αερίου, θέτοντας ως στόχο την η παραγωγή 10 εκατομμυρίων τόνων και την εισαγωγή άλλων 10 εκατομμυρίων τόνων ανανεώσιμου υδρογόνου στην ΕΕ έως το 2030. Οι δράσεις του σχεδίου επικεντρώνονται στην επιτάχυνση της υιοθέτησης ανανεώσιμου υδρογόνου, αμμωνίας και άλλων παραγώγων σε τομείς που είναι δύσκολο να απαλλαγούν από τις ανθρακούχες εκπομπές, όπως οι μεταφορές και οι ενεργοβόρες βιομηχανικές διεργασίες.

Το πλαίσιο πολιτικής ολοκληρώθηκε με δύο κατ' εξουσιοδότηση πράξεις, οι οποίες εκδόθηκαν τον Ιουνίου του 2023 οι οποίες καλύπτουν τα ανανεώσιμα καύσιμα μη βιολογικής προέλευσης (RFNBO), καθορίζουν τα κριτήρια για τα προϊόντα που εμπίπτουν στην κατηγορία «ανανεώσιμο υδρογόνο» και προτείνουν ένα λεπτομερές σύστημα για τον υπολογισμό των εκπομπών κύκλου ζωής τους.

Επενδυτικά, τα έργα υδρογόνου υποστηρίζονται σε όλο το μήκος της αλυσίδα αξίας από το σχέδιο ανάκαμψης «NextGenerationEu» και το σχέδιο «Important Projects of Common European Interest (IPCEIs)», με τα πρώτα προγράμματα να εγκρίνονται τον Ιούλιο 2022. Σε οριστική ισχύ αναμένεται να τεθεί και η ,έως σήμερα πιλοτική, «Ευρωπαϊκή Τράπεζα Υδρογόνου», ενός χρηματοδοτικού μέσου που θα αποσκοπεί στην δημιουργία επενδυτικής ασφάλειας και επιχειρηματικών ευκαιριών για την ευρωπαϊκή και παγκόσμια παραγωγή ανανεώσιμου υδρογόνου [24].

3 Θεωρητικό Υπόβαθρο

Παρότι το ανανεώσιμο υδρογόνο έχει αναδειχθεί ως ο πλέον υποσχόμενος φορέας ενέργειας για το μέλλον, διάφορες εναλλακτικές τεχνολογίες και πηγές είναι είτε διαθέσιμες είτε υπό ανάπτυξη, για να καλύψουν την παρούσα ζήτηση και να συνεισφέρουν στην κλιμάκωση της οικονομίας του υδρογόνου. Η παραγωγή υδρογόνου περιλαμβάνει ποικίλους πόρους και ενεργειακές απαιτήσεις, ανάλογα με την μέθοδο παραγωγής του. Κατά συνέπεια, η βιομηχανία προσπάθησε να καθιερώσει ένα σύστημα ταξινόμησης για αυτόν τον ενεργειακό φορέα, χρησιμοποιώντας χρώματα που υποδηλώνουν τη μέθοδο παραγωγής, τους πόρους που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή ενέργειας και τις εκπομπές που παράγονται κατά τη διαδικασία [25].

3.1 Χρωματική Κατηγοριοποίηση Υδρογόνου

Στον Πίνακα 3-1 παρουσιάζεται η εκτενής χρωματική κατηγοριοποίηση του υδρογόνου με βάση την μέθοδο παραγωγής και τις προκύπτουσες εκπομπές CO_2 , σύμφωνα με την ενημερωμένη βιβλιογραφία [25], [26].

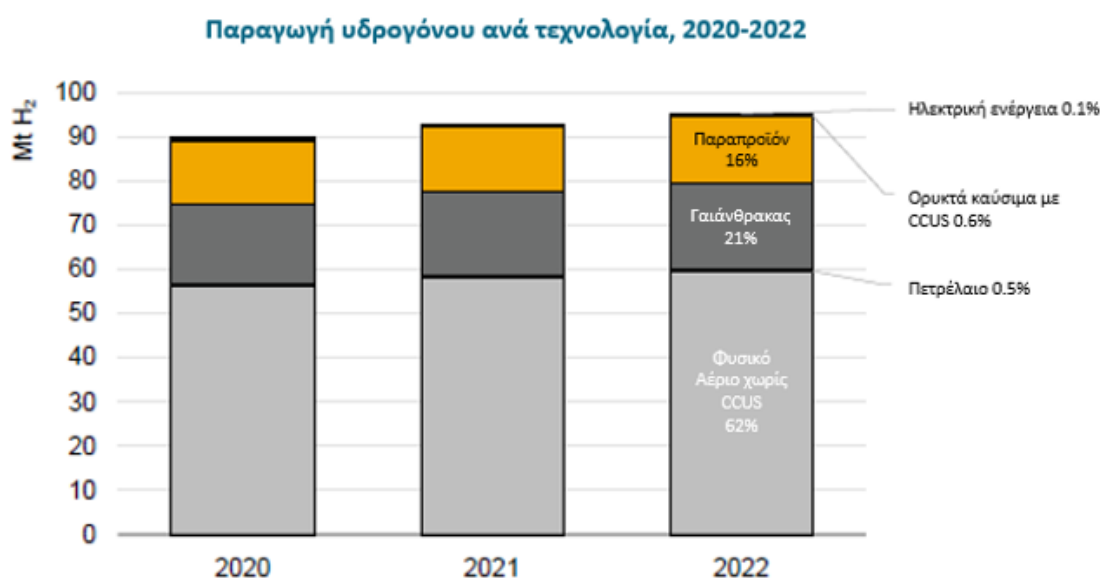
Πίνακας 3-1: Χρωματική κατηγοριοποίηση υδρογόνου.

Χρώμα	Μέθοδος Παραγωγής	Εκπομπές CO_2
Γκρι	Αναμόρφωση μεθανίου με ατμό (SMR)	Υψηλές
Μπλε	Αναμόρφωση μεθανίου με ατμό (SMR) και παράλληλη δέσμευση, αποθήκευση (CCS) ή και επαναχρησιμοποίηση CO_2 (CCUS)	Χαμηλές
Τουρκουάζ	Πυρόλυση μεθανίου και δέσμευση στερεού C	Χωρίς άμεσες εκπομπές CO_2
Πράσινο	Ηλεκτρόλυση νερού από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας	Χωρίς άμεσες εκπομπές CO_2
Κίτρινο	Ηλεκτρόλυση νερού από ηλιακή ενέργεια	Χωρίς άμεσες εκπομπές CO_2
Πορτοκαλί	Ηλεκτρόλυση νερού από ενέργεια δικτύου	Εξαρτάται από το ενεργειακό μείγμα του δικτύου
Μαύρο	Αεριοποίηση λιθάνθρακα	Υψηλές
Καφέ	Αεριοποίηση λιγνίτη/βιομάζας	Υψηλές
Ροζ	Ηλεκτρόλυση νερού από πυρηνική ενέργεια	Χωρίς άμεσες εκπομπές CO_2

Μωβ	Ηλεκτρόλυση και θερμοχημική διάσπαση νερού με χρήση πυρηνικής ενέργειας και θερμότητας	Χωρίς άμεσες εκπομπές CO_2
Κόκκινο	Καταλυτική διάσπαση νερού σε υψηλή θερμοκρασία με χρήση πυρηνικής θερμικής ενέργειας	Χωρίς άμεσες εκπομπές CO_2
Άσπρο	Απαντάται φυσικά στο περιβάλλον	-

3.2 Επισκόπηση και Προοπτικές Μεθόδων Παραγωγής Υδρογόνου

Η παγκόσμια παραγωγή υδρογόνου έφτασε σχεδόν τους 95 Mt το 2022, σημειώνοντας αύξηση κατά 3% σε σχέση με το 2021, με τα ορυκτά καύσιμα να κυριαρχούν στην παραγωγή. Το φυσικό αέριο χωρίς δέσμευση, αποθήκευση και αξιοποίηση (CCUS), αντιπροσώπευσε το 62% της παραγωγής, ενώ 21% του παραγόμενου υδρογόνου παράχθηκε από γαιάνθρακα. Το υδρογόνο ως παραπροϊόν, παραγόμενο σε διυλιστήρια και την πετροχημική βιομηχανία από την αναμόρφωση νάφθας, αντιστοιχούσε στο 16% της παγκόσμιας παραγωγής. Η παραγωγή υδρογόνου χαμηλών εκπομπών το 2022 ήταν χαμηλότερη από 1 Mt και προερχόταν σχεδόν εξ' ολοκλήρου από ορυκτά καύσιμα με παράλληλη δέσμευση, αποθήκευση και αξιοποίηση του CO_2 (CCUS), με την παραγωγή υδρογόνου προερχόμενο από ηλεκτρόλυση να ανέρχεται σε λιγότερο από 100 kt, όπως παρουσιάζεται στο Διάγραμμα 3-1.



Διάγραμμα 3-1: Παραγωγή υδρογόνου ανά τεχνολογία, 2020-2022 [3].

Παρότι το παραγόμενο υδρογόνο από ηλεκτρόλυση αντιστοιχεί σήμερα μόλις στο 0.1% της παγκόσμιας παραγωγής, η εγκατεστημένη ισχύς των ηλεκτρολυτών αναμένεται να αυξηθεί εκθετικά στα επόμενα έτη. Συγκεκριμένα, βάσει των έργων που έχουν ανακοινωθεί η παγκόσμια εγκατεστημένη ισχύς θα μπορούσε να φτάσει τις 175 GW, η ακόμη και τις 420 GW έως το 2030, εάν ληφθούν υπόψιν και τα έργα που βρίσκονται σε πρώιμη φάση.

Κατ' αντιστοιχία, η ετήσια παραγωγή υδρογόνου χαμηλών εκπομπών από ορυκτά καύσιμα με CCUS, εάν υλοποιηθούν όλα ανακοινωθέντα έργα, αναμένεται από 0.6 Mt το 2022 να φτάσει τους 9 Mt, η ακόμη και τους 12 Mt έως το 2030, εάν ληφθούν υπόψιν και τα έργα που βρίσκονται σε πρώιμη φάση [3].

3.3 Παραγωγή Πράσινου Υδρογόνου

Η παραγωγή υδρογόνου από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας αποτελεί μια από τις μεγαλύτερες προκλήσεις για ένα ενεργειακά βιώσιμο μέλλον. Η ηλεκτρόλυση του νερού αποτελεί μια διαδικασία γνωστή για περισσότερα από 200 χρόνια, κατά την οποία τα μόρια του νερού διασπώνται σε υδρογόνο και οξυγόνο με την εφαρμογή της κατάλληλης ενέργειας και προκαλώντας μια αντίδραση οξειδοαναγωγής. Σήμερα, ορισμένες τεχνολογίες ηλεκτρόλυσης βρίσκονται πλέον σε ώριμο βιομηχανικό και εμπορικό στάδιο με την δυνατότητα παραγωγής τους σε μεγάλη κλίμακα να διαφαίνεται εφικτή στο άμεσο μέλλον.

3.3.1 Αρχές Ηλεκτρόλυσης Νερού



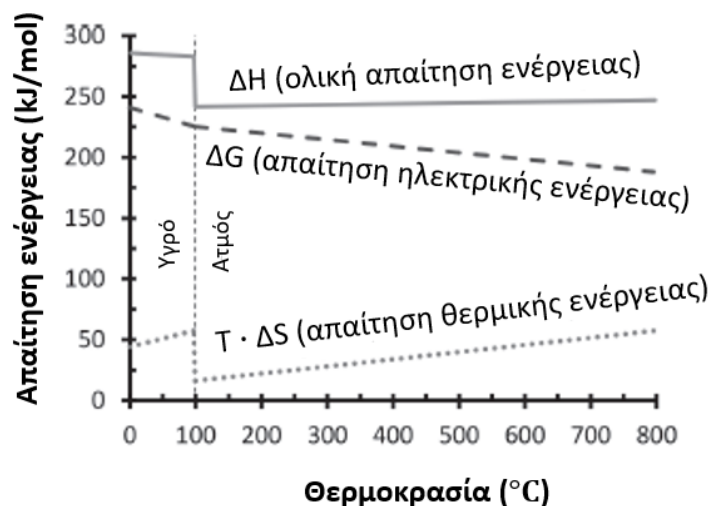
Κατά την ηλεκτρόλυση, συνεχές ρεύμα ασκείται στο νερό μέσω ενός ζεύγους ηλεκτροδίων. Το θετικό ηλεκτρόδιο ονομάζεται άνοδος ενώ το αρνητικό κάθοδος. Στην άνοδο λαμβάνει χώρα η ημιαντίδραση παραγωγής οξυγόνου (OER), ενώ στην κάθοδο η ημιαντίδραση παραγωγής υδρογόνου (HER), με την συνολική αντίδραση να είναι η Εξίσωση 3.1. Μεταξύ των ηλεκτροδίων συμβαίνει μεταφορά ηλεκτρονίων και ιόντων. Τα αρνητικά ιόντα (ανιόντα) δίνουν ηλεκτρόνια στην άνοδο, ενώ τα θετικά ιόντα (κατιόντα) παίρνουν ηλεκτρόνια από την κάθοδο.

3.3.2 Θερμοδυναμική Ηλεκτρόλυσης Νερού

Η αντίδραση της ηλεκτρόλυσης είναι μια ενδόθερμη διεργασία και συνεπώς απαιτεί πρόσδοση ενέργειας από εξωτερική πηγή. Η παρεχόμενη ενέργεια μπορεί να έχει την μορφή ηλεκτρικής ενέργειας ή θερμότητας, όπως φαίνεται στην Εξίσωση 3.2.

$$\Delta H = \Delta G + T \cdot \Delta S \quad 3.2$$

Όπου ΔH η συνολική ενέργεια (ενθαλπία) που απαιτείται για την πραγματοποίηση της αντίδρασης. Η ενέργεια αυτή μπορεί να προέρχεται από θερμική πηγή (εντροπία, $T \cdot \Delta S$) ή από ηλεκτρική (ελεύθερη ενέργεια Gibbs, ΔG). Σε συνθήκες αναφοράς 25°C, 1bar, οι παράμετροι αυτοί λαμβάνουν τιμές: $\Delta H^0 = 285.88 \text{ kJ/kmol}$, $\Delta G^0 = 237.23 \text{ kJ/kmol}$ και $T \cdot \Delta S^0 = 48.65 \text{ kJ/kmol}$, ενώ η διακύμανση των παραμέτρων αυτών συναρτήσει της θερμοκρασίας παρουσιάζεται στο Διάγραμμα 2-2.



Διάγραμμα 3-2: Απαίτηση ηλεκτρικής ενέργειας, θερμότητας και ολικής ενέργειας ηλεκτρόλυσης συναρτήσει της θερμοκρασίας [27].

3.3.2.1 Τάση Κελιού

Η αντιστρέψιμη τάση U_{rev} ορίζεται ως η ελάχιστη απαραίτητη τάση που χρειάζεται να ασκηθεί μεταξύ ανόδου και καθόδου ώστε να συμβεί η ηλεκτρόλυση, στην περίπτωση όπου η απαιτούμενη ενέργεια προσδίδεται από συνδυασμό ηλεκτρικής και θερμικής πηγής. Από θερμοδυναμικής σκοπιάς η απαραίτητη τάση που πρέπει να ασκηθεί μεταξύ των ηλεκτροδίων υπολογίζεται σύμφωνα με την Εξίσωση 3.3:

$$U_{rev} = \frac{\Delta G}{2 \cdot F} \quad 3.3$$

Η αντιστρέψιμη τάση σε συνθήκες αναφοράς είναι: $U_{rev}^0 = 1.23 \text{ V}$.

Στην περίπτωση όπου οι συνθήκες της αντίδρασης είναι αδιαβατικές και η απαιτούμενη ενέργεια προέρχεται αποκλειστικά από ηλεκτρική πηγή, η ελάχιστη απαραίτητη τάση που

χρειάζεται να ασκηθεί μεταξύ ανόδου και καθόδου ώστε να συμβεί η ηλεκτρόλυση, ονομάζεται θερμοουδέτερη και υπολογίζεται σύμφωνα με την Εξίσωση 3.4:

$$U_{tn} = \frac{\Delta H}{2 \cdot F} \quad 3.4$$

Η αντιστρέψιμη τάση σε συνθήκες αναφοράς είναι: $U_{tn}^0 = 1.48 \text{ V}$.

Λόγω των μη αντιστρέψιμων απωλειών και για την κατάλυση της αντίδρασης, η τάση που εφαρμόζεται στο κελί είναι πάντα μεγαλύτερη από την U_{tn} κατά ένα υπερδυναμικό, λόγω της μη αντιστρεψιμότητας της αντίδρασης που οφείλεται κυρίως της επίδρασης της ενέργειας ενεργοποίησης και στις ωμικές αντιστάσεις της μεμβράνης. Συνεπώς η ασκούμενη στο κελί τάση, U_{cell} , υπολογίζεται σύμφωνα με την Εξίσωση 3.5.

$$U_{cell} = U_{ocv} + U_{act} + U_{ohm} + U_{conc} \quad 3.5$$

Όπου U_{ocv} η τάση ανοιχτού κυκλώματος, U_{act} η τάση ενεργοποίησης, U_{ohm} η ωμική τάση και U_{conc} η τάση συγκέντρωσης [27], [28]. Η κατηγοριοποίηση των υπερδυναμικών και η μέθοδος υπολογισμού της ασκούμενης στο κελί τάσης παρουσιάζεται αναλυτικά παρακάτω στην εργασία, στο κεφάλαιο: «Θεωρητική Μοντελοποίηση PEM».

Ανάλογα με την τιμή της ασκούμενης τάσης κελιού διακρίνονται τρεις ζώνες λειτουργίας:

Ζώνη 1: Όταν η τάση κελιού είναι μεγαλύτερη από την θερμοουδέτερη ($U_{cell} > U_{tn}$). Στην περίπτωση αυτή η ηλεκτρόλυση επιτυγχάνεται και η πλεονάζουσα ενέργεια Q_1 απορρίπτεται με την μορφή θερμότητας η οποία χρειάζεται να απομακρυνθεί μέσω του ψυκτικού κυκλώματος του ηλεκτρολύτη και υπολογίζεται σύμφωνα με την Εξίσωση 3.6.

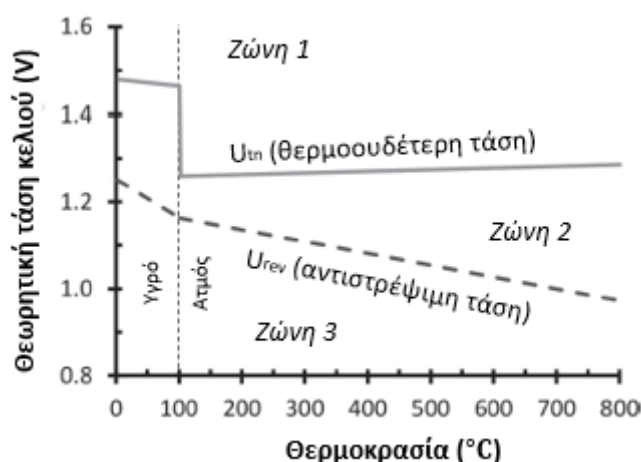
$$Q_1 = (U_{cell} - U_{tn}) \cdot I \quad 3.6$$

Ζώνη 2: Όταν η τάση κελιού είναι μεταξύ της αντιστρέψιμης και της θερμοουδέτερης ($U_{tn} > U_{cell} > U_{rev}$). Στην περίπτωση αυτή η ηλεκτρόλυση επιτυγχάνεται μόνο εφόσον προσδοθεί στον ηλεκτρολύτη θερμότητα Q_2 , η οποία υπολογίζεται σύμφωνα με την Εξίσωση 3.7.

$$Q_2 = (U_{tn} - U_{cell}) \cdot I \quad 3.7$$

Ζώνη 3: Όταν η τάση κελιού μικρότερη της αντιστρέψιμης ($U_{cell} < U_{rev}$). Στην περίπτωση αυτή η ηλεκτρόλυση είναι αδύνατο να πραγματοποιηθεί [27].

Η επίδραση της θερμοκρασίας στην αντιστρέψιμη και θερμοουδέτερη τάση και οι ζώνες λειτουργίας του κελιού παρουσιάζονται στο Διάγραμμα 3-3.



Διάγραμμα 3-3: Αντιστρέψιμη και θερμοουδέτερη τάση ηλεκτρόλυσης συναρτήσει της θερμοκρασίας [27].

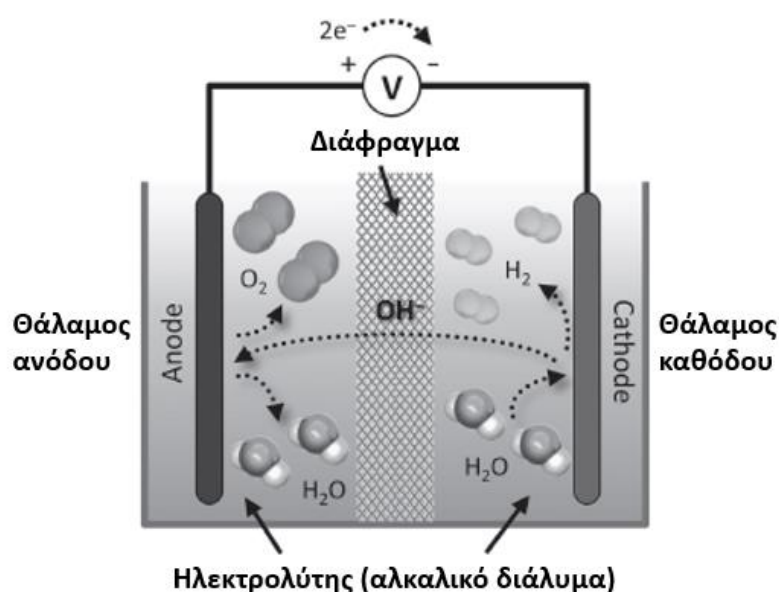
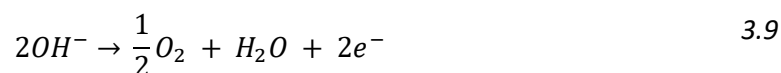
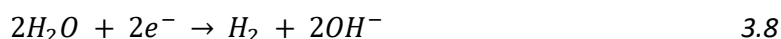
3.4 Τεχνολογίες Ηλεκτρόλυσης Νερού

Έχοντας περιγράψει τις βασικές χημικές και θερμοδυναμικές αρχές που διέπουν την ηλεκτρόλυση του νερού, παρακάτω θα παρουσιαστούν οι τρεις κύριες τεχνολογίες ηλεκτρόλυσης: η αλκαλική ηλεκτρόλυση (AEL), η ηλεκτρόλυση μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων (PEMEL) και η ηλεκτρόλυση στερεού οξειδίου (SOEL). Από αυτές μόνο η αλκαλική ηλεκτρόλυση και η ηλεκτρόλυση μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων είναι σε ώριμο εμπορικό στάδιο ενώ οι ηλεκτρολύτες στερεού οξειδίου συνιστούν μια υποσχόμενη τεχνολογία η οποία προς το παρόν βρίσκεται σε προχωρημένη φάση έρευνας και ανάπτυξης [29], [30].

3.4.1 Αλκαλική Ηλεκτρόλυση Νερού, AEL

Η παραγωγή υδρογόνου μέσω αλκαλικής ηλεκτρόλυσης αποτελεί την πλέον διαδεδομένη και εδραιωμένη τεχνολογία ηλεκτρόλυσης, εμπορικά διαθέσιμη σε κλίμακα MW. Κατά την AEL τα δύο ηλεκτρόδια βρίσκονται βυθισμένα σε ένα αλκαλικό διάλυμα $H_2O - NaOH/KOH$, και ένα πορώδες διάφραγμα διαχωρίζει τον θάλαμο ανόδου και καθόδου, επιτρέποντας την ιοντική μεταφορά OH^- . Όταν η απαιτούμενη τάση ασκηθεί μεταξύ των ηλεκτροδίων λαμβάνουν χώρα οι οξειδοαναγωγές σε άνοδο και κάθοδο. Συγκεκριμένα η αντίδραση αναγωγής 3.8, του νερού σε υδρογόνο (HER) συμβαίνει στην κάθοδο

παράγοντας OH^- . Τα παραγόμενα OH^- διαπερνούν το διάφραγμα κατευθυνόμενα στον ανοδικό θάλαμο προσφέροντας τα ηλεκτρόνια τους τα οποία αντιδρώντας με το νερό κατά την ημιαντίδραση οξείδωσης 3.9 παράγεται το οξυγόνο (OER).



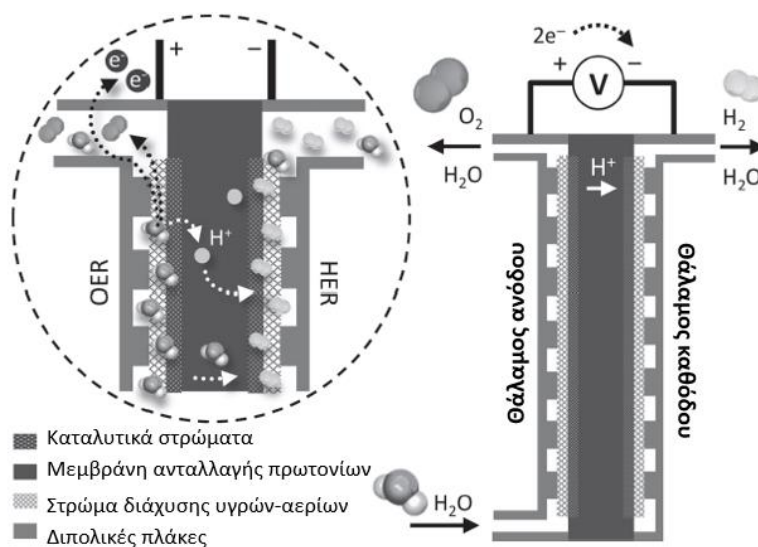
Εικόνα 3-1: Σχηματική απεικόνιση αλκαλικού ηλεκτρολύτη [27].

Η αλκαλική ηλεκτρόλυση πραγματοποιείται σε χαμηλές θερμοκρασίες 30 – 85 °C σε αλκαλικό μίγμα νερού συγκέντρωσης 20 – 30% $NaOH/KOH$. Τα ηλεκτρόδια χρειάζεται να διαθέτουν υψηλή αντοχή σε διάβρωση, καλή αγωγιμότητα, καταλυτικές ιδιότητες και δομική ακεραιότητα, συνεπώς τα ηλεκτρόδια είναι κατασκευασμένα συνήθως από Ni, Co, Ru ή Mo. Το διάφραγμα στην μέση του ηλεκτρολυτικού κελίου επιτρέπει την ιοντική μεταφορά αλλά αποτρέπει την ανάμειξη των παραγόμενων αερίων μεταξύ των θαλάμων. Στις μέρες μας, τα διαφράγματα που χρησιμοποιούνται κατασκευάζονται από υλικά όπως πολυσουλφόνη, οξείδιο του ζirkονίου, ενισχυμένη πολυαιθοροσουλφόνη, ίνες γυαλιού και οξείδιο του νικελίου. Ωστόσο οι σημαντικότεροι περιορισμοί της τεχνολογίας αυτής είναι η χαμηλή επιτρεπόμενη πυκνότητα ρεύματος, η χαμηλή πίεση των παραγόμενων αερίων και η χαμηλή απόδοση του ηλεκτρολύτη [27], [31].

3.4.2 Ηλεκτρόλυση Μεμβράνης Ανταλλαγής Πρωτονίων, PEMEL

Η ηλεκτρόλυση μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων αναμένεται να αυξήσει το μερίδιο της στην αγορά έναντι της αλκαλικής ηλεκτρόλυσης κυρίως εξαιτίας των συγκριτικών της

πλεονεκτημάτων που έχουν να κάνουν με τον συμπαγή σχεδιασμό, την υψηλή καθαρότητα του παραγόμενου υδρογόνου, την υψηλή πυκνότητα ρεύματος, την υψηλή απόδοση και την δυνατότητα άμεσης απόκρισης καθιστώντας την ιδανική για σύζευξη με ανανεώσιμες πηγές ενέργειας [3], [32]. Η αρχή λειτουργίας των εν λόγω ηλεκτρολυτών βασίζεται στην χρήση της λεγόμενης μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων (PEM). Η μεμβράνη αυτή είναι βυθισμένη σε απιονισμένο νερό χωρίζοντας το κελί στους θαλάμους ανόδου και καθόδου. Η μεμβράνη αυτή δρα ως στερεός πολυμερής ηλεκτρολύτης (SPE), επιτρέποντας την μεταφορά H^+ που παράγονται στην άνοδο και διαχωρίζοντας τα παραγόμενα αέρια. Με εφαρμογή της απαραίτητης τάσης στο κελί και παροχή του απιονισμένου νερού στον θάλαμο ανόδου λαμβάνει χώρα η ημιαντίδραση παραγωγής οξυγόνου (OER) 3.10 απελευθερώνοντας οξυγόνο και H^+ . Τα παραγόμενα H^+ κατευθύνονται μέσω της μεμβράνης μαζί με τα ηλεκτρόνια κυκλοφορούν μέσω του ηλεκτρικού κυκλώματος, προς την κάθοδο. Στην κάθοδο τα H^+ συνδυάζονται με τα ηλεκτρόνια κατά την ημιαντίδραση παραγωγής υδρογόνου (HER) [27].



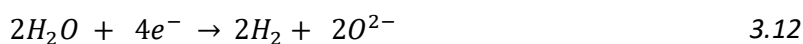
Εικόνα 3-2: Σχηματική απεικόνιση ηλεκτρολύτη μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων [27].

Οι μεμβράνες χαρακτηρίζονται από υψηλή ιοντική αγωγιμότητα, χαμηλό πάχος και αντοχή σε υψηλές πιέσεις, ενώ είναι ικανές να λειτουργούν σε θερμοκρασίες 20 – 80 °C και πυκνότητες ρεύματος ακόμα και άνω των 2 Acm⁻². Στα καταλυτικά στρώματα της καθόδου και της ανόδου χρησιμοποιούνται υψηλής δραστηριότητας ευγενή μέταλλα, όπως το Pt/Pd και IrO₂/RuO₂ αντίστοιχα, γεγονός που καθιστά την PEMEL ακριβότερη από την ηλεκτρόλυση αλκαλικού νερού, ενώ για την μεμβράνη ανταλλαγής πρωτονίων χρησιμοποιούνται στις πλείστες των εφαρμογών μεμβράνες από υπερφθοροσουλφονικά οξέα, τύπου Nafion®. Το στρώμα διάχυσης υγρών-αερίων αποτελείται από πορώδεις

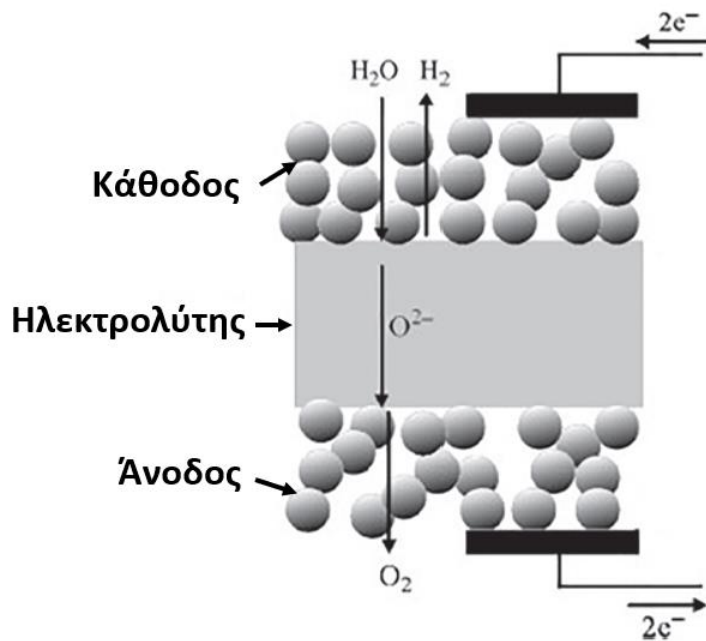
μεταλλικές επιστρώσεις που δεν λαμβάνουν μέρος στην ηλεκτροχημική αντίδραση αλλά μεταφέρει το ρεύμα από την μεμβράνη στις διπολικές πλάκες οι οποίες αποτελούνται από τιτάνιο, ανοξείδωτο χάλυβα και γραφίτη και είναι υπεύθυνες για την παροχή του ηλεκτρολύτη με νερό και την απομάκρυνση των αέριων προϊόντων [27], [31].

3.4.3 Ηλεκτρόλυση Στερεού Οξειδίου, SOEL

Οι ηλεκτρολύτες στερεού οξειδίου ανήκουν στην κατηγορία ηλεκτρόλυσης υψηλών θερμοκρασιών και αποτελούν την πιο αποδοτική τεχνολογία ηλεκτρόλυσης. Σημαντικές προσπάθειες έρευνας και ανάπτυξης καταβάλλονται για την συγκεκριμένη τεχνολογία με τους ηλεκτρολύτες αυτούς να έχουν αναπτυχθεί σε στάδιο επίδειξης και να πλησιάζουν άμεσα την εμπορευματική αξιοποίηση [3], [27], [29]. Οι ηλεκτρολύτες στερεού οξειδίου λειτουργούν σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες 500 – 1000 °C γεγονός που τους επιτρέπει να λειτουργούν σε τάση κελιού ακόμα και μικρότερη από την θερμοουδέτερη τάση. Για να επιτευχθεί αυτό τα υλικά του ηλεκτρολύτη πρέπει να είναι ανθεκτικά στο θερμοκρασιακό εύρος λειτουργίας, με τα κεραμικά υλικά να βρίσκουν συνήθως εφαρμογή. Η αρχή λειτουργίας του ηλεκτρολύτη εδράζεται στην χρήση μιας κεραμικής μεμβράνης η οποία λειτουργεί ως ηλεκτρολύτης στερεού οξειδίου επιτρέποντας την ιοντική μεταφορά. Συγκεκριμένα η κάθοδος τροφοδοτείται με ατμό υψηλής θερμοκρασίας, ο οποίος ανάγεται παράγοντας υδρογόνο και ανιόντα οξυγόνου σύμφωνα με την αντίδραση (HER) 3.12. Τα τελευταία διέρχονται μέσω της κεραμικής μεμβράνης στην άνοδο όπου οξειδώνονται παράγοντας οξυγόνο (OER) σύμφωνα με την αντίδραση 3.13.



Ο στερεός ηλεκτρολύτης θα πρέπει να είναι χημικά ευσταθής και να διαθέτει καλή ιοντική και χαμηλή ηλεκτρική αγωγιμότητα, ενώ παράλληλα θα πρέπει να είναι λεπτός με στόχο την ελαχιστοποίηση των ωμικών απωλειών. Γενικά, τον ηλεκτρολύτη συνθέτει ένα μίγμα οξειδίων αποτελούμενο από ZrO_2/Y_2O_3 το οποίο δρα ως κεραμική μεμβράνη. Τα ηλεκτρόδια του ηλεκτρολύτη είναι επίσης από κεραμικά πορώδη υλικά, τα οποία διευκολύνουν την αγωγή των ηλεκτρονίων και την μεταφορά μάζας αερίων. Παράλληλα, το κελί διαθέτει και διασυνδέσεις που χρησιμεύουν στην μεταφορά του ηλεκτρικού ρεύματος και διαχωρίζουν την άνοδο του ενός κελιού από την κάθοδο του γειτονικού του. Ωστόσο η απαίτηση σε ατμό και θερμικής πηγής υψηλής θερμοκρασίας, συνηγορούν στην έλλειψη σταθερότητας επιταχύνουν την διάβρωση, εισάγοντας περιορισμούς στην διάδοση της τεχνολογίας σε μεγάλη κλίμακα [27], [31].



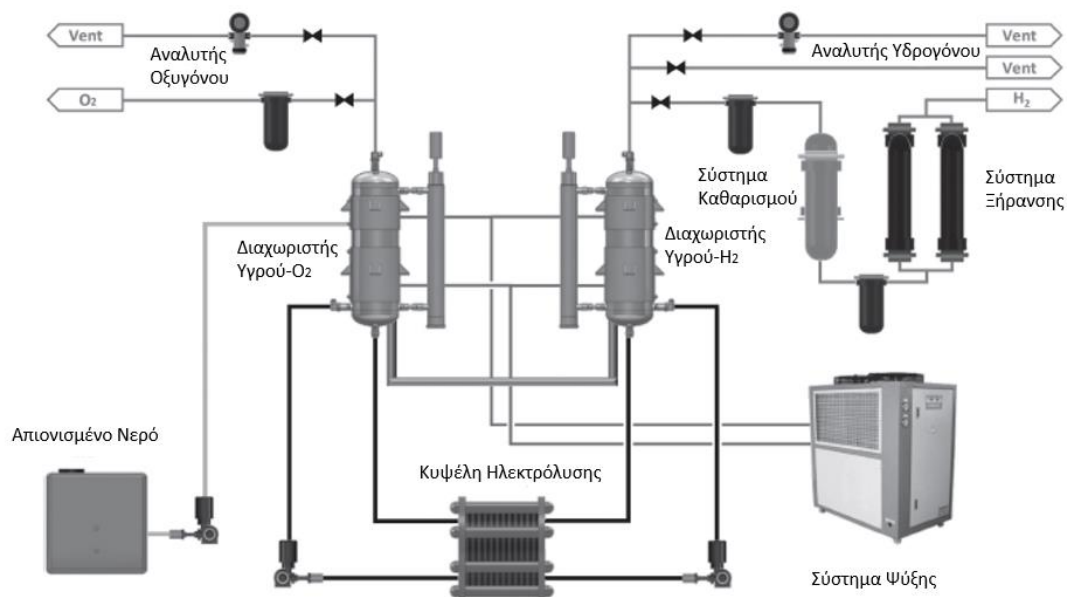
Εικόνα 3-3: Σχηματική απεικόνιση ηλεκτρολύτη στερεού οξειδίου [27].

3.4.4 Περιφερειακά Συστήματα Συστήματος Ηλεκτρόλυσης

Παρόλο που ο ηλεκτρολύτης αποτελεί το θεμελιώδες εξάρτημα ενός συστήματος ηλεκτρόλυσης, μια σειρά υποσυστημάτων είναι απαραίτητη για την εύρυθμη λειτουργία των κελιών και την ανάκτηση των παραγόμενων αερίων στις επιθυμητές συνθήκες. Σε γενικές γραμμές τα υποσυστήματα που πλαισιώνουν τον ηλεκτρολύτη σε συστήματα ηλεκτρόλυσης χαμηλών θερμοκρασιών (AEL και PEM) απεικονίζονται στην Εικόνα 3-4 και είναι τα εξής:

- **Σύστημα παροχής ενέργειας:** Το σύστημα αυτό είναι υπεύθυνο για την τροφοδοσία της μονάδας ηλεκτρόλυσης με συνεχές ρεύμα.
- **Σύστημα απιονισμένου νερού:** Το σύστημα αυτό είναι υπεύθυνο για την πλήρωση του ηλεκτρολύτη με την απαραίτητη ποσότητα νερού. Το αντιδρών νερό χρειάζεται να είναι απιονισμένο με συγκεκριμένη καθαρότητα και αγωγιμότητα ώστε να αποφεύγεται η πιθανή μόλυνση του καταλύτη και της/του μεμβράνης/διαφράγματος.
- **Σύστημα διαχωρισμού αερίων-υγρών:** Τα παραγόμενα αέρια εγκαταλείπουν τον ηλεκτρολύτη διαλυμένα στον υγρό (νερό/αλκαλικό διάλυμα NaOH/KOH) που δεν αντέδρασε κατά την ηλεκτρόλυση. Το διφασικό αυτό διάλυμα διαχωρίζεται μέσω διαχωριστών και τα προϊόντα αέρια ανακτώνται ενώ το υγρό ανατροφοδοτείται στον ηλεκτρολύτη και συμμετέχει εκ νέου στην αντίδραση.
- **Σύστημα ξήρανσης:** Τα αέρια ρεύματα που εξέρχονται από τους διαχωριστές διέρχονται εν συνεχεία από το υποσύστημα ξήρανσης (παγίδες συμπυκνώματος, φίλτρα, ψύκτες κλπ.) με στόχο την απομάκρυνση του πιθανού ατμού.

- Σύστημα Καθαρισμού: Σε περιπτώσεις που απαιτείται υψηλής καθαρότητας υδρογόνο, το παραγόμενο αέριο τροφοδοτείται σε έναν αντιδραστήρα όπου το παρασιτικό οξυγόνο αντιδρά με καταλύτες, συνήθως παλλάδιο, και σχηματίζει νερό το οποίο και απομακρύνεται.
- Σύστημα διαχείρισης θερμότητας: Το σύστημα αυτό είναι υπεύθυνο για την απομάκρυνση της πλεονάζουσας θερμότητας από την ηλεκτρολυτική συστοιχία , με στόχο την διατήρηση του επιθυμητού θερμοκρασιακού επιπέδου.
- Σύστημα ανάλυσης παραγόμενων αερίων: Μικρή ποσότητα του παραγόμενου υδρογόνου και οξυγόνου αποστέλλονται σε αναλυτές που διαπιστώνουν τα επίπεδα συγκέντρωσης και καθαρότητας τους.
- Σύστημα παρακολούθησης και ελέγχου: Στο σύστημα αυτό συγκεντρώνονται όλες οι μετρήσεις (πιέσεις, θερμοκρασίες, παροχές) από τους αισθητήρες της εγκατάστασης και αυτό λαμβάνοντας τα απαραίτητα μέτρα εξασφαλίζει την ασφαλή λειτουργία της.



Εικόνα 3-4: Σχηματική αναπαράσταση εγκατάστασης συστήματος ηλεκτρόλυσης [27].

3.5 Σύγκριση Τεχνολογιών Ηλεκτρόλυσης

Στον Πίνακα 3-2 συνοψίζονται σε αντιπαραβολή τα τεχνολογικά χαρακτηριστικά των τριών κύριων μεθόδων ηλεκτρόλυσης [27],[31].

Πίνακας 3-2: Τεχνολογικά χαρακτηριστικά μεθόδων ηλεκτρόλυσης.

AEL	PEMEL	SOEL
-----	-------	------

Ηλεκτρόδια και Καταλύτες	Άνοδος: Ni, Fe, οξειδία μετάλλων Κάθοδος: Ni/Ni-Co, οξειδία μετάλλων	Άνοδος: Ti+Ti/RuO ₂ , IrO ₂ Κάθοδος: Γραφίτης, Ti+Pt, Pd	Άνοδος: Κεραμική (Mn,La,Cr),Ni Κάθοδος: Zr+Ni/CeOx
Διαχωριστής	Διάφραγμα (NiO, PAM, ZrO ₂)	PEM μεμβράνη	Κεραμική Μεμβράνη
Ηλεκτρολύτης	KOH/NaOH	PFSA, συνήθως Nafion	ZrO ₂ – Y ₂ O ₃ , Sc ₂ O ₃ – ZrO ₂ , MgO – ZrO ₂ , CaO – ZrO ₂
Ιοντική Μεταφορά	OH ⁻	H ⁺	O ²⁻
Θερμοκρασία (°C)	30-85	20-80	500-1000
Πίεση (bar)	<30	<35	1-5
Πυκνότητα Ρεύματος (A/cm ²)	0.2-0.6	≤2	≤2
Κατανάλωση Ενέργειας (kWh/Nm ³ H ₂)	4.3-5.0	4.2-4.7	3.2-3.7
Διάρκεια Ζωής (h)	>95,000	50,000-75,000	Δεν έχει προσδιορισθεί
Βαθμός Απόδοσης	60%-70%	70%-80%	85%-95%
Πλεονεκτήματα	Εμπορικά ανεπτυγμένη τεχνολογία, μεγαλύτερη ανθεκτικότητα, χαμηλότερα κόστη	Εμπορικά ανεπτυγμένη τεχνολογία, υψηλή πίεση προϊόντων αερίων, υψηλές πυκνότητες ρεύματος	Χαμηλή κατανάλωση ενέργειας, χαμηλές απαιτήσεις ποιότητας νερού
Μειονεκτήματα	Διάβρωση, χαμηλή πίεση προϊόντων αερίων, απαίτηση συστήματος καθαρισμού	Υψηλά κόστη καταλυτών και μεμβράνης, υψηλές απαιτήσεις ποιότητας νερού	Περιορισμένο πεδίο εφαρμογών λόγω υψηλών θερμοκρασιών, μειωμένη διάρκεια ζωής λόγω θερμικής καταπόνησης

Στους Πίνακες 3-3 – 3-5 συνοψίζονται οι υφιστάμενοι «Καίριοι Δείκτες Απόδοσης (ΚΡΙ)» και οι προβλεπόμενες μελλοντικές τους τιμές, σε μια κλιμακωμένη οικονομία υδρογόνου [19].

Πίνακας 3-3: Καίριοι δείκτες απόδοσης αλκαλικής ηλεκτρόλυσης.

Αλκαλική Ηλεκτρόλυση ΑΕΙ

Παράμετρος	Μονάδα	Έτος Αναφοράς	Μελλοντικοί Στόχοι	
		2020	2024	2030
Κατανάλωση ενέργειας στην ονομαστική ισχύ	kWh/kg	50	49	48
Κόστη κεφαλαίου – CAPEX	€/(kg/d)	1250	1000	800
	€/kW	600	480	400
Κόστη συντήρησης και λειτουργίας - OPEX	€/(kg/d)/y	50	43	35
Χρόνος εκκίνησης θερμής εφεδρείας	sec	60	30	10
Χρόνος ψυχρής εκκίνησης	sec	3600	900	300
Υποβάθμιση απόδοσης	%/1000h	0.12	0.11	0.1

Πίνακας 3-4:Καίριοι δείκτες απόδοσης ηλεκτρόλυσης μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων.

Ηλεκτρόλυση Μεμβράνης Ανταλλαγής Πρωτονίων PEMEL

Παράμετρος	Μονάδα	Έτος Αναφοράς	Μελλοντικοί Στόχοι	
		2020	2024	2030
Κατανάλωση ενέργειας στην ονομαστική ισχύ	kWh/kg	55	52	48
Κόστη κεφαλαίου – CAPEX	€/(kg/d)	2100	1550	1000
	€/kW	900	700	500
Κόστη συντήρησης και λειτουργίας - OPEX	€/(kg/d)/y	41	30	21
Χρόνος εκκίνησης θερμής εφεδρείας	sec	2	1	1
Χρόνος ψυχρής εκκίνησης	sec	30	10	10
Υποβάθμιση απόδοσης	%/1000h	0.19	0.15	0.12

Πίνακας 3-5:Καίριοι δείκτες απόδοσης ηλεκτρόλυσης στερεού οξειδίου.

Ηλεκτρόλυση Στερεού Οξειδίου SOEL

Παράμετρος	Μονάδα	Έτος Αναφοράς	Μελλοντικοί Στόχοι	
		2020	2024	2030

Κατανάλωση ενέργειας στην ονομαστική ισχύ		40	39	37
	kWh/kg			
Κατανάλωση θερμότητας στην ονομαστική ισχύ		9.9	9	8
Κόστη κεφαλαίου – CAPEX	€/(kg/d) €/kW	3550 2130	2000 1250	800 520
Κόστη συντήρησης και λειτουργίας - OPEX	€/(kg/d)/y	410	130	45
Χρόνος εκκίνησης θερμής εφεδρείας	sec	600	300	180
Χρόνος ψυχρής εκκίνησης	h	12	8	4
Υποβάθμιση απόδοσης	%/1000h	1.9	1	0.5

3.6 Ανάκτηση Απορριπτόμενης Θερμότητας

Η μείωση της κατανάλωσης ενέργειας με αύξηση της ενεργειακής απόδοσης αποτελεί ζωτικής σημασίας συνιστώσα για τη μετάβαση σε καθαρή ενέργεια. Η αναθεωρημένη οδηγία της Ευρωπαϊκής Ένωσης για την ενεργειακή απόδοση στα πλαίσια της δέσμης μέτρων «Fit for 55», του ευρωπαϊκού «Green Deal», προτάσσει την μείωση της κατανάλωσης ενέργειας κατά 11.7% ως το 2030, σε σύγκριση με τις προβλέψεις του σεναρίου αναφοράς της ΕΕ για το 2020, με έμφαση στα κτίρια, τις μεταφορές και τη βιομηχανία [33], [16]. Το μελλοντικό ενεργειακό σύστημα επιβάλλεται να είναι αξιόπιστο, προσιτό και καθαρό. Για την επίτευξη αυτού του στόχου απαιτείται ένα ενοποιημένο ενεργειακό σύστημα που θα εδράζεται σε έξυπνους συνδυασμούς τεχνολογιών και στην σύζευξη τομέων, έτσι ώστε η προσφορά και η ζήτηση ενέργειας να ικανοποιούνται τόσο χρονικά και χωρικά [33]. Η διείσδυση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, η ανάπτυξη τεχνολογιών πολυπαραγωγής και ο συνδυασμός τους με συστήματα αποθήκευσης ενέργειας θα αποτελέσουν την βάση για την δημιουργία συστημάτων μηδενικού αποτυπώματος άνθρακα που θα εξασφαλίζουν την αποδοτική αξιοποίηση ενέργειας με οικονομικά βιώσιμους και περιβαλλοντικά αποδεκτούς όρους [34].

Η βιομηχανική απορριπτόμενη θερμότητα είναι ενέργεια που παράγεται από βιομηχανικές διεργασίες και δεν χρησιμοποιείται, παρά απορρίπτεται στο περιβάλλον και χάνεται, επιφέροντας σημαντικές ενεργειακές απώλειες. Η ανάκτηση της θερμότητας αυτής μπορεί να επιτευχθεί με πληθώρα τεχνολογιών, η αξιοποίηση των οποίων δύναται να βελτιώσει τον συνολικό βαθμό απόδοσης της εγκατάστασης και να μειώσει τα λειτουργικά κόστη, μετατρέποντας ή και ανατροφοδοτώντας την απορριπτόμενη θερμική ενέργεια σε κάποιον άλλον ενεργειακό καταναλωτή [35]. Έτσι και στις εγκαταστάσεις ηλεκτρόλυσης χαμηλών θερμοκρασιών με την απόδοση να κυμαίνεται 60%-80%, θερμότητα παράγεται ως παραπροϊόν η οποία απορρίπτεται στο περιβάλλον χωρίς να αξιοποιείται. [4], [36]. Στο

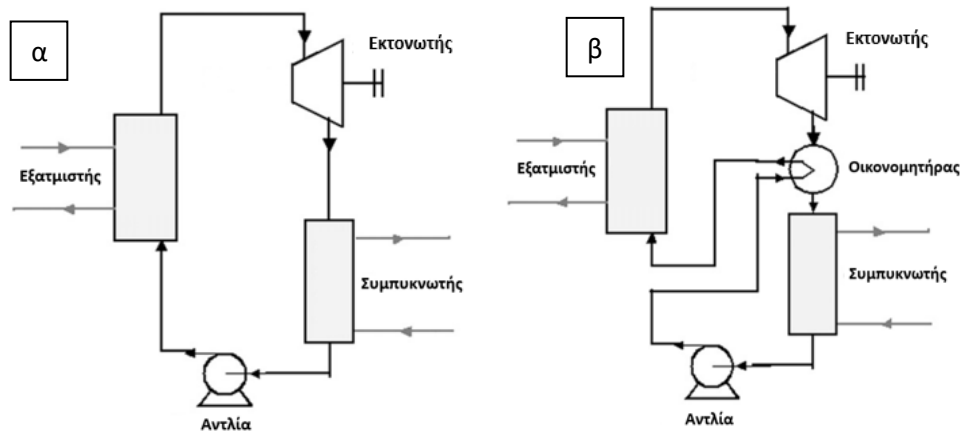
παρόν κεφάλαιο θα παρουσιαστούν ορισμένες τεχνολογίες ανάκτησης της απορριπτόμενης θερμότητας, οι οποίες συνδυαζόμενες με ένα σύστημα ηλεκτρόλυσης χαμηλής θερμοκρασίας θα μπορούσαν να αξιοποιήσουν την χαμένη ενέργεια και να αυξήσουν τον συνολικό βαθμό απόδοσης της εγκατάστασης.

3.6.1 Οργανικός Κύκλος Rankine, ORC

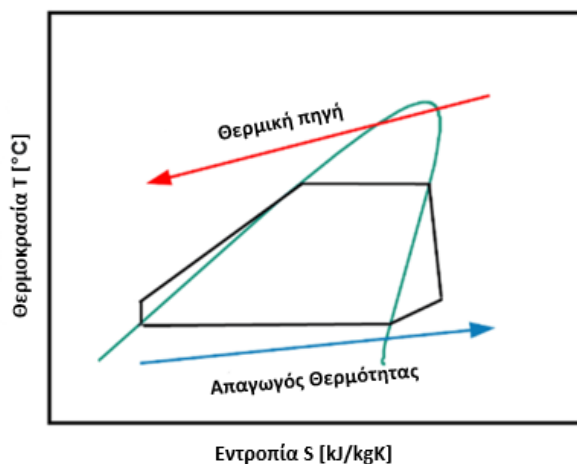
Ο Οργανικός Κύκλος Rankine (ORC), είναι ένας θερμοδυναμικός κύκλος Clausius-Rankine, στον οποίο το εργαζόμενο μέσο αντί για νερό-ατμό είναι ένα οργανικό ρευστό και κατά τον οποίο παράγεται ηλεκτρική ενέργεια στην γεννήτρια του εκτονωτή αξιοποιώντας μία θερμική πηγή στον εξατμιστή [37]. Εξαιτίας των χαμηλών θερμοκρασιών ατμοποίησης των οργανικών ρευστών, ο ORC καθίσταται κατάλληλη τεχνολογία για την αξιοποίηση πηγών θερμότητας χαμηλής θερμοκρασίας όπως για παράδειγμα η ηλιακή και γεωθερμική ενέργεια, η βιομάζα και η απορριπτόμενη θερμότητα από βιομηχανικές διεργασίες, μηχανολογικό εξοπλισμό και καυσαέρια μηχανών εσωτερικής καύσης [38], [39]. Παράλληλα, ο ORC λειτουργεί σε χαμηλότερες πιέσεις συγκριτικά με τον κύκλο νερού-ατμού, γεγονός που μειώνει την καταπόνηση των μηχανολογικών εξαρτημάτων αλλά και το κόστος τους. Ο θερμοκός βαθμός απόδοσης εμπορικών συστημάτων ORC κυμαίνεται μεταξύ 2%-19% κατά μέσο όρο [40].

3.6.1.1 Θερμοδυναμικός Κύκλος ORC

Η διάταξη ενός ORC είναι κάπως απλούστερη από αυτή του συμβατικού κύκλου Rankine, μιας και παραλείπεται το τύμπανο νερού ατμού ενώ για τις τρεις φάσεις της ατμοποίησης: προθέρμανση, εξάτμιση, υπερθέρμανση, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένας εναλλάκτης θερμότητας [39]. Ένας απλός ORC αποτελείται από τέσσερα βασικά εξαρτήματα: μια αντλία, έναν συμπυκνωτή, έναν εξατμιστή και έναν εκτονωτή όπως φαίνεται στην Εικόνα 3-5,α. Κατά την διεργασία το χαμηλής πίεσης οργανικό ρευστό εξέρχεται από τον συμπυκνωτή σε κατάσταση κορεσμένου υγρού και έπειτα αντλείται στον εξατμιστή. Εκεί το εργαζόμενο ρευστό εξατμίζεται εναλλάσσοντας θερμότητα με την θερμική πηγή και αποχωρεί από τον εξατμιστή ως κορεσμένος ατμός υψηλής πίεσης. Έπειτα κατευθύνεται στον εκτονωτή της εγκατάστασης όπου αποτονώνεται παράγοντας ισχύ. Τέλος ο χαμηλής πλέον πίεσης ατμός εισέρχεται στον συμπυκνωτή και αφού εναλλάξει θερμότητα με τον απαγωγό θερμότητας εξέρχεται με την μορφή κορεσμένου υγρού χαμηλής πίεσης και συμμετέχει εκ νέου στον κύκλο [41]. Οι παραλλαγές του ORC είναι περιορισμένες, με την πιο συνηθισμένη να είναι η προσθήκη ενός οικονομητήρα μεταξύ της εξόδου της αντλίας και της εξόδου του εκτονωτή όπως φαίνεται στην Εικόνα 3-5,β.



Εικόνα 3-5: Μονογραμμικό κύκλωμα α) απλού ORC β) ORC με οικονομητήρα [39].



Εικόνα 3-6:Θερμοδυναμικό διάγραμμα T-s απλού ORC και ORC με οικονομητήρα [42].

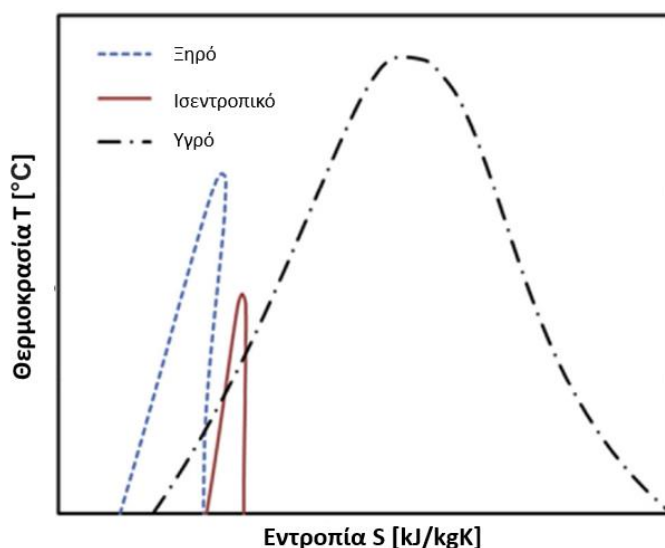
3.6.1.2 Εργαζόμενο Μέσο

Ένα από τα βασικά χαρακτηριστικά που θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη κατά τον σχεδιασμό ενός συστήματος ORC είναι η επιλογή ενός κατάλληλου εργαζόμενου μέσου.

Τα θερμοδυναμικά χαρακτηριστικά του εργαζόμενου μέσου, όπως αυτά περιγράφονται από την καμπύλη κορεσμού του (κρίσιμη θερμοκρασία και πίεση, θερμοκρασίες και πιέσεις κορεσμού, διακύμανση λανθάνουσας ενθαλπίας κ.α.) και η συμβατότητά τους με το υπό εξέταση σύστημα (θερμοκρασία θερμικής πηγής και απαγωγού θερμότητας) επηρεάζουν άμεσα τον θερμικό βαθμό απόδοσης και την παραγόμενη ισχύ της εγκατάστασης. Εκτός από τις θερμοδυναμικές παραμέτρους του εργαζόμενου μέσου θα πρέπει να ληφθούν υπόψη κάποιες περιβαλλοντικές-κανονιστικές παράμετροι οι σημαντικότερες από τις οποίες είναι η τοξικότητα, η ευφλεκτότητα και κυρίως οι περιβαλλοντικοί δείκτες ODP (Ozon Depletion Potential) και GWP (Global Warming Potential) [37],[43].

Γενικά τα οργανικά ρευστά χωρίζονται στις εξής τρεις κατηγορίες, με βάση την κλίση της καμπύλης κορεσμού τους: υγρά, ισεντροπικά, ξηρά όπως φαίνεται στο Διάγραμμα 3-4.

- Τα υγρά μέσα έχουν αρνητική καμπύλη κορεσμένου ατμού και έχουν την τάση να εισέρχονται σε διφασική περιοχή μετά από την εκτόνωση, συνεπώς η υπερθέρμανση τους στην είσοδο του εκτονωτή κρίνεται αναγκαία για την αποφυγή σχηματισμού συμπυκνώματος και την διάβρωσή του.
- Τα ισεντροπικά μέσα έχουν πρακτικά ισεντροπική καμπύλη κορεσμένου ατμού και ως αποτέλεσμα παραμένουν κορεσμένα και έπειτα από την εκτόνωση.
- Τα ξηρά μέσα έχουν θετική κλίση και συνεπώς στην έξοδο του εκτονωτή βρίσκονται σε κατάσταση υπέρθερμου ατμού. Ομοίως με τα ισεντροπικά τα ξηρά χρειάζονται από ελάχιστη έως και καθόλου υπερθέρμανση αντίστοιχα και βρίσκουν συχνότερη εφαρμογή σε συστήματα ORC.



Διάγραμμα 3-4: Διαγράμματα T-s για ξηρά, ισεντροπικά και υγρά οργανικά ρευστά [44].

Η προστασία του στρώματος του όζοντος και οι κανονισμοί για την μείωση των εκπομπών του θερμοκηπίου οδήγησαν στην λήψη μέτρων σε ευρωπαϊκό και παγκόσμιο επίπεδο που περιορίζουν και απαγορεύουν την χρήση ορισμένων χημικών ουσιών. Συγκεκριμένα οι περιβαλλοντικοί δείκτες ODP και GWP εκφράζουν την σχετική ποσότητα υποβάθμισης του στρώματος του όζοντος (ουσία αναφοράς είναι το τριχλωρο-φθορο-μεθάνιο - R-11 με ODP=1.0) και την σχετική δυνατότητα απορρόφησης θερμικής ακτινοβολίας έπειτα από 100 χρόνια (ουσία αναφοράς είναι το CO₂ με GWP=1.0), για μια χημική ουσία αντίστοιχα. Ορισμένα κριτήρια που θα πρέπει να ληφθούν υπόψιν κατά την επιλογή του εργαζόμενου μέσου σε συνδυασμό με τα παραπάνω, είναι η απαίτηση για υψηλή πυκνότητα, χαμηλό ιξώδες, υψηλή θερμική αγωγιμότητα, χαμηλή τοξικότητα και ευφλεκτότητα και χαμηλό κόστος. Στον Πίνακα 3-6 παρουσιάζονται ενδεικτικά τα κύρια περιβαλλοντικά χαρακτηριστικά ορισμένων εργαζόμενων μέσων.

Πίνακας 3-6: Δείκτες ODP και GWP και κατηγοριοποίηση ασφάλειας κατά ASHRAE ορισμένων εργαζόμενων μέσων [45], [46].

Ουσία	ODP	GWP	Κατηγοριοποίηση ASHRAE			
			Ευφλεκτότητα	Τοξικότητα		
R-404A	0	Μηδενικό	3922	Υψηλό	A	1
R-245fa	0	Μηδενικό	1030	Μέτριο	B	1
R-134a	0	Μηδενικό	1430	Μέτριο	A	1
R-123	0.06	Μέτριο	77	Χαμηλό	B	1
R-600a	0	Μηδενικό	3	Χαμηλό	A	3
R-11	1	Υψηλό	4750	Υψηλό	A	1
R-744	0	Μηδενικό	1	Χαμηλό	A	1

Πίνακας 3-7:Κατηγοριοποίηση ασφαλείας εργαζόμενων μέσων κατά ASHRAE [46].

Κατηγοριοποίηση ASHRAE

Αύξουσα ευφλεκτότητα ↑	Αυξημένη ευφλεκτότητα	A3	B3
	Χαμηλή ευφλεκτότητα	A2 A2L*	B2 B2L*
	Μηδενική ευφλεκτότητα	A1	B1
		Χαμηλή τοξικότητα	Αυξημένη τοξικότητα
		→ Αύξουσα τοξικότητα	

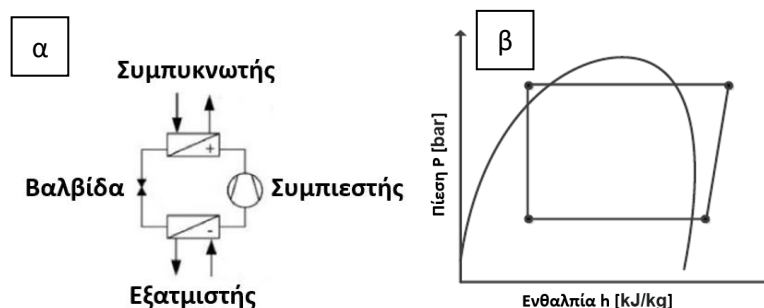
3.6.2 Αντλία Θερμότητας Υψηλών Θερμοκρασιών, ΗΤΗΡ

Η αντλία θερμότητας μηχανικής συμπίεσης ατμού αποτελεί μια τεχνολογία η οποία υλοποιείται με αντιστροφή του θερμοδυναμικού κύκλου Clausius-Rankine, ενώ ως εργαζόμενο μέσο χρησιμοποιείται κάποιο οργανικό ρευστό, όπως και στον ORC [34]. Συγκεκριμένα, η αντλία θερμότητας παράγει θερμική ενέργεια μέσω του συμπυκνωτή, η οποία είναι υψηλότερης θερμοκρασίας από αυτήν της θερμικής πηγής, χάρει στην καταναλισκόμενη στον συμπιεστή ηλεκτρική ενέργεια [47]. Ο όρος Αντλία Θερμότητας Υψηλής Θερμοκρασίας (ΗΤΗΡ), χρησιμοποιείται για να περιγράψει αντλίες θερμότητας όπου η θερμοκρασία εξόδου υπερβαίνει τους 100°C [48], [49]. Οι ΗΤΗΡ βρίσκουν εφαρμογή σε βιομηχανικές διεργασίες όπου αξιοποιούν την απορριπτόμενη θερμότητα χαμηλής θερμοκρασίας 30°C – 70°C, αναβαθμίζοντας την σε επίπεδα θερμοκρασιών 90°C – 160°C. Οι αντλίες αυτού του είδους χρησιμοποιούνται στην βιομηχανία του χαρτιού, του ξύλου,

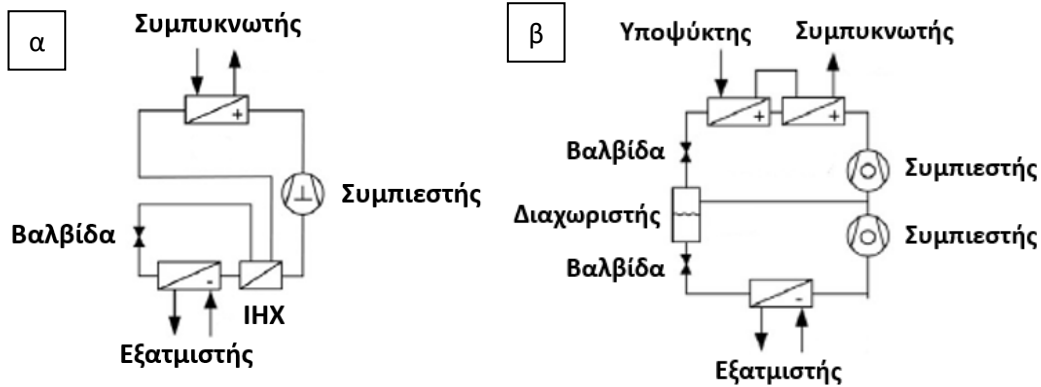
των χημικών, του πλαστικού, των τροφίμων και ποτών και εν γένει σε τομείς όπου απαιτούνται διεργασίες υψηλών θερμοκρασιών. Οι ΗΤΗΡ σε εμπορικό και ερευνητικό στάδιο επιτυγχάνουν θερμοκρασίες ανυψώσεις της τάξης 40°C – 130°C και συντελεστές θερμικής απόδοσης (CoP) της τάξης 1.6-6.5 [50]. Στον Πίνακα 3-8 παρουσιάζονται οι κυριότεροι τομείς στους οποίους βρίσκει εφαρμογή μια ΗΤΗΡ.

3.6.2.1 Θεμοδυναμικός Κύκλος Αντλίας Θερμότητας

Η διάταξη μιας απλής αντλίας θερμότητας αποτελείται από τέσσερα βασικά εξαρτήματα: έναν συμπιεστή, έναν συμπυκνωτή, έναν εξατμιστή και μία στραγγαλιστική βαλβίδα όπως φαίνεται στην Εικόνα 3-7,α. Κατά την διεργασία ο κορεσμένος ατμός χαμηλής πίεσης συμπιέζεται μέχρι την πίεση συμπύκνωσης. Στην πίεση αυτή ο ατμός του μέσου συμπυκνώνεται απελευθερώνοντας την θερμική ισχύ και έπειτα το κορεσμένο συμπύκνωμα στραγγαλίζεται στην βαλβίδα μέχρι την πίεση ατμοποίησης. Στη χαμηλή αυτή πίεση το ρευστό ατμοποιείται απορροφώντας θερμότητα από την θερμική πηγή και συμμετέχει εκ νέου στον κύκλο [34]. Στις εφαρμογές της απλής διάταξης μιας αντλίας θερμότητας ο κορεσμένος ατμός στην έξοδο του εξατμιστή υπερθερμαίνεται και το κορεσμένο υγρό στην έξοδο του συμπυκνωτή υποψύχεται, ώστε να αποφευχθεί ο κίνδυνος σχηματισμού συμπυκνώματος στον συμπιεστή και ώστε να αυξηθεί η παραγόμενη θερμική ισχύς αντίστοιχα. Ενώ οι κύριες παραλλαγές του βασικού κύκλου είναι η προσθήκη εσωτερικού εναλλάκτη θερμότητας (ΙΗΧ), ως προθερμαντήρα, και η χρήση διβάθμιου συμπιεστή για την βελτίωση του συντελεστή θερμικής απόδοσης, όπως φαίνεται στις Εικόνες 3-8α,β [50].



Εικόνα 3-7: α) Μονογραμμικό κύκλωμα απλής αντλίας θερμότητας β) Θερμοδυναμικό διάγραμμα P-h [50].



Εικόνα 3-8: Μονογραμμικό κύκλωμα α) αντλίας θερμότητας με εσωτερικό εναλλάκτη θερμότητας β)) αντλίας θερμότητας διπλής συμπίεσης [50].

Sector	Process	Temperature										[°C]	
		20	40	60	80	100	120	140	160	180	200		
Paper	Drying												90 to 240
	Bolling												110 to 180
	Bleaching												40 to 150
	De-inking												50 to 70
Food & beverages	Drying												40 to 250
	Evaporation												40 to 170
	Pasteurization												60 to 150
	Sterilization												100 to 140
	Bolling												70 to 120
	Distillation												40 to 100
	Blanching												60 to 90
	Scalding												50 to 90
	Concentration												60 to 80
	Tempering												40 to 80
Chemicals	Smoking												20 to 80
	Destillation												100 to 300
	Compression												110 to 170
	Thermoforming												130 to 160
	Concentration												120 to 140
Automotive	Bolling												80 to 110
	Bioreactions												20 to 60
Metal	Resin molding												70 to 130
	Drying												60 to 200
	Pickling												20 to 100
	Degreasing												20 to 100
	Electroplating												30 to 90
	Phosphating												30 to 90
	Chromating												20 to 80
Plastic	Purging												40 to 70
	Injection molding												90 to 300
	Pellets drying												40 to 150
Mechanical engineering	Preheating												50 to 70
	Surface treatment												20 to 120
	Cleaning												40 to 90
Textiles	Coloring												40 to 160
	Drying												60 to 130
	Washing												40 to 110
	Bleaching												40 to 100
Wood	Glueing												120 to 180
	Pressing												120 to 170
	Drying												40 to 150
	Steaming												70 to 100
	Cooking												80 to 90
	Staining												50 to 80
	Pickling												40 to 70
Several sectors	Hot water												20 to 110
	Preheating												20 to 100
	Washing/Cleaning												30 to 90
	Space heating												20 to 80

Technology Readiness Level (TRL) of heat pumps:

- Conventional HP < 80°C, established in industry
- Commercial available HTHP 80 to 100°C, key technology
- Prototype status, technology development, HTHP 100 to 140°C
- Laboratory scale research, functional models, proof of concept, HTHP > 140°C

Πίνακας 3-8: Βιομηχανικοί τομείς διεργασιών υψηλής θερμοκρασίας [50].

3.6.3 Δίκτυα Τηλεθέρμανσης, DHN

Στο μελλοντικό ενεργειακό σύστημα υψηλής διείσδυσης ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και αξιοποίησης απανθρακοποιημένων μέσων τα δίκτυα τηλεθέρμανσης καλούνται να διαδραματίσουν πρωταγωνιστικό ρόλο, αυξάνοντας την ενεργειακή απόδοση και διαφοροποιώντας το ενεργειακό μείγμα, στην προσπάθεια κάλυψης της ζήτησης των αναγκών θέρμανσης. Τα δίκτυα τηλεθέρμανσης αποτελούνται από ένα δίκτυο αγωγών και σωληνώσεων που ενώνουν τα κτίρια μιας γειτονιάς, ενός αστικού κέντρου ή ακόμη και μιας ολόκληρης πόλης, ώστε αυτά να εξυπηρετηθούν από κεντρικά εργοστάσια ή αποκεντρωμένες εγκαταστάσεις παραγωγής θερμότητας. Η προσέγγιση αυτή επιτρέπει στις μελλοντικές βιώσιμες πόλεις την ένταξη ευρείας χρήσης συμπαραγωγής θερμότητας και ηλεκτρικής ενέργειας (ΣΗΘ) μαζί με την αξιοποίηση της απορριπτόμενης θερμότητας από βιομηχανικές πηγές [51].

3.6.3.1 DHN 1^{ης}, 2^{ης} και 3^{ης} γενιάς

Η 1^η γενιά συστημάτων DHN χρησιμοποιούσε τον ατμό ως φορέα ενέργειας. Τα συστήματα αυτά εισήχθησαν πρώτη φορά στις ΗΠΑ κατά την δεκαετία του 1880 με κίνητρο την αντικατάσταση των μεμονωμένων καυστήρων και σχεδόν όλα τα συστήματα που δημιουργήθηκαν έως το 1930 χρησιμοποιούσαν την τεχνολογία αυτή σε Ευρώπη και ΗΠΑ. Τυπικά στοιχεία των συστημάτων αυτών ήταν οι τσιμεντένιοι αγωγοί ατμού, οι παγίδες ατμού και οι αντισταθμιστές αγωγών. Σήμερα η τεχνολογία αυτή θεωρείται ξεπερασμένη λόγω των υψηλών θερμικών απωλειών και των σοβαρών ατυχημάτων που προκαλούταν από εκρήξεις. Οι σωληνώσεις επιστροφής διαβρωνόντουσαν επίσης συχνά μειώνοντας την παροχή του συμπυκνώματος της επιστροφής και της απόδοσης του συστήματος.

Η 2^η γενιά συστημάτων DHN χρησιμοποιούσε ως φορέα θερμότητας πεπιεσμένο νερό σε θερμοκρασίες παροχής άνω των 100 °C. Τα συστήματα αυτά κυριάρχησαν από το 1930 ως και το 1970 και αποτελούνταν από σωλήνες νερού σε αγωγούς από σκυρόδεμα, μεγάλους εναλλάκτες θερμότητας αυλών-κελύφους και μεγάλες βαλβίδες. Οι κοινωνικοί, θεσμικοί και τεχνολογικοί λόγοι υιοθέτησης της εν λόγω τεχνολογίας διαφέρουν ελαφρώς μεταξύ των χωρών αλλά συγκλίνουν στην επίτευξη εξοικονόμησης μέσω της αξιοποίησης της ΣΗΘ.

Η 3^η γενιά συστημάτων DHN εισήχθη τη δεκαετία του 1970 και επεκτάθηκε σημαντικά από το 1980 και μετά. Το νερό υπό πίεση συνέχισε να είναι ο φορέας θερμότητας σε θερμοκρασίες όμως χαμηλότερες από 100°C. Τα τυπικά εξαρτήματα είναι προκατασκευασμένες, προμονωμένες σωληνώσεις θαμμένες στο έδαφος και υποσταθμοί οι οποίοι χρησιμοποιούν πλακοειδείς εναλλάκτες θερμότητας χαμηλής έντασης υλικών. Στην περίπτωση αυτή το κίνητρο εδραίωσης της τεχνολογίας ήταν η ασφάλεια του εφοδιασμού, η αύξηση της ενεργειακής απόδοσης με χρήση ΣΗΘ και αντικατάσταση του πετρελαίου με διάφορες τοπικές ή και φθηνότερες εναλλακτικές καυσίμων. Η τεχνολογία αυτή κυριαρχεί έως και σήμερα σε πολλά ενεργειακά συστήματα ενώ δρομολογείται η σταδιακή αντικατάσταση της [51].

3.6.3.2 DHN 4^{ης} και 5^{ης} γενιάς

Είναι φανερό πως η τάση των τριών προηγούμενων γενιών τηλεθέρμανσης εξελίχθηκε προς χαμηλότερες θερμοκρασίες παροχής, εξοπλισμό χαμηλότερης έντασης υλικών, προκατασκευασμένων εξαρτημάτων και αξιοποίηση διαφορετικών πηγών ενέργειας [51].

Το σύστημα τηλεθέρμανσης «4^{ης} γενιάς» ή «Τηλεθέρμανση Χαμηλών θερμοκρασιών (LTDH)» ορίζεται ως μια τεχνολογική και θεσμική ιδέα η οποία μέσω έξυπνων θερμικών δικτύων βοηθά στην ανάπτυξη βιώσιμων ενεργειακών συστημάτων. Τα συστήματα αυτά εξασφαλίζουν την θερμική τροφοδοσία κτιρίων χαμηλής ενεργειακής κατανάλωσης με χαμηλές απώλειες δικτύου, με τρόπο κατά τον οποίο η χρήση πηγών θερμότητας χαμηλής θερμοκρασίας ενσωματώνεται στη λειτουργία έξυπνων ενεργειακών συστημάτων [52], [53].

Τα δίκτυα τηλεθέρμανσης 4^{ης} γενιάς θα πρέπει να πληρούν τις παρακάτω προϋποθέσεις ώστε να διατελέσουν αναπόσπαστο κομμάτι ενός βιώσιμου μελλοντικού ενεργειακού συστήματος:

1. Δυνατότητα παροχής χαμηλής θερμοκρασίας τηλεθέρμανσης για θέρμανση χώρου και ζεστό νερό χρήσης σε υφιστάμενα, ενεργειακά ανακαινισμένα και χαμηλής ενεργειακής κατανάλωσης κτίρια.

Τα 4GDH καλούνται να αξιοποιήσουν συνέργειες τεχνολογιών εξοικονόμησης ενέργειας μέσω της ένταξης περισσότερων καταναλωτών στο ίδιο δίκτυο, της ενεργειακής αναβάθμισης των υφιστάμενων κτιρίων (θερμομόνωση) και αξιοποίησης ευφυούς ελέγχου. Έτσι η μείωση των απωλειών στους τελικούς καταναλωτές θα επιτρέψει την τηλεθέρμανση για θέρμανση χώρου και ζεστού νερού χρήσης σε χαμηλές θερμοκρασίες παροχής 50 – 60 °C, και επιστροφής 20 – 25 °C.

2. Ικανότητα διανομής θερμότητας με χαμηλές απώλειες δικτύου

Τα 4GDH θα συμβάλουν στην μείωση των απωλειών θερμότητας και στην αύξηση της ενεργειακής απόδοσης μέσω μείωση της θερμοκρασιακής διαφοράς (θερμοκρασία μέσου – θερμοκρασία περιβάλλοντος), χρήση σωληνώσεων μικρότερων διαστάσεων και βελτιωμένης μόνωσης και συστημάτων ευφυούς ελέγχου και μέτρησης.

3. Δυνατότητα αξιοποίησης απορριπτόμενης θερμότητας από πηγές χαμηλής θερμοκρασίας και ενσωμάτωσης ανανεώσιμων πηγών θερμότητας.

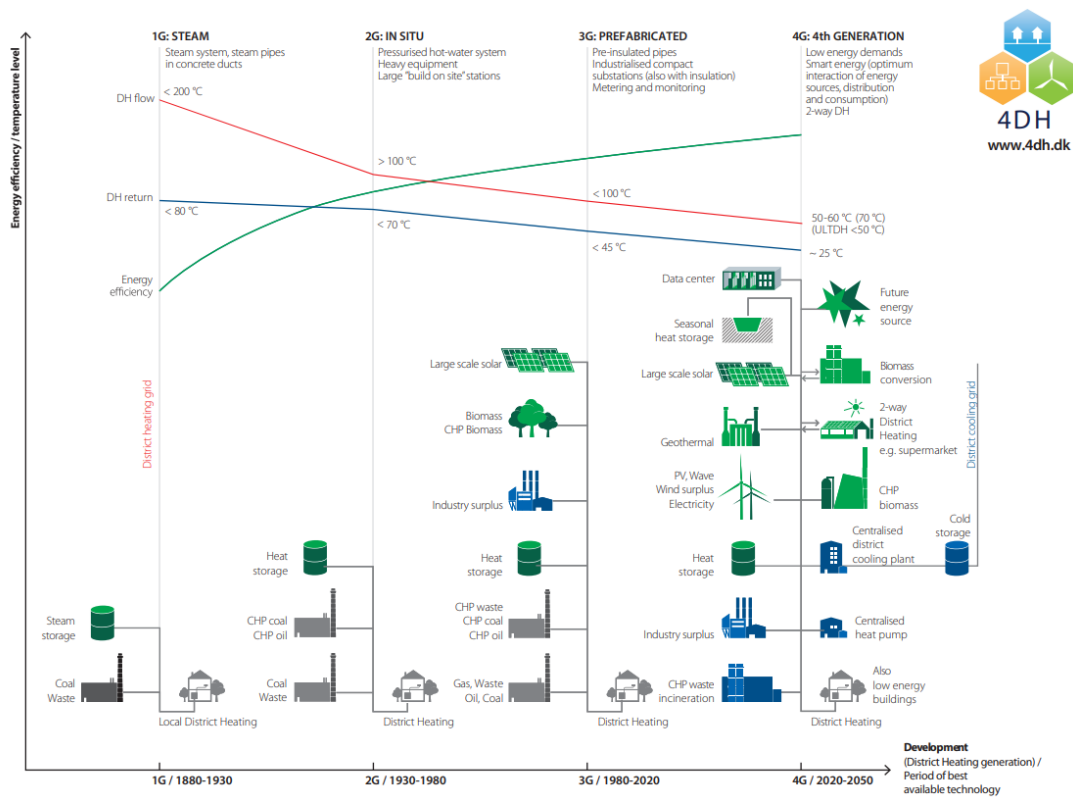
Τα 4GDH θα ενσωματώνουν θερμότητα προερχόμενη από ΣΗΘ υψηλής απόδοσης, απορριπτόμενη θερμότητα διεργασιών βιομηχανικών και εμπορικών εγκαταστάσεων και θα αξιοποιούν την ηλιακή θερμότητα και την γεωθερμία.

4. Δυνατότητα ένταξης σε έξυπνα ενεργειακά συστήματα, και συνεισφοράς στην ενσωμάτωση των διακυμαινόμενων πηγών ενέργειας

Στόχος των μελλοντικών δικτύων τηλεθέρμανσης είναι και η γεφύρωση της ζήτησης με το κυμαινόμενο προφίλ της παραγωγής, ο οποίος θα επιτευχθεί μέσω του ενεργού προγραμματισμού της ΣΗΘ, την χρήση τεχνολογιών θερμικής αποθήκευσης, την ενσωμάτωση μεγάλης κλίμακας αντλιών θερμότητας στις μονάδες ΣΗΘ με στόχο την σταθεροποίηση του συστήματος.

5. Ικανότητα διασφάλισης κατάλληλων δομών προγραμματισμού, κόστους και κινήτρων σε σχέση με τη λειτουργία καθώς και με την στρατηγική επενδύσεων που σχετίζονται με τον μετασχηματισμό μελλοντικών ενεργειακά βιώσιμων συστημάτων.

Βασικοί παράγοντες για την διασφάλιση της μετάβασης είναι ο στρατηγικός σχεδιασμός, η χρήση εργαλείων όπως τα GIS, οι αλλαγές στις τιμολογιακές πολιτικές για την στήριξη του μακροπρόθεσμου κόστους των συστημάτων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και η εξασφάλιση ισότιμης πρόσβασης στους πόρους με κοινούς οικονομικούς όρους. Στο ίδιο πλαίσιο αναφέρεται στην βιβλιογραφία και η εξέλιξη της 4^{ης} γενιάς, η 5^η γενιά ως «Τηλεθέρμανση Πολύ Χαμηλών Θερμοκρασιών (ULTDH)», στην οποία αξιοποιούνται θερμοκρασίες της τάξης των 30 – 50 °C [52].



Διάγραμμα 3-5: Εξέλιξη των δικτύων τηλεθέρμανσης, 1η έως 4η γενιά [54].

4 Μεθοδολογία

4.1 Θεωρητική Μοντελοποίηση PEMEL

Στόχος της θεωρητικής μοντελοποίησης του PEM ηλεκτρολύτη είναι η περιγραφή της ηλεκτροχημικής και θερμικής συμπεριφοράς του. Η μοντελοποίηση όπως περιγράφεται παρακάτω αφορά την στοιχειοθέτηση του φαινομένου της ηλεκτρόλυσης σε στατικές συνθήκες, με εφαρμογή των κατάλληλων εξισώσεων και απαρτίζεται από το ηλεκτροχημικό και το θερμικό μοντέλο του PEM ηλεκτρολύτη [55], [56]. Το θεωρητικό μοντέλο συγκροτήθηκε λαμβάνοντας υπόψιν τα χαρακτηριστικά και τα δεδομένα του PEM ηλεκτρολύτη που χρησιμοποιείται στο HYFLEXPOWER με στόχο να περιγράψει με ακρίβεια τα χαρακτηριστικά του συγκεκριμένου ηλεκτρολύτη στο ονομαστικό σημείο λειτουργίας του.

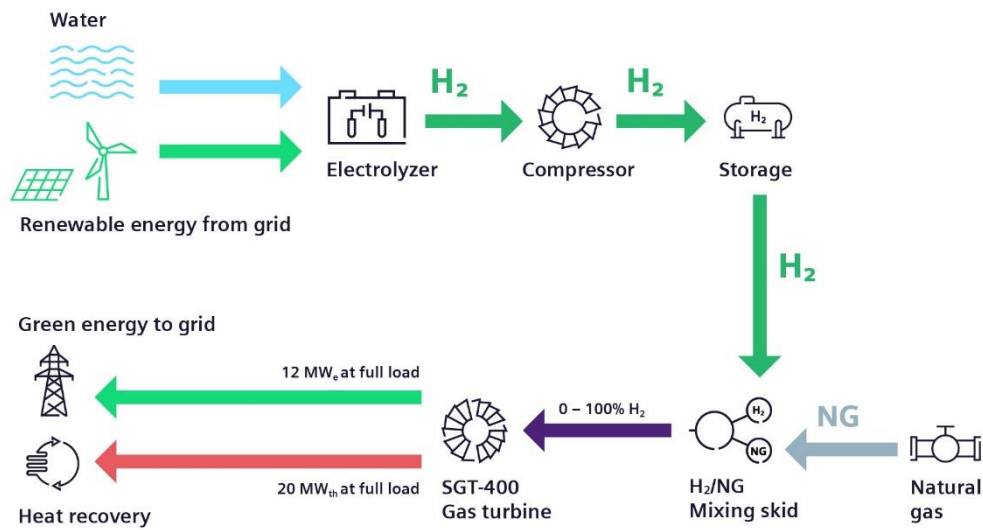
4.1.1 Περιγραφή προγράμματος HYFLEXPOWER

Το πρόγραμμα HYFLEXPOWER λαμβάνει χώρα στις εγκαταστάσεις της Smurfit Kappa, παγκόσμιου ηγέτη στην συσκευασία χαρτιού, στο Saillat-sur-Vienne της Γαλλίας και συνίσταται στην παραγωγή, αποθήκευση υδρογόνου και στην εκ νέου παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας με χρήση 100% πράσινου υδρογόνου. Το υδρογόνο παράγεται από έναν PEM ηλεκτρολύτη ονομαστικής ισχύς 1 MW, αποθηκεύεται σε δεξαμενή χωρητικότητας σχεδόν 1tn και στην συνέχεια χρησιμοποιείται για την τροφοδοσία ενός βιομηχανικού αεριοστρόβιλου SGT-400 της Siemens Energy.

Το έργο αυτό έχει ως στόχο να αποδείξει και να επιδείξει πως το υδρογόνο δύναται να χρησιμοποιηθεί ως ένα ευέλικτο μέσο αποθήκευσης ενέργειας, καθώς και πως ένας υφιστάμενος αεριοστρόβιλος δύναται να λειτουργήσει με ανανεώσιμο υδρογόνο αφού υποστεί την απαραίτητη μετατροπή. Αποτελεί συνεπώς έναν μοχλό για την επιτάχυνση της απανθρακοποίησης των ενεργοβόρων βιομηχανιών.

Συγκεκριμένα, το 2022 μια αρχική σειρά δοκιμών επέτρεψε στον βιομηχανικό αεριοστρόβιλο να λειτουργήσει με καύσιμο περιεκτικότητας 30% σε υδρογόνο, αναμειγμένο με φυσικό αέριο, ενώ τον Οκτώβριο του 2023 έλαβαν χώρα και οι πρώτες επιτυχημένες δοκιμές τροφοδοσίας του αεριοστρόβιλου με 100% υδρογόνο.

Το HYFLEXPOWER έχει λάβει σημαντική χρηματοδότηση από την Ευρωπαϊκή Ένωση στο πλαίσιο του προγράμματος έρευνας και καινοτομίας «Horizon 2020» και αποτελεί μια κοινοπραξία στην οποία συμμετέχουν η Siemens Energy, η ENGIE, η Centrax, η Arttic, το Γερμανικό Κέντρο Αεροδιαστημικής (DLR) και τέσσερα ευρωπαϊκά πανεπιστήμια μεταξύ των οποίων και το Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο [57], [58].



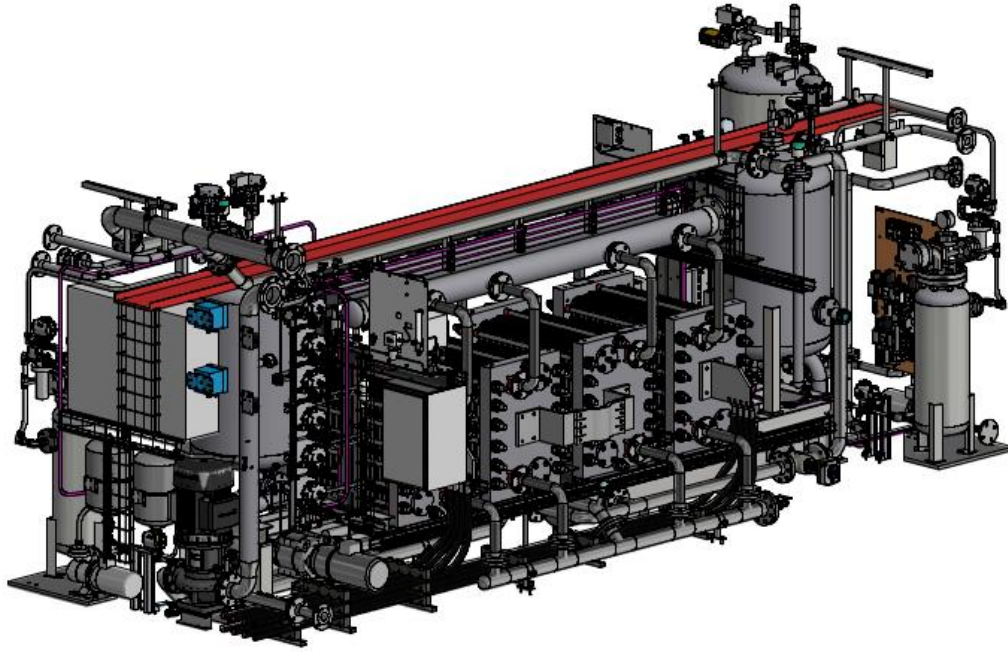
Εικόνα 4-1: Σχηματική απεικόνιση της διεργασίας Power-to-X-to-Power στο HYFLEXPOWER [58].

4.1.2 Χαρακτηριστικά PEM Silyzer 200 – Siemens

Τα χαρακτηριστικά για τον υπό εξέταση PEM ηλεκτρολύτη αντλήθηκαν από τις πραγματικές μετρήσεις της απόδοσης του *PEM Silyzer 200 – Siemens* που χρησιμοποιείται στο HYFLEXPOWER ενώ τα στοιχεία που δεν ήταν γνωστά για τον εν λόγω ηλεκτρολύτη, ανακτήθηκαν από την βιβλιογραφία. Συγκεκριμένα από μετρήσεις στα πλαίσια του προγράμματος, γνωστοί ήταν οι βαθμοί απόδοσης και η παραγόμενη ποσότητα H_2 για διαφορετικά φορτία, όπως παρουσιάζονται στον Πίνακα 4-1.

Πίνακας 4-1: Πραγματικά Δεδομένα PEM Silyzer 200 - Siemens

Ογκομετρικό Φορτίο (Nm^3/Nm^3_{nom})	40.0%	60.0%	80.0%	100.0%
Φορτίο Ισχύος l (kW/kW_{nom})	33.9%	54.0%	76.1%	100.0%
Παροχή Όγκου H_2 v_{H_2} (Nm^3/h)	80	120	160	200
Παροχή Μάζας H_2 m_{H_2} (kg/h)	7.19	10.79	14.38	17.98
Βαθμός Απόδοσης PEMEL η_{PEMEL} (HHV)	78.0%	73.4%	69.5%	66.1%
Απόδοση PEMEL (kWh_{el}/Nm^3)	4.54	4.83	5.10	5.36



Εικόνα 4-2: Απεικόνιση PEM Silyzer 200 – Siemens.

Σύμφωνα με τα παραπάνω δεδομένα και λαμβάνοντας υπόψιν βιβλιογραφικά στοιχεία σχετικά με τα χαρακτηριστικά λειτουργίας εμπορικών PEMEL, συντάσσεται ο Πίνακας 4-2, ο οποίος συνοψίζει τα βασικά χαρακτηριστικά του ηλεκτρολύτη.

Πίνακας 4-2: Χαρακτηριστικά του υπό μελέτη PEMel.

Παράμετρος	Σύμβολο	Τιμή
Ονομαστική Ισχύς PEMEL	$P_{stack,nom}$	1071.76 kW
Ονομαστική Πυκνότητα Ρεύματος	i	1.80 A/cm ² ^[55]
Πίεση Καθόδου	p_{cat}	35 bar ^[59]
Πίεση Ανόδου	p_{an}	3.5 bar ^[59]
Θερμοκρασία Κελιού	θ_{cell}	80 °C ^[32]
Ονομαστικός Βαθμός Απόδοσης PEMEL (HHV)	$\eta_{stack,nom}$	66.1%
Ονομαστική Παροχή Μάζας H ₂	$m_{H_2,nom}$	17.98 kg/h
Εύρος Ογκομετρικού Φορτίου	-	40%-100%
Πάχος Μεμβράνης	δ	125 μm
Επιφάνεια Κελιού	A	1000 cm ² ^[60]
Μήκος Κελιού	w	31.62 cm ^[56]
Πλάτος Κελιού	d	31.62cm ^[56]
Ύψος Κελιού	h_c	0.44cm ^{[55],[56]}

4.1.3 Ηλεκτροχημικό Μοντέλο

Η συνηθέστερη ηλεκτροχημική τεχνική για την αξιολόγηση της απόδοσης του ηλεκτρολύτη είναι η καμπύλη πόλωσης, η οποία απεικονίζει την συσχέτιση της τάσης, U_{cell} , και της πυκνότητας ρεύματος, i , που δρουν στο κελί ηλεκτρόλυσης [61]. Η ελάχιστη θεωρητική ενέργεια σε αδιαβατικές συνθήκες, παρεχόμενη αποκλειστικά από ηλεκτρική πηγή, χωρίς παραγωγή ή κατανάλωση θερμότητας, που απαιτείται για την πραγματοποίηση της ηλεκτρόλυσης ονομάζεται θερμοουδέτερη τάση, $U_{tn} = 1.48 V$, ενώ η πραγματική ασκούμενη στο κελί τάση υπολογίζεται σύμφωνα με την Εξίσωση 4.1:

$$U_{cell} = U_{ocv} + U_{act} + U_{ohm} + U_{conc} \quad 4.1$$

Όπου U_{ocv} η τάση ανοιχτού κυκλώματος, U_{act} η τάση ενεργοποίησης, U_{ohm} η ωμική τάση και U_{conc} η τάση συγκέντρωσης η οποία και αγνοείται καθώς δρα σε πυκνότητες ρεύματος, i , μεγαλύτερες του εύρους λειτουργίας του ηλεκτρολύτη [28].

4.1.3.1 Τάση Ανοιχτού Κυκλώματος

Η τάση ανοιχτού κυκλώματος U_{ocv} , περιγράφει την διαφορά δυναμικού μεταξύ των ηλεκτροδίων του κελιού και συχνά εκφράζεται ως το άθροισμα της αντιστρέψιμης τάσης και μιας έκφρασης που συσχετίζει την δραστηριότητα των προϊόντων και των αντιδρώντων, όπως περιγράφεται από την εξίσωση του Nernst 4.2.

$$U_{ocv} = U_{rev} + \frac{R \cdot T}{2 \cdot F} \cdot \ln \left(\frac{\bar{p}_{H_2} \cdot \bar{p}_{O_2}^{1/2}}{\bar{p}_{H_2O}} \right) \quad 4.2$$

Με την αντιστρέψιμη τάση, U_{rev} , να περιγράφεται συναρτήσει της θερμοκρασίας του κελιού σύμφωνα με την ημιεμπειρική Εξίσωση 4.3 [61].

$$U_{rev} = 1.229 - 0.9 \cdot 10^{-3} \cdot (T - 298) \quad 4.3$$

Οι μερικές πιέσεις υδρογόνου, \bar{p}_{H_2} , και οξυγόνου, \bar{p}_{O_2} , υπολογίζονται σύμφωνα με τις Εξισώσεις 4.4 και 4.5 αντίστοιχα που προκύπτουν από την υπόθεση πως η μερική πίεση του νερού, \bar{p}_{H_2O} , ισούται με την πίεση κορεσμού του για την εκάστοτε θερμοκρασία [62].

$$\bar{p}_{H_2} = \bar{p}_{an} - \bar{p}_{H_2O} \quad 4.4$$

$$\bar{p}_{O_2} = \bar{p}_{cat} - \bar{p}_{H_2O} \quad 4.5$$

4.1.3.2 Τάση Ενεργοποίησης

Η τάση ενεργοποίησης U_{act} , αναφέρεται στην τάση που απαιτείται για την ενεργοποίηση των ηλεκτροχημικών αντιδράσεων που λαμβάνουν χώρα στην άνοδο και στην κάθοδο του κάθε κελιού και βασίζεται στην Εξίσωση *Butler-Volmer* 4.6 [61].

$$U_{act} = \frac{R \cdot T}{a_{an} \cdot F} \cdot \operatorname{arcsinh}\left(\frac{i}{2 \cdot i_{o,an}}\right) + \frac{R \cdot T}{a_{cat} \cdot F} \cdot \operatorname{arcsinh}\left(\frac{i}{2 \cdot i_{o,cat}}\right) \quad 4.6$$

Όπου a_{an} , a_{cat} οι συντελεστές μεταφοράς φορτίου και $i_{o,an}$, $i_{o,cat}$ οι πυκνότητες ρεύματος ανταλλαγής ανόδου και καθόδου αντίστοιχα. Οι παραπάνω μεταβλητές ποικίλουν σημαντικά στην βιβλιογραφία και εξαρτώνται από το είδος του καταλύτη, την μορφολογία του ηλεκτροδίου, την πίεση, την θερμοκρασία και άλλα δεδομένα τα οποία συνήθως προστατεύονται από τους κατασκευαστές [28]. Συνεπώς οι μεταβλητές αυτές προσεγγίστηκαν λαμβάνοντας υπόψιν την βιβλιογραφία και τα χαρακτηριστικά του υπό μελέτη ηλεκτρολύτη και παρουσιάζονται στον Πίνακα 4-3.

Πίνακας 4-3: Συντελεστής μεταφοράς φορτίου και πυκνότητα ρεύματος ανταλλαγής για την άνοδο και την κάθοδο.

$a_{an}^{[63]}$	$a_{cat}^{[63]}$	$i_{o,an}(A/cm^2)^{[61]}$	$i_{o,cat}(A/cm^2)^{[61]}$
0.5	0.5	$9.16 \cdot 10^{-5}$	$7.90 \cdot 10^{-2}$

4.1.3.3 Ωμική Τάση

Η ωμική τάση, U_{ohm} , εκφράζει τις απώλειες που οφείλονται στην ωμική αντίσταση της μεμβράνης, εξαρτάται κυρίως από το πάχος και το υλικό της και περιγράφεται από τον *Νόμο του Ohm* σύμφωνα με την Εξίσωση 4.7:

$$U_{ohm} = R_{mem} \cdot i = \frac{\delta}{\sigma} \cdot i \quad 4.7$$

Όπου δ , το πάχος μίας τυπικής Nafion® μεμβράνης και σ , η αγωγιμότητα η οποία υπολογίζεται σύμφωνα με την Εξίσωση 4.8:

$$\sigma = (0.005139 \cdot \lambda - 0.00326) \cdot e^{\left[1248 \cdot \left(\frac{1}{303} - \frac{1}{T}\right)\right]} \quad 4.8$$

Όπου λ , η περιεκτικότητα της μεμβράνης σε νερό συναρτήσει της θερμοκρασίας σύμφωνα με την Εξίσωση 4.9[32]:

$$\lambda = \frac{(-2.89556 + 0.016 \cdot T) + 1.625}{0.1875} \quad 4.9$$

4.1.3.4 Τάση Συγκέντρωσης

Η τάση συγκέντρωσης, U_{conc} , αφορά στο υπερδυναμικό που προκύπτει λόγω των μεταβολών στη συγκέντρωση του αντιδρώντος στην επιφάνεια του ηλεκτροδίου. Συγκεκριμένα, όταν η πυκνότητα ρεύματος είναι αρκετά υψηλή, αυξάνεται η συγκέντρωσή των φυσαλίδων αερίων που σχηματίζονται με αποτέλεσμα να παρεμποδίζεται η επιφανειακή αντίδραση και ο ρυθμός της να επιβραδύνεται. Επειδή η U_{conc} είναι αισθητή για πυκνότητες ρεύματος υψηλότερες από αυτές που εξετάζονται στην παρούσα μελέτη, η επίδρασή της αμελείται.

4.1.3.5 Καμπύλη Πόλωσης

Η Εξίσωση 4.1, μπορεί πλέον να συμπληρωθεί, υπολογίζοντας την τάση του κελιού, U_{cell} , συναρτήσει της πυκνότητας ρεύματος, i , και της θερμοκρασίας του κελιού, T . Συνεπώς η καμπύλη πόλωσης του υπό μελέτη *PEM Silyzer 200 – Siemens* ηλεκτρολύτη για διαφορετικές θερμοκρασίες λειτουργίας, χαράσσεται και παρουσιάζεται στο κεφάλαιο «Αποτελέσματα».

4.1.3.6 Μοντέλο Faradaic

Σύμφωνα με τον νόμο του *Faraday* και για $\eta_F = 99\%$ οι μοριακές ροές σε κάθε κελί του καταναλισκόμενου H_2O , και των παραγόμενων O_2 και H_2 , σε άνοδο και κάθοδο υπολογίζονται σύμφωνα με τις Εξισώσεις 4.10 - 4.12 [32]:

$$n_{H_2O,cons} = \eta_F \cdot \frac{I}{2F} \quad 4.10$$

$$n_{O_2,an} = \eta_F \cdot \frac{I}{4F} \quad 4.11$$

$$n_{H_2,cat} = \eta_F \cdot \frac{I}{2F} \quad 4.12$$

Όπου, $I = i \cdot A$.

4.1.3.7 Διαπερατότητα Μεμβράνης

Ο απαραίτητος αριθμός κελίων, το καθένα εξ' αυτών επιφάνειας A , που απαιτείται να έχει ο ηλεκτρολύτης για να επιτευχθεί η δεδομένη ονομαστική του ισχύς $P_{stack,nom}$ υπολογίζεται σύμφωνα με την Εξίσωση 4.13 [64]:

$$N_{cell} = \frac{P_{stack,nom}}{U_{cell} \cdot i \cdot A} \quad 4.13$$

Για το σύνολο του ηλεκτρολύτη μπορεί πλέον να υπολογισθεί, σύμφωνα με τον *N.Faraday* παραπάνω, αλλά και τις παρακάτω εξισώσεις διαπερατότητάς της μεμβράνης, η παροχή και οι συγκεντρώσεις των παραγόμενων ρευμάτων που εξέρχονται από την άνοδο και την κάθοδο αυτού, από τις Εξισώσεις 4.14 - 4.16 [65],[66].

$$m_{H2,perm} = (0.0009 \cdot e^{0.025 \cdot T}) \cdot \Delta P \cdot A \quad 4.14$$

$$n_{O2,perm} = \frac{n_{H2,perm}}{2} \quad 4.15$$

$$n_{H2O,perm} = 2 \cdot n_{H2,perm} \quad 4.16$$

4.1.4 Θερμικό Μοντέλο

4.1.4.1 Ισοζύγιο Θερμότητας

Το θερμικό μοντέλο έχει ως στόχο να παρουσιάσει την ροή της παραγόμενης θερμότητας από τον PEM ηλεκτρολύτη και να υπολογίσει την ποσότητα αυτής η οποία μετέπειτα δύναται να ανακτηθεί και περιγράφεται για δυναμικές συνθήκες από την εξίσωση 4.17 [55].

$$C_{th} \frac{dT}{dt} = Q_{gen} - Q_{loss} - Q_{cool} \quad 4.17$$

Ενώ για στατικές συνθήκες η θεωρητικά χρήσιμη θερμότητα που δύναται να ανακτηθεί μέσω του συστήματος ψύξης του ηλεκτρολύτη περιγράφεται από την Εξίσωση 4.18.

$$Q_{cool} = Q_{gen} - Q_{loss} \quad 4.18$$

Η ολική παραγόμενη θερμότητα της κυψέλης που οφείλεται στην εφαρμογή του υπερδυναμικού υπολογίζεται θεωρητικά σύμφωνα με την Εξίσωση 4.19.

$$Q_{gen} = N_{cell} \cdot (U_{cell} - U_{tn}) \cdot i \cdot A \quad 4.19$$

4.1.4.2 Απώλειες Θερμότητας

Η απώλεια θερμότητας που οφείλεται στην αναπόφευκτη μεταφορά θερμότητας από την θερμή επιφάνεια του ηλεκτρολύτη προς το ψυχρό περιβάλλον, λόγω συναγωγής και ακτινοβολίας και υπολογίζεται σύμφωνα με τις Εξισώσεις 4.20 - 4.25 και των δεδομένων του Πίνακα 4-4 [67].

$$Q_{loss} = Q_{conv} + Q_{rad} \quad 4.20$$

$$Q_{conv} = h \cdot A_{stack} \cdot (T - T_{env}) \quad 4.21$$

$$Q_{rad} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot A_{stack} \cdot (T^4 - T_{env}^4) \quad 4.22$$

Με τον συντελεστή μεταφοράς θερμότητας να υπολογίζεται σύμφωνα με την Εξίσωση 4.23.

$$h = \frac{\overline{Nu} \cdot k}{d} \quad 4.23$$

Με τον αδιάστατο αριθμό \overline{Nu} , για στρωτή ροή να υπολογίζεται σύμφωνα με την Εξίσωση 4.24.

$$\overline{Nu} = 0.664 \cdot Re^{1/2} \cdot Pr^{1/3} \quad 4.24$$

Και τον αδιάστατο αριθμό Re για στρωτή ροή να υπολογίζεται σύμφωνα με την Εξίσωση 4.25.

$$Re = \frac{v_w \cdot d}{\nu} \quad 4.25$$

Πίνακας 4-4: Δεδομένα Υπολογισμού Απωλειών Θερμότητας [67].

Παράμετρος	Σύμβολο	Τιμή
Επιφάνεια stack	A_{stack}	1.67 m^2
Ανώτερη Θερμογόνος Δύναμη Η ₂	HHV_{H_2}	39.41 kWh/kg
Συντελεστής Εκπομπής Ανοξειδωτου Χάλυβα	ε	$0.55^{[68]}$
Σταθερά <i>Stephan-Boltzman</i>	σ	$5.67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$
Ταχύτητα Ανέμου	v_w	0.2 m/s
Αριθμός Prandtl	Pr	0.7309

Κινηματικό Ιξώδες	ν	$15.16 \cdot 10^{-6} \text{ kg/m} \cdot \text{s}$
Θερμική Αγωγιμότητα	k	0.02514 W/mK
Θερμοκρασία Περιβάλλοντος	θ_{env}	$20 \text{ }^\circ\text{C}$

4.2 Μοντελοποίηση PEMEL σε περιβάλλον AspenPlus®

Σε συνέχεια της θεωρητικής μοντελοποίησης, προσομοιώνεται παρακάτω η λειτουργία του *PEM Sylinder 200 – Siemens*, βάσει των χαρακτηριστικών που παρατίθενται στους Πίνακες 4-1 και 4-2 με το λογισμικό AspenPlus®. Ελλείπει κάποιου block που προσομοιώνει την λειτουργία ενός συστήματος ηλεκτρόλυσης στο λογισμικό, η διαδικασία αυτή θα γίνει έμμεσα χρησιμοποιώντας ήδη υπάρχοντα blocks βάσει της σχετικής βιβλιογραφίας [4], [32], [40], [59], [65], [66], με την χρήση του πακέτου PR-BM (Peng Robinson- Boston Mathias).

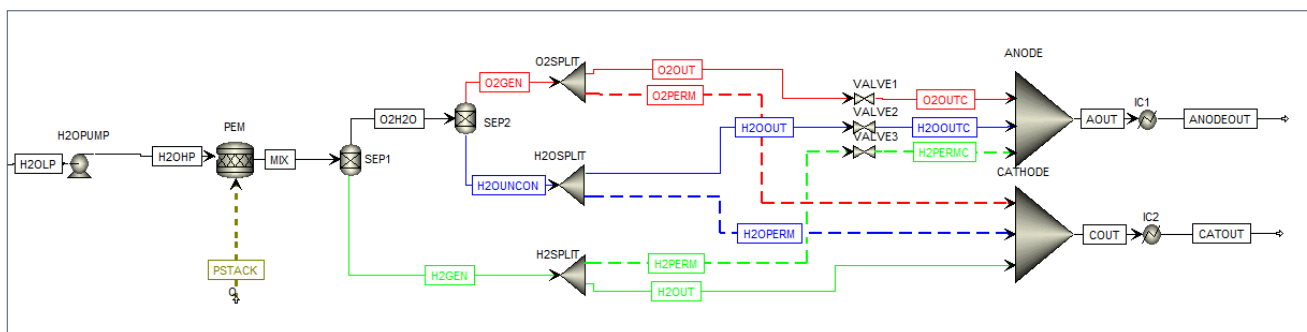
4.2.1 Μοντέλο Συστήματος Ηλεκτρόλυσης Μεμβράνης Ανταλλαγής Πρωτονίων

Συγκεκριμένα το απιονισμένο νερό “H2OLP” εισέρχεται στο σύστημα σε συνθήκες 1 bar, 25 °C. Μέσω της αντλίας “H2OPUMP” η πίεση του αυξάνεται στα 35 bar και εισέρχεται στον στοιχειομετρικό αντιδραστήρα (RSTOIC) “PEM” όπου λαμβάνει χώρα η ηλεκτρόλυση, με την εφαρμογή της απαραίτητης ηλεκτρικής ισχύς “PSTACK” για την πραγματοποίηση της αντίδρασης.

Το διφασικό μίγμα “MIX” που αποτελείται από το νερό που δεν αντέδρασε σε υγρή μορφή καθώς και τα αέρια προϊόντα της αντίδρασης, εξέρχεται από τον αντιδραστήρα σε συνθήκες 35 bar, 80 °C.

Έπειτα με χρήση δύο διαδοχικών διαχωριστών (SEPARATOR) οι ουσίες διαχωρίζονται πλήρως μεταξύ τους και έπειτα μέσω των διασπαστών (SPLITTER) “O2SPLIT”, “H2SPLIT”, “H2OSPLIT” στους οποίους επιδρούν οι εξισώσεις 4.14-4.16, προσομοιώνεται η διαπερατότητα των αερίων διαμέσου της μεμβράνης Nafion. Εκτός από την μεταφορά πρωτονίων μέσω της μεμβράνης για την παραγωγή υδρογόνου, παρατηρείται παρασιτική μεταφορά των αερίων που οφείλεται στην διαπερατότητα της μεμβράνης και σε φαινόμενα ηλεκτροώσμωσης. Η διαπερατότητα του υδρογόνου εκφράζεται ως συνάρτηση της πίεσης και της θερμοκρασίας, ενώ θεωρείται πως η μοριακή διαπερατότητα του νερού είναι διπλάσια και του οξυγόνου μισή από αυτήν του υδρογόνου [65].

Στην συνέχεια τα ρεύματα (STREAMS) που απαρτίζουν το προϊόν που εξέρχεται από την κάθοδο ενώνονται σε ένα ενιαίο, το “CATOUT”, μέσω ενός αναμεικτήρα (MIXER) “CATHODE”, ενώ αυτά που απαρτίζουν το προϊόν που εξέρχεται από την άνοδο, διέρχονται μέσω στραγγαλιστικών βαλβίδων (VALVE), αποκτούν την πίεση ανόδου 3.5 bar και ενώνονται επίσης σε ένα ενιαίο ρεύμα “ANODEOUT” μέσω ενός ακόμη αναμεικτήρα “ANODE”. Το σύστημα παραγωγής υδρογόνου όπως συγκροτήθηκε σε περιβάλλον AspenPlus® παρουσιάζεται στην Εικόνα 4-3.



Εικόνα 4-3: Μοντελοποίηση PEMel σε περιβάλλον AspenPlus®.

4.2.2 Μοντέλο Ψύξης PEMEL

Οι απώλειες του συστήματος λόγω των μη αντιστρεψιμοτήτων της χημικής αντίδρασης εκδηλώνονται με την έκλυση θερμότητας, η οποία είναι απαραίτητο να απομακρυνθεί από το σύστημα ηλεκτρόλυσης για να διατηρηθεί το επιθυμητό θερμοκρασιακό επίπεδο στον ηλεκτρολύτη σε κάθε σημείο λειτουργίας, με στόχο την αποφυγή της υπερθέρμανσης και την εξασφάλιση της εύρυθμης λειτουργίας του.

Στην πλειονότητα των εμπορικών ηλεκτρολυτών έως τώρα στόχος ήταν η απομάκρυνση της πλεονάζουσας θερμότητας και η απόρριψη της στο περιβάλλον μέσω της ενίσχυσης της συναγωγής, με χρήση ανεμιστήρων (Air Fin Coolers), ψεκάσμου νερού από ακροφύσια (Fogging System) και της απόρριψης της σε κάποιο σύστημα ψύξης εναλλακτών χωρίς την περεταίρω μεταχείριση της [40], [69]. Η παραγόμενη θερμότητα μπορεί να ανακτηθεί από τρεις διαφορετικές πηγές σε ένα σύστημα PEMEL, το ρεύμα οξυγόνου, το ρεύμα υδρογόνου και την ίδια την κυψέλη του συστήματος PEMEL [4].

4.2.2.1 Ψύξη Ρευμάτων Αερίων

Για την δέσμευση της απορριπτόμενης θερμότητας που περιέχεται στα ρεύματα των αερίων αναπτύχθηκε ένα σύστημα ψύξης με χρήση ενός υδρόψυκτου εναλλάκτη θερμότητας για κάθε ρεύμα.

Συγκεκριμένα τα ρεύματα των αερίων "ANODEOUT", "CATOUT" θερμοκρασίας 80 °C αφού εξέλθουν από τον PEMEL, ψύχονται μέσω εναλλακτών "HEXA", "HEXC" με νερό σε συνθήκες 20 °C, 1 bar "COOLAN", "COOLCAT", έως τους 25 °C, ώστε να αποφευχθεί η θερμοκρασιακή διασταύρωση στον εναλλάκτη. Η παροχή μάζας του ψυκτικού νερού ρυθμίζεται κάθε φορά ανάλογα με την επιθυμητή θερμοκρασία της ανακτώμενης θερμότητας στην έξοδο των εναλλακτών "O2HEAT", "H2HEAT".

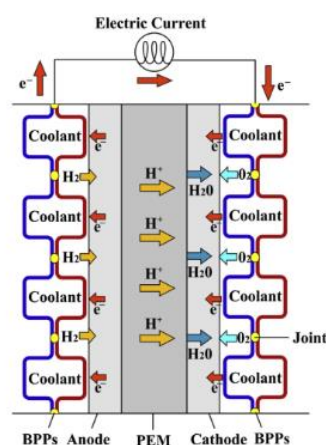
Μετά την ψύξη των ρευμάτων των αερίων, το ρεύμα της ανόδου "ANCOLD" διοχετεύεται σε έναν διαχωριστή υγρού-αερίου "DEHUMAN", όπου το οξυγόνο διαχωρίζεται σχεδόν πλήρως από της υπόλοιπες ουσίες και το νερό που εξέρχεται ανακυκλώνεται "WATREAN", ενοποιείται με το απιονισμένο νερό τροφοδοσίας "H2OFEED" σε ένα ενιαίο ρεύμα "H2OLP" και ανατροφοδοτείται στον PEMel σε θερμοκρασία 25 °C. Αντίστοιχα το ρεύμα της καθόδου

“CATCOLD” διοχετεύεται προαιρετικά σε έναν ξηραντήρα υψηλής καθαρότητας “DRYER” εάν απαιτείται υδρογόνο καθαρότητας της τάξης του 99.999%.

4.2.2.2 Ψύξη Ηλεκτρολυτικής Κυψέλης

Η πλειονότητα της παραγόμενης θερμότητας προέρχεται από την κυψέλη του PEMEL. Στην υπάρχουσα βιβλιογραφία υπάρχει έλλειψη σχετικά με την περιγραφή του συστήματος ψύξης και ανάκτησης θερμότητας από την κυψέλη του PEMEL κυρίως λόγω της ανωριμότητας της εν λόγω τεχνολογίας, αλλά και της προστασίας των κατασκευαστικών δεδομένων.

Συγκεκριμένα γίνεται αναφορά τόσο σε εξωτερικά όσο και σε εσωτερικά συστήματα ανάκτησης θερμότητας από την κυψέλη. Συγκεκριμένα, η μελέτη «*Utilization of waste heat from PEM electrolyzers – Unlocking local optimization*» [70], προτείνει ένα εξωτερικό σύστημα ανάκτησης θερμότητας με χρήση πολλαπλών εναλλακτών θερμότητας ενώ η μελέτη «*Heat Management of PEM Electrolysis*» [55] αναφέρεται στην αναγκαιότητα ανάπτυξης ενός εσωτερικού συστήματος ανάκτησης θερμότητας για την κυψέλη, για τους βιομηχανικούς ηλεκτρολύτες μεγάλης κλίμακας. Ειδικότερα στην εν λόγω εργασία τα συστήματα εσωτερικής ψύξης διαχωρίζονται σε συστήματα i) πλεονάζουσας παροχής αντιδρώντος νερού και ii) ξεχωριστού κυκλώματος ψύξης. Η αρχή λειτουργίας του πρώτου έγκειται στην εισαγωγή περίσσειας ποσότητας νερού στον ηλεκτρολύτη με στόχο την διατήρηση του επιθυμητού θερμοκρασιακού επιπέδου στην κυψέλη, ενώ του δεύτερου στην ανάπτυξη ενός ξεχωριστού ψυκτικού κυκλώματος με εισαγωγή καναλιών ανάμεσα στις διπολικές πλάκες που διαχωρίζουν τα κελία της κυψέλης, τεχνολογία που απαντάται συχνά στην βιομηχανία κυψελών καυσίμου.



Εικόνα 4-4: Σχηματική αναπαράσταση διπολικών πλακών με κύκλωμα ψυκτικού σε PEM κυψέλη καυσίμου [71].

Η λειτουργία του συστήματος ανάκτησης θερμότητας από την κυψέλη του συστήματος PEMEL μοντελοποιείται στο AspenPlus® με χρήση ενός θερμαντήρα (HEATER) “HEXSTACK”. Ένα κλάσμα της απορριπτόμενης από την κυψέλη θερμότητας “QGEN” δεν δύναται να ανακτηθεί από το ψυκτικό κύκλωμα λόγω των απωλειών συναγωγής και ακτινοβολίας της

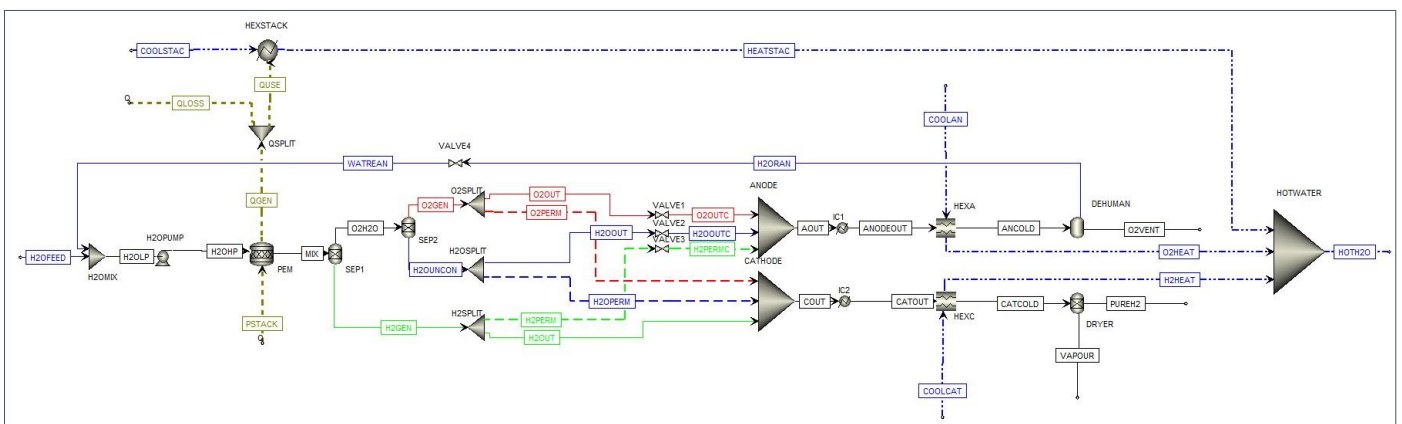
κυψέλης και των τεχνικών περιορισμών του εσωτερικού ψυκτικού συστήματος, οπότε και απομακρύνεται ως απώλειες στο περιβάλλον “QLOSS”. Η τελικά αξιοποιήσιμη θερμική ισχύς “QUSE” κατευθύνεται στον “HEXSTACK”. Στον θερμαντήρα αυτόν εισέρχεται νερό σε συνθήκες 20 °C, 1 bar “COOLSTACK”, η παροχή μάζας του οποίου ρυθμίζεται κάθε φορά ανάλογα με την επιθυμητή θερμοκρασία της ανακτώμενης θερμότητας στην έξοδο του.

Τέλος, το νερό υψηλής πλέον θερμοκρασίας που εξέρχεται από τα συστήματα ανάκτησης θερμότητας των ρευμάτων των αερίων “O2HEAT”, “H2HEAT” και της κυψέλης “HEATSTACK”, αναμειγνύονται σε ένα ενιαίο ρεύμα “HOTH2O” μέσω ενός αναμεικτήρα “HOTWATER”.

Οι παραδοχές που έγιναν κατά την μοντελοποίηση παρουσιάζονται στον Πίνακα 4-5. Επίσης η μοριακή μετατροπή του νερού σε υδρογόνο θεωρήθηκε ίση με 90% λαμβάνοντας υπόψιν τις απώλειες αντιστάσεων και συγκέντρωσης, οι εναλλάκτες θερμότητας θεωρήθηκαν τύπου αντιρροής, ενώ οι αναμεικτήρες, οι διασπαστές και οι διαχωριστές θεωρήθηκαν αδιαβατικοί [59]. Το σύστημα παραγωγής υδρογόνου σε συνδυασμό με το ψυκτικό κύκλωμα όπως συγκροτήθηκε σε περιβάλλον AspenPlus® παρουσιάζεται στην Εικόνα 4-5.

Πίνακας 4-5: Παραδοχές μοντέλου συστήματος ηλεκτρόλυσης.

Παράμετρος	Σύμβολο	Τιμή
Θερμοκρασία Απιονισμένου Νερού	θ_{deion}	25 °C
Θερμοκρασία Ψυκτικού Νερού	$\theta_{cool,in}$	20 °C
Ελάχιστη Θερμοκρασιακή Διαφορά Εναλλακτών	PP_{HEX}	5 K
Ισεντροπικός Βαθμός Απόδοσης Αντλίας	η_{pump}	85%
Βαθμός Απόδοσης Ψυκτικού Συστήματος Κυψέλης	$\eta_{cool,stack}$	92% ^[55]



Εικόνα 4-5: Μοντελοποίηση PEMel και ψυκτικού κυκλώματος σε περιβάλλον AspenPlus®.

Ο βαθμός απόδοσης του συστήματος ηλεκτρόλυσης, χωρίς ανάκτηση της απορριπτόμενης θερμότητας υπολογίζεται σύμφωνα με την Εξίσωση 4.26. Η επίδραση της αντλίας στον βαθμό απόδοσης είναι αμελητέα και παραλείπεται.

$$\eta_{PEMEL} = \frac{m_{H_2,prod} \cdot HHV_{H_2}}{P_{stack}} \quad 4.26$$

4.3 Αξιοποίηση Απορριπτόμενης Θερμότητας PEMEL – Τεχνική Ανάλυση

Στα παρακάτω κεφάλαια θα αναλυθούν τεχνο-οικονομικά τρία σενάρια αξιοποίησης της θερμότητας που ανακτάται από το σύστημα ψύξης του ηλεκτρολύτη όπως αυτό προσομοιώθηκε και αναλύθηκε παραπάνω. Συγκεκριμένα τα σενάρια που εξετάζονται είναι τα ακόλουθα:

- Αξιοποίηση απορριπτόμενης θερμότητας για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από ORC και ενσωμάτωση θερμότητας σε Δίκτυο τηλεθέρμανσης Χαμηλών Θερμοκρασιών 5^{ης} Γενιάς.
- Αναβάθμιση απορριπτόμενης θερμότητας μέσω Αντλίας Θερμότητας Υψηλών Θερμοκρασιών για άμεση χρήση από καταναλωτή και ενσωμάτωση θερμότητας σε Δίκτυο Τηλεθέρμανσης Χαμηλών Θερμοκρασιών 5^{ης} Γενιάς.
- Ενσωμάτωση θερμότητας σε Δίκτυο Τηλεθέρμανσης Υψηλών Θερμοκρασιών 3^{ης} Γενιάς.

4.3.1 Οργανικός Κύκλος Rankine, ORC

Τα συστήματα ORC αποσκοπούν στην αξιοποίηση απορριπτόμενης θερμότητας μιας θερμικής πηγής για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας στην γεννήτρια που είναι συνδεδεμένη με τον εκτονωτή της εγκατάστασης. Στην παρακάτω περίπτωση εξετάζεται η αξιοποίηση της απορριπτόμενης θερμότητας του ψυκτικού κυκλώματος του συστήματος ηλεκτρόλυσης, ως θερμική πηγή, για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας μέσω ενός ORC. Η παραγόμενη θερμότητα θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για να συμπληρώσει την απαιτούμενη για την ηλεκτρόλυση ενέργεια, για την συμπίεση που απαιτείται για την αποθήκευση του παραγόμενου υδρογόνου, για την τροφοδοσία δευτερευόντων καταναλωτών της εγκατάστασης ή ακόμα και να πωληθεί σε τρίτους καταναλωτές.

Στον Πίνακα 4-6, παρουσιάζονται τα βασικά χαρακτηριστικά των εργαζόμενων μέσων που θα αξιολογηθούν στην παρούσα εργασία και τα οποία χρησιμοποιούνται κατά κόρον σε εφαρμογές ORC για ανάκτηση θερμότητας χαμηλής θερμοκρασίας [41], [43], [72], [73], [74].

Πίνακας 4-6: Θερμοδυναμικές ιδιότητες εργαζόμενων μέσων [43], [73].

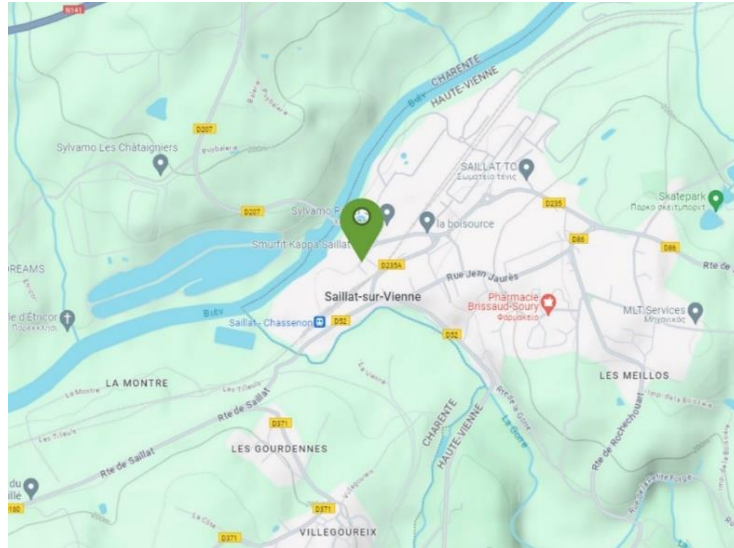
Εργαζόμενο Μέσο	Τύπος	Μοριακό Βάρος (g/mol)	Σημείο Βρασμού ($^{\circ}C$)	Κρίσιμη Θερμοκρασία ($^{\circ}C$)	Κρίσιμη Πίεση ($^{\circ}C$)
R134a	Υγρό	102.0	-26.1	101.1	40.6
R245fa	Ξηρό	134.0	14.9	154.0	36.5
R600a	Ξηρό	58.1	-11.8	134.7	36.3

4.3.1.1 Συνοριακές Συνθήκες Προβλήματος

Για την προσομοίωση του συστήματος ORC απαραίτητος είναι ο καθορισμός των συνοριακών συνθηκών του και συγκεκριμένα της θερμοκρασίας της θερμικής πηγής και του απαγωγού θερμότητας, μιας και οι δύο αυτές μεταβλητές είναι άρρηκτα συνδεδεμένες με τον θερμικό βαθμό απόδοσης του συστήματος. Για τον καθορισμό των τιμών αυτών στόχος είναι η επίτευξη της μέγιστης και της ελάχιστης δυνατής θερμοκρασία της θερμικής πηγής και του απαγωγού θερμότητας αντίστοιχα [41], [43], [73], [74].

Συνεπώς η θερμοκρασία της θερμικής πηγής καθορίστηκε στους $75^{\circ}C$, δηλαδή την μέγιστη δυνατή διατηρώντας την ελάχιστη θερμοκρασιακή διαφορά στους εναλλάκτες θερμότητας του ψυκτικού κυκλώματος στους $5^{\circ}C$, με την παροχή μάζας να υπολογίζεται ανάλογα για την επίτευξη της θερμοκρασίας αυτής.

Ενώ για την θερμική απαγωγή η ανάγκη εκμετάλλευσης ενός μέσου με χαμηλή θερμοκρασία και υψηλή παροχή, που θα είχε ως αποτέλεσμα την ελάχιστη δυνατή πίεση συμπύκνωσης στο σύστημα, έγινε η παραδοχή πως ο συμπυκνωτής του ORC ψύχεται από το νερό ενός ποταμού [75]. Η παραδοχή αυτή είναι καθόλα βάσιμη καθώς όπως πολλές βιομηχανικές εγκαταστάσεις βρίσκονται παραποτάμια χρησιμοποιώντας το νερό του ποταμού ως ψυκτικό μέσο [76], έτσι και το HYFLEXPOWER και ο υπό μελέτη PEMEL, βρίσκεται στις όχθες του ποταμού Vienne, όπως φαίνεται και στις Εικόνες 4-6,4-7. Συνεπώς η θερμοκρασία του νερού που θα χρησιμοποιηθεί ως απαγωγός θερμότητας ορίστηκε στους $15^{\circ}C$.



Εικόνα 4-6: Τοποθεσία HYFLEXPOWER.



Εικόνα 4-7: Εγκαταστάσεις HYFLEXPOWER [57].

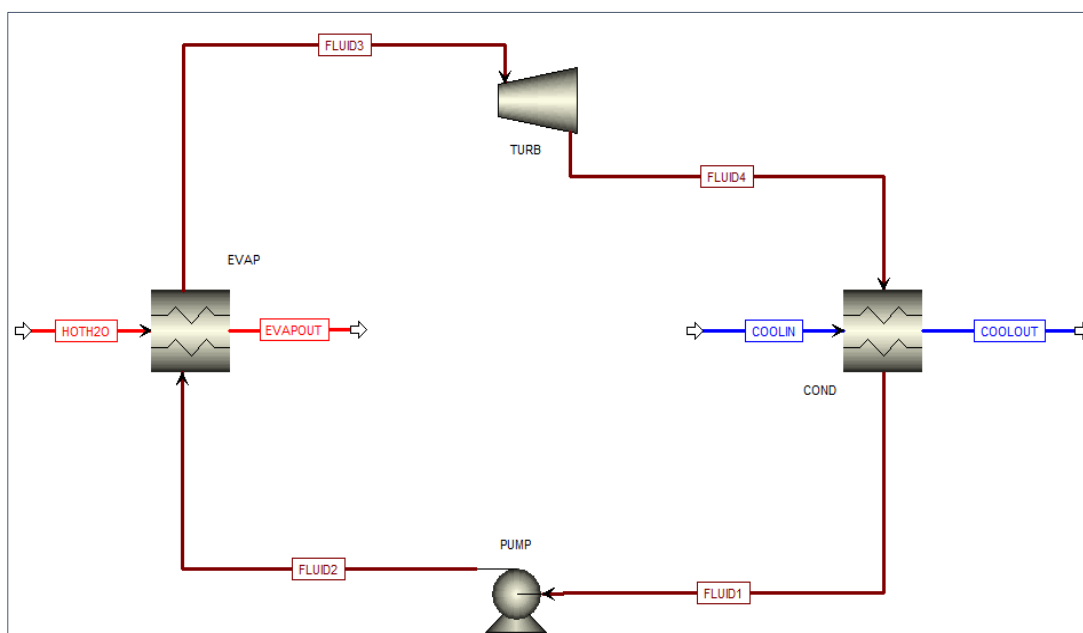
4.3.1.2 Μοντελοποίηση ORC σε περιβάλλον AspenPlus®

Με δεδομένα πλέον την θερμοκρασία και την παροχή μάζας της θερμικής πηγής, καθώς και την θερμοκρασία του απαγωγού θερμότητας προσομοιώθηκε στο AspenPlus® ο απλός ORC αποτελούμενος από έναν εξατμιστή, έναν συμπυκνωτή, μία αντλία και έναν εκτονωτή, για τα τρία υπό μελέτη εργαζόμενα μέσα. Ο ORC μοντελοποιείται σύμφωνα με τις παραδοχές του Πίνακα 4-7 και η διάταξη του παρουσιάζεται στην Εικόνα 4-8.

Πίνακας 4-7: Παραδοχές μοντέλου ORC.

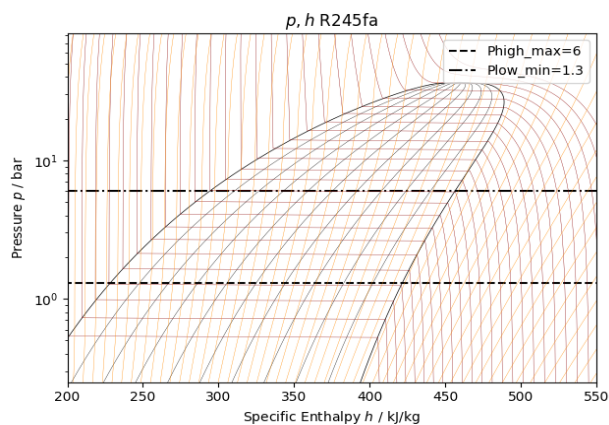
Παράμετρος	Σύμβολο	Τιμή
------------	---------	------

Θερμοκρασία Θερμικής Πηγής	θ_{source}	75 °C
Θερμοκρασία Απαγωγού Θερμότητας (Ποτάμι)	θ_{sink}	15 °C
Ελάχιστη Θερμοκρασιακή Διαφορά Εναλλακτών	PP_{HEX}	5 K
Βαθμοί Υπερθέρμανσης R245fa, R600a/R134a	T_{SH}	0/3 K
Βαθμοί Υπόψυξης	T_{SC}	0 K
Ισεντροπικός Βαθμός Απόδοσης Αντλίας	η_{pump}	85%
Ισεντροπικός Βαθμός Απόδοσης Εκτονωτή	η_{exp}	85%

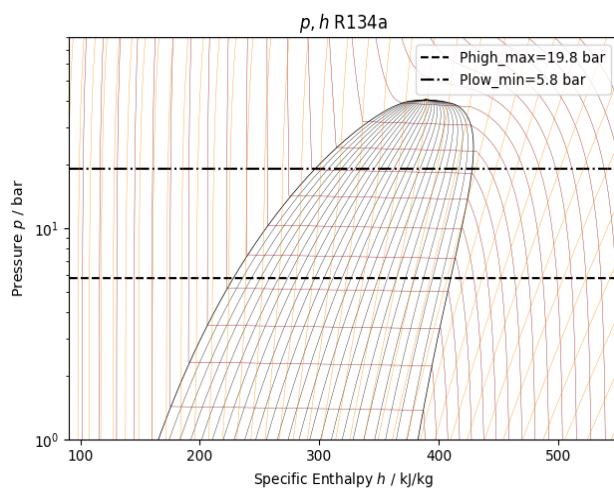


Εικόνα 4-8: Μοντελοποίηση απλού ORC σε περιβάλλον AspenPlus®.

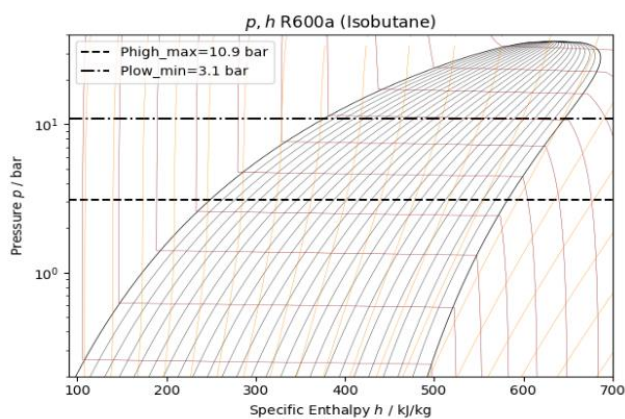
Με βάση τα δεδομένα της θερμικής πηγής και του απαγωγού θερμότητας και τις παραδοχές του συστήματος, υπολογίστηκε το εύρος πιέσεων λειτουργίας του θερμοδυναμικού κύκλου για τα τρία εργαζόμενα μέσα, όπως παρουσιάζεται στα Διαγράμματα 4-2 – 4-3.



Διάγραμμα 4-1: Καμπύλη κορεσμού, p-h, R245fa.



Διάγραμμα 4-2: Καμπύλη κορεσμού, p-h, R134a.



Διάγραμμα 4-3: Καμπύλη κορεσμού, p-h, R600a.

Βάσει λοιπόν του εύρους πιέσεων λειτουργίας των εργαζόμενων μέσων όπως απεικονίζονται παραπάνω, ακολούθησε ανάλυση ευαισθησίας ώστε να προσεγγιστεί η

Θερμοδυναμική απόδοση του ORC για διάφορους συνδυασμούς πιέσεων εξάτμισης και συμπύκνωσης.

Η καθαρή ισχύς και ο βαθμός απόδοσης του ORC για κάθε σημείο λειτουργίας υπολογίζονται σύμφωνα με τις Εξισώσεις 4.27 και 4.28 αντίστοιχα.

$$P_{net,ORC} = P_{exp} - P_{pump,ORC} \quad 4.27$$

$$\eta_{ORC} = \frac{P_{net,ORC}}{Q_{evap}} \quad 4.28$$

4.3.1.3 Επιλογή εργαζόμενου Ρευστού

Για την επιλογή του εργαζόμενου μέσου, θα ληφθούν υπόψη τόσο η θερμοδυναμική επίδοση του ORC, όσο και τα περιβαλλοντικά-κανονιστικά χαρακτηριστικά του κάθε εργαζόμενου μέσου. Συγκεκριμένα συνεκτιμήθηκε η μέγιστη καθαρή ισχύς και ο βαθμός απόδοσης του θερμοδυναμικού κύκλου καθώς, οι περιβαλλοντικοί δείκτες GWP, ODP και η κατηγοριοποίηση κατά ASHRAE, που συνοψίζονται στον Πίνακα 4-8.

Πίνακας 4-8: Περιβαλλοντικές Ιδιότητες Εργαζόμενων Μέσων [45], [46].

Εργαζόμενο Μέσο	GWP	ODP	Ευφλεκτότητα	Τοξικότητα
R134a	1430	0	Καθόλου	Χαμηλή
R245fa	1030	0	Καθόλου	Υψηλή
R600a	3	0	Υψηλή	Χαμηλή

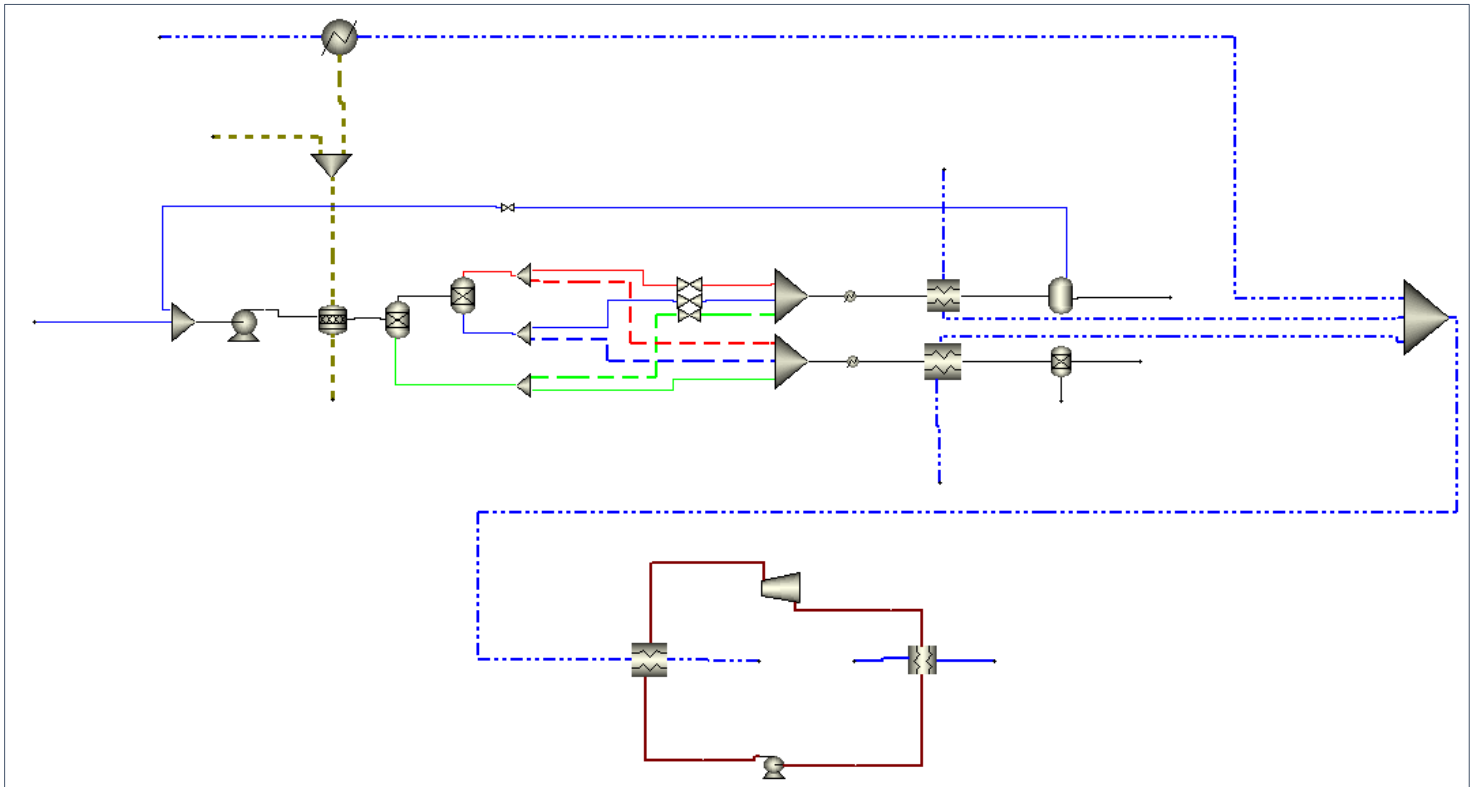
4.3.1.4 Συνθήκες Λειτουργίας ORC

Αφού έχει επιλεχθεί το εργαζόμενο μέσο, το σημείο λειτουργίας καθορίζεται, όπως είθισται στις εφαρμογές ανάκτησης απορριπτόμενης θερμότητας, με γνώμονα την μεγιστοποίηση της παραγόμενης καθαρής ισχύος [39], [75]. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης ευαισθησίας, η σύγκριση των θερμοδυναμικών επιδόσεων των οργανικών ρευστών, το σημείο λειτουργίας και το διάγραμμα θερμοκρασίας, εντροπίας ($T - s$), του επιλεγμένου ORC παρουσιάζονται στο κεφάλαιο «Αποτελέσματα».

4.3.1.5 Συζευγμένο Σύστημα PEMEL και ORC

Στην Εικόνα 4-9 παρουσιάζεται το συζευγμένο σύστημα ηλεκτρόλυσης και ανάκτησης θερμότητας με αξιοποίηση του θερμοδυναμικού κύκλου ORC, με τον συνολικό βαθμό απόδοσης της εγκατάστασης να υπολογίζεται σύμφωνα με την Εξίσωση 4.29.

$$\eta_{PEMEL,ORC} = \frac{m_{H_2,prod} \cdot HHV_{H_2} + P_{net,ORC}}{P_{stack}} \quad 4.29$$



Εικόνα 4-9: Μοντελοποίηση συστήματος ηλεκτρόλυσης και ανάκτησης θερμότητας μέσω ORC σε περιβάλλον AspenPlus®.

4.3.2 Δίκτυο Τηλεθέρμανσης Χαμηλών Θερμοκρασιών, LTDHN

Τα δίκτυα τηλεθέρμανσης χαμηλών θερμοκρασιών αναμένεται να αποτελέσουν αναπόσπαστο μέρος ενός μελλοντικού, κλιματικά ουδέτερου ενεργειακού συστήματος. Για την βελτίωση της απόδοσης και τον περιορισμό των απωλειών των ενεργειακών συστημάτων κρίνεται απαραίτητη η εδραίωση τεχνολογιών πολυπαραγωγής και η διαφοροποίηση των πηγών θερμότητας. Συγκεκριμένα, η επέκταση της χρήσης θερμομονωτικών υλικών από τα δίκτυα διανομής και τους τελικούς καταναλωτές, η αξιοποίηση ανανεώσιμων πηγών θερμότητας και η ενσωμάτωση της απορριπτόμενης θερμότητας βιομηχανικών διεργασιών, προβλέπεται να αντικαταστήσουν τα υπάρχοντα μέσα θέρμανσης με τα δίκτυα τηλεθέρμανσης 4^{ης} και 5^{ης} γενιάς με θερμοκρασίες παροχής από 30 °C – 60 °C.

Στο πλαίσιο αυτό κρίνεται τεχνικά εφικτή η περαιτέρω εκμετάλλευση της θερμικής πηγής. Συγκεκριμένα, αφού η θερμική πηγή προσδώσει την απαραίτητη θερμική ισχύ για την εξάτμιση του οργανικού ρευστού στον εξατμιστή του ORC, αυτή διοχετεύεται εκ νέου στο δίκτυο τηλεθέρμανσης ώστε να καταναλωθεί από έναν τελικό διασυνδεδεμένο χρήστη. Τα τεχνικά χαρακτηριστικά του δικτύου τηλεθέρμανσης παρουσιάζονται στον Πίνακα 4-9, ενώ παράλληλα γίνεται η παραδοχή πως η θερμική πηγή είναι άμεσα συνδεδεμένη με το δίκτυο.

Πίνακας 4-9: Τεχνικά χαρακτηριστικά του δικτύου τηλεθέρμανσης χαμηλών θερμοκρασιών.

Παράμετρος	Σύμβολο	Τιμή
Θερμοκρασία Παροχής Δικτύου Τηλεθέρμανσης	$\theta_{DHN, supply}$	$\theta_{evap, ORC, out}$
Θερμοκρασία Επιστροφής Δικτύου Τηλεθέρμανσης	$\theta_{DHN, return}$	20 °C ^[51]

Παράλληλα, καθώς η ζήτηση θερμότητας δεν ευθυγραμμίζεται πάντα χρονικά με την ανάκτηση της απορριπτόμενης θερμότητας, θεωρείται πως το σύστημα περιλαμβάνει επίσης μια δεξαμενή αποθήκευσης ζεστού νερού (buffer) για την εξασφάλιση της ευελιξίας του. Η δεξαμενή νερού διαστασιοποιείται για κάθε σενάριο ώστε να μπορεί να αποθηκεύσει το σύνολο της μέσης παραγωγής θερμότητας που διοχετεύεται στα DHN σύμφωνα με την Εξίσωση 4.30. Οι απώλειες θερμότητας κατά την έγχυση θερμότητας στο δίκτυο και κατά την αποθήκευση της στην δεξαμενή θεωρούνται αμελητέες.

$$c_{buffer} = cf \cdot 24 \cdot Q_{DHN} \quad 4.30$$

4.3.2.1 Συζευγμένο Σύστημα PEMEL, ORC και LTDHN

Η τελική εγκατάσταση αποτελεί ουσιαστικά ένα σύστημα τριπαραγωγής υδρογόνου, ηλεκτρικής ενέργειας και θερμότητας ο βαθμός απόδοσης του οποίου υπολογίζεται σύμφωνα με την Εξίσωση 4.31.

$$\eta_{PEMEL, ORC, LTDHN} = \frac{m_{H_2, prod} \cdot HHV_{H_2} + P_{net, orc} + Q_{LTDHN}}{P_{stack}} \quad 4.31$$

4.3.3 Αντλία Θερμότητας Υψηλών Θερμοκρασιών, ΗΤΗΡ

Η χρήση των αντλιών θερμότητας υψηλών θερμοκρασιών, αποσκοπεί στην αναβάθμιση της της απορριπτόμενης θερμότητας μιας θερμικής πηγής και χρήση της κατά την θερμική διεργασία ενός καταναλωτή, υψηλών θερμοκρασιακών απαιτήσεων. Το υψηλό θερμοκρασιακό επίπεδο της αναβαθμισμένης θερμότητας συνεπάγεται και υψηλές

απώλειες κατά την μεταφορά της και συνεπώς υψηλά κόστη για τον περιορισμό τους. Συνεπώς η άμεση κατανάλωση της, περιπτώσεις που αυτή καθίσταται δυνατή, είναι ενδεδειγμένη. Όπως αναφέρθηκε και στο κεφάλαιο «Περιγραφή προγράμματος HYFLEXPOWER», το πρόγραμμα HYFLEXPOWER και ο *PEM Silyzer 200 – Siemens* ηλεκτρολύτης, λαμβάνουν χώρα στις εγκαταστάσεις του παγκόσμιου ηγέτη στην συσκευασία χαρτιού *Smurfit Kappa*. Η χαρτοβιομηχανία γενικότερα κάνει χρήση θερμικών διεργασιών υψηλών θερμοκρασιών και συγκεκριμένα χρησιμοποιεί ατμό υψηλής θερμοκρασίας κατά τα στάδια της ξήρανσης του χαρτιού και κατά τον σχηματισμό του χαρτοπολτού στον χωνευτήρα, εξαιτίας της ομοιόμορφης θέρμανσης, του υψηλού θερμικού του περιεχομένου και της ακρίβειας στην θερμοκρασία του. Συμβατικά στην χαρτοβιομηχανία χρησιμοποιούνται ατμολέβητες φυσικού αερίου για την παραγωγή ατμού σε διαφορετικές πιέσεις και θερμοκρασίες ανάλογα με τις απαιτήσεις του εκάστοτε προϊόντος [50], [77], [78]. Τυπικά οι πιέσεις του ατμού κυμαίνονται από 0 έως 8 bar ανάλογα με την διεργασία και το στάδιο της. Στο παρόν κεφάλαιο θα εξεταστεί η παραγωγή ατμού 120°C, 1 bar σε μια αντλία θερμότητας υψηλών θερμοκρασιών με αξιοποίηση της απορριπτόμενης θερμότητας του συστήματος ηλεκτρόλυσης, για την άμεση κατανάλωση του από την χαρτοβιομηχανία *Smurfit Kappa* [50].

Το εργαζόμενο μέσο της αντλίας που εξετάστηκε, είναι το R1233zd, το οποίο χρησιμοποιείται σε πληθώρα εμπορικών εφαρμογών αντλιών θερμότητας υψηλών θερμοκρασιών, καθώς διαθέτει πολύ μικρό δείκτη GWP και δεν είναι εύφλεκτο και τα κύρια χαρακτηριστικά του συνοψίζονται στον Πίνακα 4-10 [79], [80], [81], [82], [83], [84]. Η διάταξη της αντλίας που θα εξεταστεί θα είναι μονοβάθμιας συμπίεσης με εσωτερικό εναλλάκτη θερμότητας IHX, καθότι συνδυάζει απλή διαμόρφωση, υποκρίσιμη λειτουργία και υψηλούς συντελεστές θερμικής απόδοσης [50].

Πίνακας 4-10: Θερμοδυναμικά χαρακτηριστικά και περιβαλλοντικές ιδιότητες R1233zd.

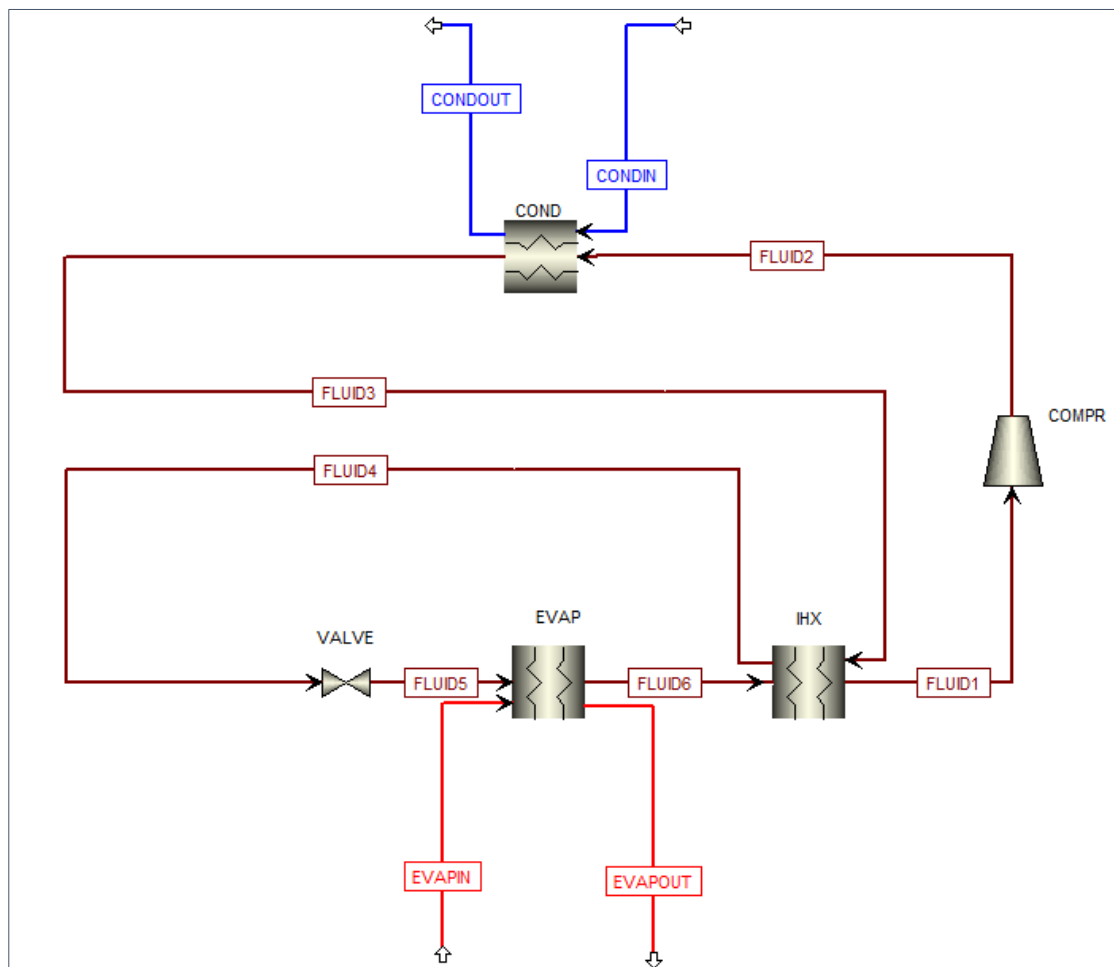
Εργαζόμενο Μέσο	Μοριακό Βάρος (g/mol)	Σημείο Βρασμού (°C)	Κρίσιμη Θερμοκρασία (°C)	Κρίσιμη Πίεση (°C)	GWP	ODP	Κλάση ASHRAE
R1233zd	130.5	18.3	165.5	35.7	1	0	A1

4.3.3.1 Μοντελοποίηση ΗΤΗΡ σε περιβάλλον AspenPlus®

Με δεδομένα πλέον την θερμοκρασία και την παροχή μάζας της θερμικής πηγής, καθώς και επιθυμητή θερμοκρασία εξόδου του απαγωγού θερμότητας προσομοιώθηκε στο AspenPlus® μια αντλία θερμότητας αποτελούμενη από έναν εξατμιστή, έναν συμπυκνωτή, μία στραγγαλιστική βαλβίδα, έναν συμπιεστή και έναν εσωτερικό εναλλάκτη θερμότητας, για το επιλεγμένο εργαζόμενο μέσο. Η αντλία θερμότητας μοντελοποιείται σύμφωνα με τις παραδοχές του Πίνακα 4-11 και η διάταξη της παρουσιάζεται στην Εικόνα 4-10.

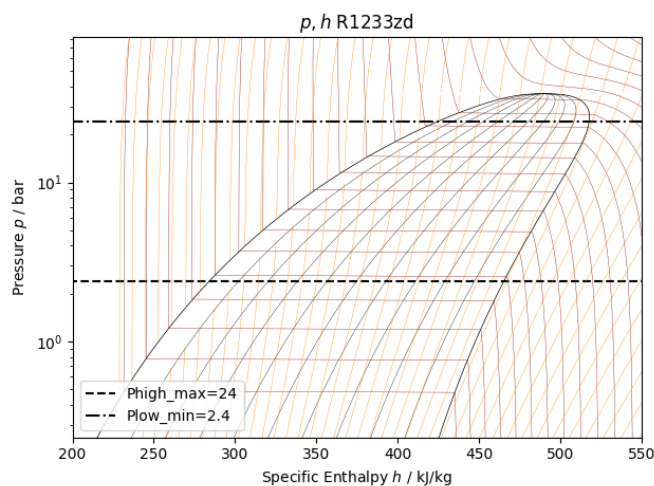
Πίνακας 4-11: Δεδομένα Αντλίας Θερμότητας Υψηλών Θερμοκρασιών.

Παράμετρος	Σύμβολο	Τιμή
Θερμοκρασία Θερμικής Πηγής	θ_{source}	75 °C
Θερμοκρασία Εισόδου Απαγωγού Θερμότητας	$\theta_{sink,in}$	75 °C
Θερμοκρασία Εξόδου Απαγωγού Θερμότητας	$\theta_{sink,out}$	120 °C ^[50]
Ελάχιστη Θερμοκρασιακή Διαφορά Εξατμιστή	PP_{evap}	5 K
Ελάχιστη Θερμοκρασιακή Διαφορά Συμπυκνωτή και Εσωτερικού Εναλλάκτη	PP_{cond}, PP_{IHx}	5 – 40 K ^[85]
Βαθμοί Υπόψυξης Πριν τον IHX	$T_{SC,I}$	5 K ^[50]
Επιπλέον Υπόψυξη Μετά τον IHX	$T_{SC,II}$	20 K ^[50]
Βαθμοί Υπερθέρμανσης Πριν τον IHX	$T_{SH,I}$	0 K
Λόγος Συμπίεσης Συμπιεστή	π_{comp}	5 ^[86]
Βαθμός Απόδοσης Συμπιεστή	η_{comp}	70%



Εικόνα 4-10: Μοντελοποίηση ΗΤΗΡ με ΙΗΧ σε περιβάλλον AspenPlus®.

Με βάση τα δεδομένα της θερμικής πηγής και του απαγωγού θερμότητας και τις παραδοχές του συστήματος, υπολογίστηκε το εύρος πιέσεων λειτουργίας του θερμοδυναμικού κύκλου για το επιλεγμένο εργαζόμενο μέσο, όπως παρουσιάζεται στο Διάγραμμα 4-4.



Διάγραμμα 4-4: Καμπύλη κορεσμού, p-h, R1233zd.

Βάσει λοιπόν του εύρους πιέσεων λειτουργίας, ακολούθησε ανάλυση ευαισθησίας ώστε να προσεγγιστεί η θερμοδυναμική απόδοση της αντλίας θερμότητας υψηλών θερμοκρασιών και συγκεκριμένα να υπολογιστούν η παραγόμενη θερμική ισχύς στον συμπυκνωτή, Q_{cond} , και ο συντελεστής θερμικής απόδοσης, CoP, της αντλίας θερμότητας, συναρτήσει της πίεσης εξάτμισης, p_{evap} , ικανοποιώντας σε κάθε περίπτωση τις παραδοχές-περιορισμούς του Πίνακα 4-11.

Ο συντελεστής θερμικής απόδοσης για κάθε σημείο λειτουργίας της αντλίας υπολογίζεται σύμφωνα με την Εξίσωση 4.32.

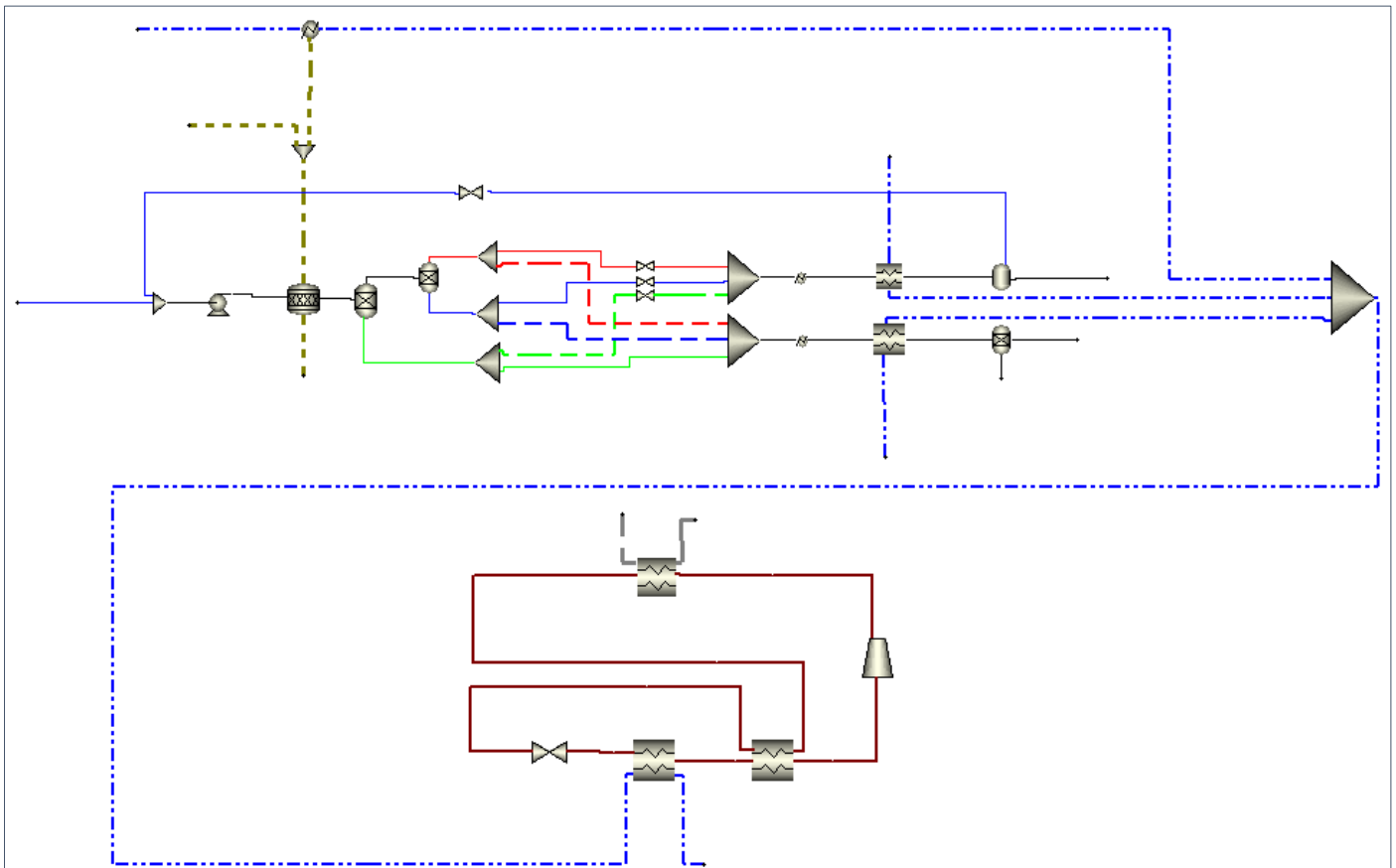
$$CoP = \frac{Q_{cond}}{P_{comp}} \quad 4.32$$

Από την ανάλυση ευαισθησίας το σημείο λειτουργίας επιλέχθηκε στην πίεση εξάτμισης για την οποία η παραγόμενη θερμική ισχύς στον συμπυκνωτή, Q_{cond} , και ο συντελεστής θερμικής απόδοσης, CoP λαμβάνουν την μέγιστη τιμή. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης ευαισθησίας, το σημείο λειτουργίας και το διάγραμμα πίεσης ενθαλπίας, (p – h), της αντλίας θερμότητας για το επιλεγμένο σημείο λειτουργίας παρουσιάζονται στο κεφάλαιο «Αποτελέσματα».

4.3.3.2 Συζευγμένο Σύστημα PEMEL και ΗΤΗΡ

Στην Εικόνα 4-11 παρουσιάζεται το συνδεδεμένο σύστημα ηλεκτρόλυσης και αναβάθμισης της απορριπτόμενης θερμότητας με αξιοποίηση του θερμοδυναμικού κύκλου μιας αντλίας θερμότητας με εσωτερικό εναλλάκτη, με τον συνολικό συντελεστή απόδοσης της εγκατάστασης να υπολογίζεται σύμφωνα με την Εξίσωση 4.33.

$$COP_{PEMEL,ORC} = \frac{m_{H_2,prod} \cdot HHV_{H_2} + Q_{cond}}{P_{stack} + P_{comp}} \quad 4.33$$



Εικόνα 4-11: Μοντελοποίηση συστήματος ηλεκτρόλυσης και αναβάθμισης απορριπτόμενης θερμότητας μέσω ΗΤΗΡ σε περιβάλλον AspenPlus®.

4.3.3.3 Συζευγμένο Σύστημα PEMEL, ΗΤΗΡ και LTDHN

Ομοίως και με το προηγούμενο σενάριο, αφού η θερμική πηγή προσδώσει την απαραίτητη θερμική ισχύ για την εξάτμιση του οργανικού ρευστού στον εξατμιστή της ΗΤΗΡ, αυτή διοχετεύεται εκ νέου στο δίκτυο τηλεθέρμανσης και καταναλώνεται από έναν τελικό διασυνδεδεμένο χρήστη. Οι παραδοχές σχετικά με τα τεχνικά χαρακτηριστικά της εγκατάστασης συνοψίζονται στον Πίνακα 4-12. Επιπρόσθετα και στην περίπτωση αυτή θεωρείται πως γίνεται χρήση δεξαμενής νερού αποθήκευσης θερμότητας.

Πίνακας 4-12: Τεχνικά χαρακτηριστικά του δικτύου τηλεθέρμανσης χαμηλών θερμοκρασιών.

Παράμετρος	Σύμβολο	Τιμή
Θερμοκρασία Παροχής Δικτύου Τηλεθέρμανσης	$\theta_{DHN, supply}$	$\theta_{evap,HTHP,out}$
Θερμοκρασία Επιστροφής Δικτύου Τηλεθέρμανσης	$\theta_{DHN,retutn}$	20 °C ^[51]

Η τελική εγκατάσταση αποτελεί ουσιαστικά ένα σύστημα συμπαραγωγής υδρογόνου και θερμότητας. Οι φορείς της θερμότητας είναι ο ατμός στην περίπτωση της αντλίας θερμότητας και το νερό στην περίπτωση του δικτύου τηλεθέρμανσης. Ο βαθμός απόδοσης του τελικού συστήματος υπολογίζεται σύμφωνα με την Εξίσωση 4.34.

$$\eta_{PEMEL,HTHP,LT DHN} = \frac{m_{H_2,prod} \cdot HHV_{H_2} + Q_{cond} + Q_{LT DHN}}{P_{stack} + P_{comp}} \quad 4.34$$

4.3.4 Δίκτυο Τηλεθέρμανσης Υψηλών Θερμοκρασιών, HTDHN

Το τελευταίο σενάριο αξιοποίησης της θερμότητας που απορρίπτεται στο ψυκτικό σύστημα του PEMEL είναι η διοχέτευση της σε δίκτυο τηλεθέρμανσης 3^{ης} γενιάς. Η συγκεκριμένη τεχνολογία κυριαρχεί σήμερα στα δίκτυα τηλεθέρμανσης με τον φορέα θερμότητας να είναι το πεπιεσμένο νερό σε θερμοκρασίες μεταξύ 70°C – 100 °C [4], [51], [52]. Συνεπώς για την συγκεκριμένη περίπτωση θεωρείται πως το νερό που ψύχει το σύστημα ηλεκτρόλυσης και αποκτά θερμοκρασία 75 °C διοχετεύεται σε ένα τέτοιο δίκτυο. Τα τεχνικά χαρακτηριστικά του δικτύου τηλεθέρμανσης συνοψίζονται στον Πίνακα 4-13. Και στην περίπτωση αυτή θεωρείται πως γίνεται χρήση δεξαμενής νερού αποθήκευσης θερμότητας.

Πίνακας 4-13: Τεχνικά χαρακτηριστικά του δικτύου τηλεθέρμανσης υψηλών θερμοκρασιών.

Παράμετρος	Σύμβολο	Τιμή
Θερμοκρασία Παροχής Δικτύου Τηλεθέρμανσης	$\theta_{DHN, supply}$	75 °C
Θερμοκρασία Επιστροφής Δικτύου Τηλεθέρμανσης	$\theta_{DHN,retutn}$	20 °C ^[51]

4.3.4.1 Συζευγμένο Σύστημα PEMEL και HTDHN

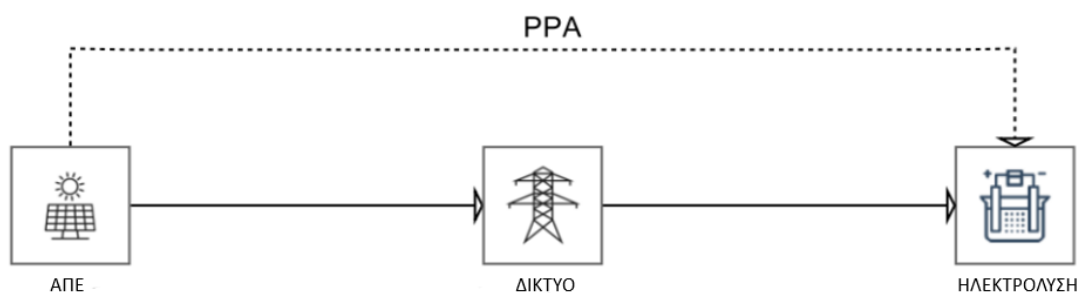
Το συνδεδεμένο σύστημα ηλεκτρόλυσης και δικτύου τηλεθέρμανσης υψηλών θερμοκρασιών αποτελεί ουσιαστικά ένα σύστημα συμπαραγωγής υδρογόνου και ανάκτησης της απορριπτόμενης θερμότητας με κατανάλωση της από ένα άμεσα συνδεδεμένο δίκτυο τηλεθέρμανσης. Ο βαθμός απόδοσης του συστήματος υπολογίζεται λοιπόν σύμφωνα με την Εξίσωση 4.35.

$$\eta_{PEMEL,HTDHN} = \frac{m_{H_2,prod} \cdot HHV_{H_2} + Q_{HTDHN}}{P_{stack}} \quad 4.35$$

4.3.5 Τροφοδοσία Συστήματος Ηλεκτρόλυσης με Ηλεκτρική Ενέργεια και Συντελεστής Φορτίου

Έχοντας αναλύσει σε τεχνικό επίπεδο τις συνθήκες λειτουργίας του συστήματος ηλεκτρόλυσης και των τριών σεναρίων ανάκτησης της απορριπτόμενης θερμότητας για το ονομαστικό σημείο λειτουργίας του ηλεκτρολύτη σε πλήρες φορτίο, σειρά έχει ο καθορισμός της μορφής της τροφοδοσίας του συστήματος με ηλεκτρική ενέργεια, η οποία αποτελεί το μεγαλύτερο μέρος των λειτουργικών εξόδων του συστήματος ηλεκτρόλυσης και καθορίζει τον αντίστοιχο συντελεστή φορτίου (*cf*) της εγκατάστασης.

Για τον σκοπό αυτό εξετάζεται η προμήθεια ενέργειας από ιδιόκτητο, διασυνδεδεμένο με το δίκτυο, φωτοβολταϊκό πάρκο, εν είδει σύμβασης προμήθειας ανανεώσιμης ενέργειας *physical off-site PPA*. Στην περίπτωση αυτή, θεωρείται πως το σύστημα παραγωγής ενέργειας -φωτοβολταϊκό πάρκο- και το σύστημα κατανάλωσης ενέργειας -παραγωγή υδρογόνου- βρίσκονται υπό κοινή ιδιοκτησία (*prosumer*) με την τιμή πώλησης/αγοράς της ηλεκτρικής ενέργειας να καθορίζεται ίση με το σταθμισμένο κόστος παραγωγής της, *LCOE*, καθ' όλη την διάρκεια ζωής του έργου. Συγκεκριμένα, σύμφωνα με το άρθρο 4 του «Κατ' Εξουσιοδότηση Κανονισμού 2023/1184 της Επιτροπής», θεωρώντας πως η υπό εξέταση εγκατάσταση βρίσκεται σε ζώνη προσφοράς όπου η ένταση εκπομπών της ηλεκτρικής ενέργειας είναι χαμηλότερη από $18 \text{ gCO}_2 - \text{eq/MJ}$ και έχει συναφθεί σύμβαση αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας για ποσότητα τουλάχιστον ισοδύναμη με την ποσότητα ηλεκτρικής ενέργειας που θα καταναλώνεται όπως αναφέρθηκε παραπάνω, θα μπορεί η ενέργεια που λαμβάνεται από το δίκτυο για την παραγωγή υδρογόνου να λογίζεται ως πλήρως ανανεώσιμη και συνεπώς το παραγόμενο υδρογόνο θα πιστοποιείται ως *RFNBO* με παράγοντα άμεσων εκπομπών $0 \text{ gCO}_2 - \text{eq/MJ}$, δηλαδή ως «πράσινο» [87], [88].



Εικόνα 4-12: Σχηματική απεικόνιση σύμβασης προμήθειας ανανεώσιμης ενέργειας μέσω δικτύου [88].

Για την προμήθεια της εγκατάστασης με ανανεώσιμη ενέργεια μέσω της σύμβασης όπως περιγράφηκε, θα εξεταστούν τα σενάρια εγκατεστημένης φωτοβολταϊκής ισχύος 1-5 φορές της ονομαστικής ισχύος του PEMEL, ώστε να μελετηθεί η λειτουργία των συζευγμένων

συστημάτων, για διαφορετικούς συντελεστές φορτίου, δηλαδή για διαφορετικές ετήσιες ώρες λειτουργίας.

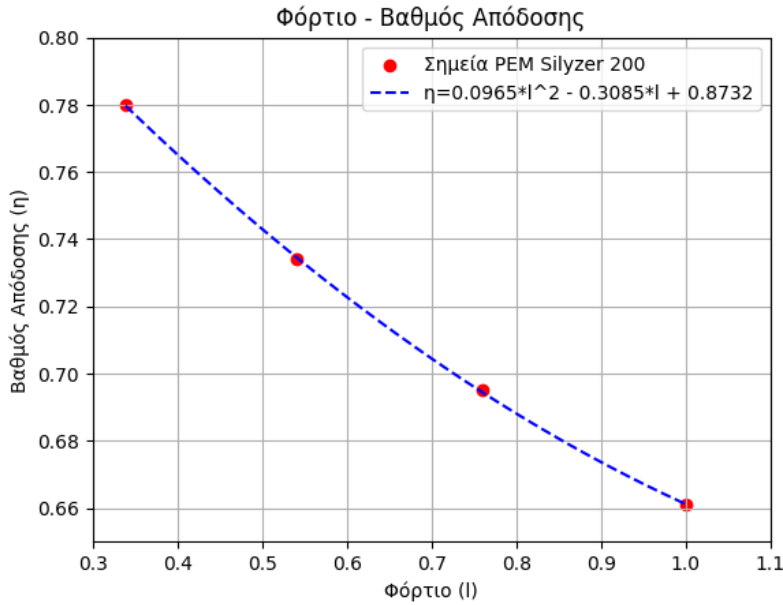
Ο συντελεστής φορτίου του φωτοβολταϊκού πάρκου προσδιορίστηκε βάσει των μετεωρολογικών δεδομένων του σημείου εγκατάστασης του υπό μελέτη PEM *Sylizer 200 – Siemens* [89]. Οι συντελεστές φορτίου του φωτοβολταϊκού πάρκου και του συστήματος ηλεκτρόλυσης που αυτό θα τροφοδοτεί μέσω του δικτύου, παρουσιάζονται στον Πίνακα 4-14 για τα διαφορετικά σενάρια λόγου εγκατεστημένης ισχύος $P_{PV,nom}/P_{PEM,nom}$.

Πίνακας 4-14: Συντελεστές φορτίου φωτοβολταϊκού πάρκου και συστήματος παραγωγής υδρογόνου.

$P_{PV,nom}/P_{PEM,nom}$	cf_{PV}	cf_{PEM}
1	15.8 %	15.8 %
2	15.8 %	31.6 %
3	15.8 %	47.4 %
4	15.8 %	63.2 %
5	15.8 %	79.0 %

1.1.1 Επίδραση Γήρανσης και Φορτίου στον Βαθμό Απόδοσης του PEMEL

Η προβλεπόμενη διάρκεια ζωής ενός συστήματος PEMEL, με βάση την τρέχουσα ανάπτυξη της τεχνολογίας κυμαίνεται μεταξύ 50,000 h – 75,000 h, ενώ αναμένεται να φτάσει τις 90,000 h έως το 2030 [4], [27]. Ο περιορισμός της διάρκειας ζωής οφείλεται στην γήρανση των εξαρτημάτων του εξοπλισμού του PEMEL και συγκεκριμένα στην λέπτυνση του ηλεκτροδίου της μεμβράνης, την οξείδωση του ηλεκτροδίου και τον εκφυλισμό της δράσης των καταλυτών, με συνέπεια ο βαθμός απόδοσης του PEMEL να μειώνεται κατά 0.15% ανά 1,000 h λειτουργίας [19], [90]. Για δεδομένη λοιπόν επιδείνωση του βαθμού απόδοσης είναι δυνατή η προσαρμογή του φορτίου λειτουργίας του με στόχο την διατήρηση σταθερής απορριπτόμενης θερμικής ισχύος και αξιοποίησης της, από τα συστήματα ανάκτησης θερμότητας που καθορίστηκαν παραπάνω, για όλη την διάρκεια ζωής του έργου.



Διάγραμμα 4-5: Συνάρτηση βαθμού απόδοσης – φορτίου.

Η Εξίσωση 4.36 περιγράφει την συσχέτιση μεταξύ φορτίου και βαθμού απόδοσης για το επιτρεπτό εύρος φόρτισης του και προκύπτει από την πολυωνυμική παρεμβολή για τις δεδομένες μετρήσεις από τον κατασκευαστή, σύμφωνα με τον Πίνακα 4-1, όπως φαίνεται στο Διάγραμμα 4-5.

$$\eta_{PEM}(l) = 0.0965 \cdot l^2 - 0.3085 \cdot l + 0.8732 \quad 4.36$$

Ο πραγματικός βαθμός απόδοσης για κάθε συνθήκη φόρτισης συμπεριλαμβανομένου της γήρανσης υπολογίζεται σύμφωνα με την Εξίσωση 4.37.

$$\eta_{PEM,act} = \eta_{PEM}(l) - deg \quad 4.37$$

Ενώ ταυτόχρονα υπολογίζεται σύμφωνα με την Εξίσωση 4.38.

$$\eta_{PEM,act} = 100\% - \frac{Q_{GEN}}{P_{PEM}} \quad 4.38$$

Το φορτίο του συστήματος PEMEL ορίζεται ως η πραγματική ασκούμενη ισχύς προς την ονομαστική σύμφωνα με την Εξίσωση 4.39.

$$l = \frac{P_{PEM}}{P_{PEM,nom}} \quad 4.39$$

Συνδυάζοντας τις παραπάνω εξισώσεις προκύπτει η Εξίσωση 4.40.

$$\frac{Q_{GEN}}{P_{PEM,nom}} + 0.0965 \cdot l^3 - 0.3085 \cdot l^2 - (1 + deg - 0.8732) \cdot l = 0 \quad 4.40$$

Για δεδομένη λοιπόν χρήση και συνεπώς γήρανση, είναι δυνατή η διατήρηση σταθερής παραγόμενης απορριπτόμενης θερμότητας για τις συνθήκες φόρτισης που προκύπτουν κάθε φορά με αριθμητική επίλυση της Εξίσωσης 4.40. Στα πλαίσια της μελέτης έγινε η παραδοχή πως η γήρανση επιδρά βηματικά στο τέλος κάθε χρόνου λειτουργίας και συνεπώς ο PEMEL λειτουργεί υπό στο ίδιο φορτίο κατά την διάρκεια ενός έτους.

4.3.6 Μέσοι Βαθμοί Απόδοσης

Όπως γίνεται αντιληπτό, εφόσον το σύστημα παραγωγής υδρογόνου λειτουργεί σε διαφορετικές συνθήκες φόρτισης δεδομένης της γήρανσης, με στόχο την διατήρηση σταθερής απορριπτόμενης θερμότητας, ο βαθμός απόδοσης του δεν θα είναι σταθερός με το πέρας των ετών λειτουργίας. Συνεπώς για την αξιολόγηση της απόδοσης των συζευγμένων συστημάτων για όλη την διάρκεια ζωής του έργου ορίζονται παρακάτω οι μέσοι βαθμοί/συντελεστές απόδοσης.

4.3.6.1 Μέσος Βαθμός Απόδοσης Συζευγμένου Συστήματος PEMEL, ORC και LTDHN

Ο μέσος βαθμός απόδοσης για την διάρκεια ζωής του συζευγμένου συστήματος PEMEL, ORC και LTDHN υπολογίζεται σύμφωνα με την Εξίσωση 4.41.

$$\eta_{PEMEL,ORC,LTDHN} = \frac{\sum_{t=1}^N m_{H_2,prod} \cdot HHV_{H_2,t} + \sum_{t=1}^N P_{net,orc,t} + \sum_{t=1}^N Q_{LTDHN,t}}{\sum_{t=1}^N P_{stack,t}} \quad 4.41$$

4.3.6.2 Μέσος Συντελεστής Απόδοσης Συζευγμένου Συστήματος PEMEL, ΗΤΗΡ και LTDHN

Ο μέσος συντελεστής απόδοσης για την διάρκεια ζωής του συζευγμένου συστήματος PEMEL, ORC και LTDHN υπολογίζεται σύμφωνα με την Εξίσωση 4.43.

$$COP_{PEMEL,HTHP,LTDHN} = \frac{\sum_{t=1}^N m_{H_2,prod} \cdot HHV_{H_2,t} + \sum_{t=1}^N Q_{cond,t} + \sum_{t=1}^N Q_{LTDHN,t}}{\sum_{t=1}^N P_{stack,t} + \sum_{t=1}^N P_{comp,t}} \quad 4.42$$

4.3.6.3 Μέσος Βαθμός Απόδοσης Συζευγμένου Συστήματος PEMEL και HTDHN

Ο μέσος βαθμός απόδοσης για την διάρκεια ζωής του συζευγμένου συστήματος PEMEL και HTDHN υπολογίζεται σύμφωνα με την Εξίσωση 4.43.

$$\eta_{PEMEL,HTDHN} = \frac{\sum_{t=1}^N m_{H_2,prod} \cdot HHV_{H_2,t} + \sum_{t=1}^N Q_{HTDHN,t}}{\sum_{t=1}^N P_{stack,t}} \quad 4.43$$

4.4 Αξιοποίηση Απορριπτόμενης Θερμότητας PEMEL – Περιβαλλοντική Ανάλυση

Έχοντας αναλύσει το είδος της ηλεκτρικής τροφοδοσίας και τα σενάρια συντελεστή φορτίου του PEMEL, έχοντας καθορίσει τον τρόπο προσδιορισμού του φορτίου λειτουργίας συναρτήσει της γήρανσης και έχοντας αναπτύξει τα σενάρια ανάκτησης της απορριπτόμενης θερμότητας, στόχος του παρόντος κεφαλαίου είναι η αποτίμηση της μείωσης του ανθρακικού αποτυπώματος που επιτυγχάνεται μέσω της αντικατάστασης των συμβατικών τεχνολογιών παραγωγής υδρογόνου και θερμότητας, με υιοθέτηση των υπό μελέτη συζευγμένων συστημάτων.

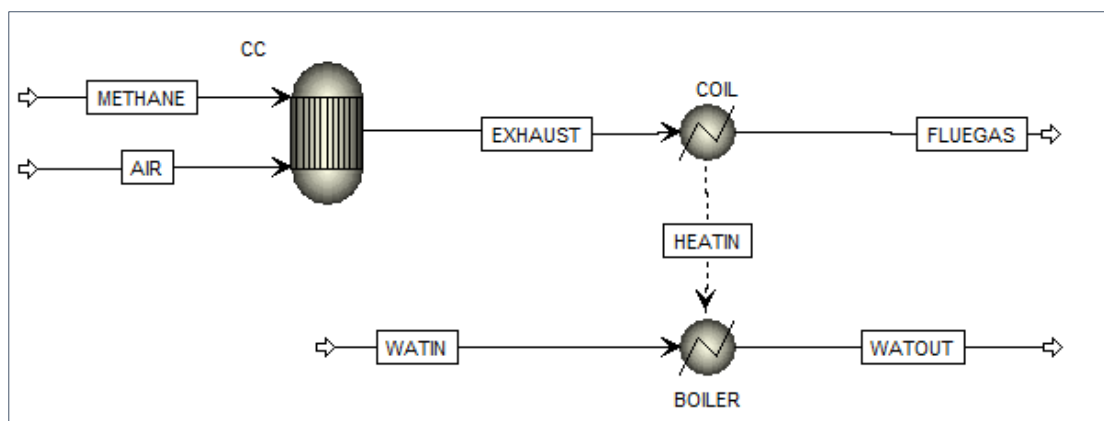
Συγκεκριμένα για τα σενάρια που αναπτύχθηκαν στην τεχνική ανάλυση, εξετάζεται ποιες θα ήταν οι άμεσες εκπομπές CO_2 , εάν η μέθοδος παραγωγής του υδρογόνου ήταν η SMR, εάν η αξιοποιήσιμη θερμότητα προερχόταν από λέβητα φυσικού αερίου και εάν η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια στον ORC, προερχόταν από το ενεργειακό μίγμα του δικτύου.

Η ένταση άνθρακα για την παραγωγή «γκρι» υδρογόνου μέσω SMR σύμφωνα με την βιβλιογραφία είναι $CI_{SMR} = 9 \text{ kg } CO_2 - eq / \text{kg } H_2$ [3], ενώ η ένταση άνθρακα του δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας θεωρήθηκε ίση με τον ευρωπαϊκό μέσο όρο $CI_{grid} = 251 \text{ kg } CO_2 - eq / MWh_{el}$ [91].

Για τον προσδιορισμό της ακριβούς έντασης άνθρακα της παραγωγής θερμότητας προσομοιώθηκε σε περιβάλλον AspenPlus® η λειτουργία ενός τυπικού λέβητα φυσικού αερίου με παραδοχές λειτουργίας που παρουσιάζονται στον Πίνακα 4-15, όπως φαίνεται στην Εικόνα 4-13.

Πίνακας 4-15: Παραδοχές μοντέλου λέβητα φυσικού αερίου.

Παράμετρος	Σύμβολο	Τιμή
Πίεση Λειτουργίας Λέβητα	$p_{NGBoiler}$	1.3 bar
Θερμοκρασία Απόρριψης Καυσαερίων	$\theta_{exhaust}$	120 °C
Μοριακή Σύσταση Καυσίμου	–	100% CH_4
Μοριακή Σύσταση Ατμοσφαιρικού Αέρα	–	79% N_2 , 21% O_2



Εικόνα 4-13: Μοντελοποίηση λέβητα φυσικού αερίου σε περιβάλλον AspenPlus®.

Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης συνοψίζονται στον Πίνακα 4-16.

Πίνακας 4-16: Ένταση άνθρακα και βαθμός απόδοσης λέβητα φυσικού αερίου.

Παράμετρος	Σύμβολο	Τιμή
Ένταση Άνθρακα Λέβητα	$CI_{NGBoiler}$	$203.13 \text{ kgCO}_2 - eq/MWh_{th}$
Βαθμός Απόδοσης Λέβητα	$\eta_{NGBoiler}$	84.86 %

4.5 Αξιοποίηση Απορριπτόμενης Θερμότητας PEMEL – Οικονομική Ανάλυση

Το παρόν κεφάλαιο πραγματεύεται την αξιολόγηση της οικονομικής βιωσιμότητας των συστημάτων παραγωγής υδρογόνου και ανάκτησης της απορριπτόμενης θερμότητας που αναλύθηκαν και συγκεκριμένα την μεθοδολογία υπολογισμού των οικονομικών μεγεθών των ενεργειακών εκροών και των επενδυτικών δεικτών του συνολικού έργου. Για αυτόν τον σκοπό είναι απαραίτητος ο προσδιορισμός των καθαρών ταμειακών ροών για τον κύκλο ζωής του έργου, για δεδομένα τα αρχικά κεφάλαια επένδυσης, τα ετήσια έξοδα συντήρησης και λειτουργίας, τις τιμές πώλησης των προϊόντων και τους οικονομικούς δείκτες του επενδυτικού περιβάλλοντος.

4.5.1 Σταθμισμένα Κόστη Παραγωγής Ενεργειακών Αγαθών

Σε περιπτώσεις αξιολόγησης ενεργειακών έργων, ένας από τους σημαντικότερους οικονομικούς δείκτες αξιολόγησης του συστήματος είναι το σταθμισμένο κόστος της παραγόμενης ενέργειας, $LCOE$. Συγκεκριμένα το σταθμισμένο κόστος παραγωγής του ενεργειακού αγαθού, εκφράζεται σε μονάδα κόστους ανά μονάδα ποσότητας του προϊόντος

και χρησιμοποιείται για την ανάλυση της οικονομικής ανταγωνιστικότητας του έναντι αντίστοιχων αγαθών, τον υπολογισμό του περιθωρίου κέρδους από την πώληση του για δεδομένη τιμή της αγοράς και συνεπώς για την αξιολόγηση της οικονομικής βιωσιμότητας της επένδυσης.

Για τα υπό μελέτη συζευγμένα ενεργειακά συστήματα, θα υπολογιστούν τα σταθμισμένα κόστη, όπως αυτά περιγράφονται και ορίζονται παρακάτω στις Εξισώσεις 4.44 - 4.48.

- Σταθμισμένο Κόστος Ηλεκτρικής Ενέργειας Φωτοβολταϊκού Πάρκου, $LCOE_{PV}$.

$$LCOE_{PV} = \frac{CAPEX_{PV} + \sum_{t=1}^N \frac{OPEX_{PVt}}{(1+i)^t}}{\sum_{t=1}^N \frac{E_{PVt}}{(1+i)^t}} \quad 4.44$$

- Σταθμισμένο Κόστος Υδρογόνου, $LCOH$.

$$LCOH = \frac{CAPEX_{PEM} + \sum_{t=1}^N \frac{OPEX_{PEMt}}{(1+i)^t}}{\sum_{t=1}^N \frac{M_{H_2t}}{(1+i)^t}} \quad 4.45$$

$$\text{Όπου, } OPEX_{PEMt} = O\&M_{PEM} + A_{electricity_t} + A_{water_t}$$

- Σταθμισμένο Κόστος Ηλεκτρικής Ενέργειας Οργανικού Κύκλου Rankine, $LCOE_{ORC}$.

$$LCOE_{ORC} = \frac{CAPEX_{ORC} + \sum_{t=1}^N \frac{OPEX_{ORCt}}{(1+i)^t}}{\sum_{t=1}^N \frac{E_{ORC,net_t}}{(1+i)^t}} \quad 4.46$$

- Σταθμισμένο Κόστος Ατμού Αντλίας Θερμότητας Υψηλών Θερμοκρασιών, LCO_{Steam} .

$$LCO_{Steam} = \frac{CAPEX_{HTHP} + \sum_{t=1}^N \frac{OPEX_{HTHPt}}{(1+i)^t}}{\sum_{t=1}^N \frac{M_{Steamt}}{(1+i)^t}} \quad 4.47$$

$$\text{Όπου, } OPEX_{HTHP_t} = O\&M_{HTHP} + A_{comp,electricity_t}$$

- Σταθμισμένο Κόστος Θερμότητας Δικτύων Τηλεθέρμανσης, $LCOHeat_{DHN}$.

$$LCOHeat_{DHN} = \frac{CAPEX_{DHN} + \sum_{t=1}^N \frac{OPEX_{DHN_t}}{(1+i)^t}}{\sum_{t=1}^N \frac{E_{DHN_t}}{(1+i)^t}} \quad 4.48$$

4.5.2 Ταμειακές Ροές

Η χρηματοοικονομική ανάλυση στοχεύει στον υπολογισμό των ταμειακών ροών, CF , που θα προκύψουν από την υλοποίηση του υπό διερεύνηση επενδυτικού σχεδίου. Η ταμειακή ροή ορίζεται από τη διαφορά δύο μεγεθών: της ταμειακής εισροής και της ταμειακής εκροής. Η διαφορά αυτή μπορεί να είναι θετική ή αρνητική. Τα βασικά μεγέθη που απαιτούνται για την ανάλυση μιας επένδυσης είναι τα παρακάτω:

- Περίοδος, t : Αφορά την περίοδο της επένδυσης η οποία συνήθως είναι ετήσια, με την πρώτη περίοδο (0), να αναφέρεται στο παρόν
- Εκροές, C : Αναφέρεται στο κόστος της επένδυσης (αγορά και εγκατάσταση εξοπλισμού, διασύνδεση με το δίκτυο, ερευνητικές δαπάνες κλπ.) και δαπανάται συνήθως στην πρώτη περίοδο και όταν προκύπτει ανάγκη αντικατάστασης εξοπλισμού
- Εισροές, In : Αφορά τα ετήσια έσοδα, που ισούνται με το γινόμενο της τιμής πώλησης του προϊόντος επί την αντίστοιχη ετήσια παραγωγή
- Κόστη λειτουργίας, $OPEX$: Καλύπτουν την ετήσια διαδικασία παραγωγής (έξοδα συντήρησης, προμήθειας πρώτων υλών, υπηρεσιών, μισθών κλπ.)
- Μεικτά Αποτελέσματα, $EBITDA$: Αναφέρεται στα ετήσια κέρδη προ τόκων, φόρων και αποσβέσεων και υπολογίζεται σύμφωνα με την Εξίσωση 4.49.

$$EBITDA = In - OPEX \quad 4.49$$

- Αποσβέσεις, DA : Οι αποσβέσεις δεν αποτελούν ταμειακή ροή, αλλά την λογιστική διαπίστωση της ζημιάς που προκαλείται στην αξία του ενεργητικού με τη χρήση ή με την πάροδο του χρόνου.
- Καθαρά κέρδη προ φόρων, EBT : Υπολογίζονται σύμφωνα με την Εξίσωση 4.50.

$$EBT = EBITDA - DA \quad 4.50$$

- Φόροι, Tax : Αντιστοιχούν σε ένα ποσοστό επί του φορολογητέου εισοδήματος της επιχείρησης, το ύψος του οποίου καθορίζεται από την αντίστοιχη νομοθεσία, και υπολογίζονται σύμφωνα με την Εξίσωση 4.51.

$$Tax = VAT \cdot EBT \quad 4.51$$

- Καθαρά κέρδη, NE : Αντιστοιχούν στα πραγματικά ετήσια κέρδη και υπολογίζονται σύμφωνα με την Εξίσωση 4.52.

$$NE = EBTDA - Tax - C \quad 4.52$$

- Υπολειμματική Αξία, RV : Φανερώνει την αξία της επένδυσης στο πέρας του χρονικού ορίζοντά της και υπολογίζεται σύμφωνα με την Εξίσωση 4.53.

$$RV = C - DA \quad 4.53$$

- Καθαρές Ροές, CF : Αντιστοιχούν στα πραγματικά ετήσια κέρδη λαμβάνοντας υπόψιν την υπολειμματική αξία της επένδυσης στο τέλος του χρονικού ορίζοντα και υπολογίζονται σύμφωνα με την Εξίσωση 4.54.

$$CF = NE + RV \quad 4.54$$

4.5.3 Κριτήρια Αξιολόγησης Επενδύσεων

Παράλληλα, τα βασικότερα κριτήρια αξιολόγησης των επενδυτικών σχεδίων είναι:

- Το κριτήριο της Καθαρής Παρούσας Αξίας, NPV .
- Το κριτήριο της Εσωτερικής Απόδοσης επί του Κεφαλαίου, IRR .

Η Καθαρή Παρούσα Αξία, NPV , ορίζεται ως η διαφορά της παρούσας αξίας των ετήσιων εισοδημάτων μείον την παρούσα αξία των ετήσιων εξόδων, συμπεριλαμβανομένων των επενδύσεων και υπολογίζεται σύμφωνα με την Εξίσωση 4.55.

$$NPV = \sum_{t=1}^N \frac{CF_t}{(1+i)^t} - C_0 \quad 4.55$$

Ο Εσωτερικός Βαθμός Απόδοσης, IRR , του κεφαλαίου μπορεί να οριστεί ως το επιτόκιο αναγωγής το οποίο μηδενίζει την καθαρή παρούσα αξία, NPV , της επένδυσης, δηλαδή εκείνο το επιτόκιο που εξισώνει την αρχική επένδυση με την αξία όλων των μελλοντικών ταμιακών ροών και υπολογίζεται σύμφωνα με την Εξίσωση 4.56.

$$NPV = \sum_{t=1}^N \frac{CF_t}{(1 + IRR)^t} - C_0 = 0 \quad 4.56$$

Με αυστηρό μαθηματικό, αλλά όχι πάντα επιχειρηματικό, ορισμό οι όροι αποδοχής ή απόρριψης ενός επενδυτικού σχεδίου με βάση τα παραπάνω κριτήρια, διαμορφώνονται ως εξής:

α) Για την Καθαρή Παρούσα Αξία, NPV

- $NPV > 0$, η επένδυση θεωρείται συμφέρουσα
- $NPV = 0$, το οικονομικό αποτέλεσμα της επένδυσης είναι οριακό
- $NPV < 0$, η επένδυση απορρίπτεται

β) Για τον Εσωτερικό Βαθμό Απόδοσης, IRR

- $IRR > i$, η επένδυση θεωρείται συμφέρουσα
- $IRR = i$, το οικονομικό αποτέλεσμα της επένδυσης είναι οριακό
- $IRR < i$, η επένδυση απορρίπτεται

Ανεξαρτήτως χρησιμοποιούμενου κριτηρίου, όταν πραγματοποιείται σύγκριση μεταξύ δύο ή περισσότερων εναλλακτικών επενδυτικών σχεδίων προκρίνεται το σχέδιο που εμφανίζει την καλύτερη απόδοση, δηλαδή την υψηλότερη NPV ή τον υψηλότερο IRR . Οι δύο μέθοδοι χρησιμοποιούνται ευρύτατα και μάλιστα σε συνδυασμό [92].

4.5.4 Δεδομένα και Παραδοχές Οικονομικής Ανάλυσης

Εφόσον παρουσιάστηκε η πλήρης μεθοδολογία στην οποία βασίστηκε η οικονομική αξιολόγηση της επένδυσης, παρακάτω συνοψίζονται στους Πίνακες 4-17 – 4-21 τα δεδομένα και οι παραδοχές που χρησιμοποιήθηκαν για αυτήν.

- Φωτοβολταϊκό Πάρκο, PV:

Πίνακας 4-17: Οικονομικά δεδομένα φωτοβολταϊκού πάρκου.

Παράμετρος	Σύμβολο	Τιμή
Κεφαλαιακές Δαπάνες	$CAPEX_{PV}$	600 €/kW ^[93]
Λειτουργικές Δαπάνες	$OPEX_{PV}$	2% · $CAPEX_{PV}$
Διάρκεια Ζωής	N_{PV}	20 έτη

- Σύστημα Ηλεκτρόλυσης Μεμβράνης Ανταλλαγής Πρωτονίων, PEMEL:

Πίνακας 4-18: Οικονομικά δεδομένα συστήματος ηλεκτρόλυσης μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων.

Παράμετρος	Σύμβολο	Τιμή
Κεφαλαιακές Δαπάνες	$CAPEX_{PEMEL}$	1000 €/kW ^[19]
Λειτουργικές Δαπάνες	$O\&M_{PEMEL}$	2% · $CAPEX_{PEMEL}$ ^[19]
Δαπάνες Αντικατάστασης	RC_{PEMEL}	25% · $CAPEX_{PEMEL}$ ^[19]
Δαπάνες Ηλεκτρικής Ενέργειας	$C_{electricity,PEMEL}$	$LCOE_{PV}$
Ανάγκες Νερού	m_{water}	8.97 kgH ₂ O/kgH ₂
Τιμή Νερού	C_{water}	3.8 €/m ³ ^{[19],[94]}
Γήρανση	deg	0.15%/1000 hr ^[19]
Ένταση Άνθρακα	CI_{PEMEL}	0 kgCO ₂ – eq/ kg H ₂
Διάρκεια Ζωής	N_{PEMEL}	75,000 ώρες ^[27]
Τιμή Πώλησης H ₂	C_{H_2}	6 €/ kg H ₂

Παραδοχές: Θεωρείται πως η αντικατάστασή του συστήματος γίνεται στην αρχή της αντίστοιχης, για κάθε σενάριο, περιόδου ώστε να μην ξεπεραστεί η διάρκεια ζωής του.

- Οργανικός Κύκλος Rankine, ORC:

Πίνακας 4-19: Οικονομικά δεδομένα οργανικού κύκλου Rankine.

Παράμετρος	Σύμβολο	Τιμή
Κεφαλαιακές Δαπάνες	$CAPEX_{ORC}$	4000 €/kW _{el} ^[95]
Λειτουργικές Δαπάνες	$OPEX_{ORC}$	2% · $CAPEX_{ORC}$ ^[85]
Διάρκεια Ζωής	N_{ORC}	20 έτη ^[85]
Τιμή Πώλησης Ηλεκτρικής Ενέργειας	$C_{ORC,elec}$	183.3 €/MW _{el} ^[96]

Παραδοχές: Θεωρείται πως η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια πωλείται μέσω του δικτύου σε κάποιον καταναλωτή, στην μέση ευρωπαϊκή τιμή ηλεκτρικής ενέργειας για μη οικιακούς χρήστες.

- Αντλία Θερμότητας Υψηλών Θερμοκρασιών, ΗΤΗΡ:

Πίνακας 4-20: Οικονομικά δεδομένα αντλίας θερμότητας υψηλών θερμοκρασιών.

Παράμετρος	Σύμβολο	Τιμή
Κεφαλαιακές Δαπάνες	$CAPEX_{HTHP}$	400 €/kW _{th} ^[86]
Παράγοντας Εγκατάστασης	<i>Installation Factor</i>	1.3 ^[97]
Λειτουργικές Δαπάνες	$O\&M_{HTHP}$	2% · $CAPEX_{HTHP}$ ^[85]
Δαπάνες Ηλεκτρικής Ενέργειας	$C_{elec,comp}$	$LCOE_{PV}$
Ένταση Άνθρακα	CI_{HTHP}	0 kgCO ₂ – eq/MW _{th}
Διάρκεια Ζωής	N_{HTHP}	20 έτη ^[85]
Τιμή Πώλησης Ατμού	$C_{steam,HTHP}$	23.72 €/tn ^[98]

Παραδοχές: Θεωρείται πως ο παραγόμενος ατμός πωλείται στην χαρτοβιομηχανία και η ηλεκτρική ενέργεια που καταναλώνεται στον συμπιεστή προέρχεται επίσης από το ΦΒ πάρκο.

- Δίκτυα Τηλεθέρμανσης, DHN (LTDHN & HTDHN)

Πίνακας 4-21: Οικονομικά δεδομένα δικτύων τηλεθέρμανσης.

Παράμετρος	Σύμβολο	Τιμή
Κεφαλαιακές Δαπάνες (Ηλεκτρονικά & Σύνδεση με το DHN)	$CAPEX_{DHN}$	50,000 € ^[70]
Παράγοντας Εγκατάστασης	<i>Installation Factor</i>	1.4 ^[70]
Κεφαλαιακές Δαπάνες (Buffer)	$CAPEX_{Buffer}$	15 €/kWh ^[99]
Λειτουργικές Δαπάνες	$O\&M_{DHN}$	2% · $CAPEX_{DHN}$
Ένταση Άνθρακα	CI_{DHN}	0 kgCO ₂ – eq/MW _{th}
Διάρκεια Ζωής	N_{DHN}	20 έτη
Τιμή Πώλησης Θερμότητας στο DHN	$C_{heat,DHN}$	30 €/MWh ^[4]

Παραδοχές: Θεωρείται πως η θερμική πηγή (απορριπτόμενη θερμότητα PEMEL) είναι άμεσα συνδεδεμένη με το δίκτυο τηλεθέρμανσης και πωλείται σε αυτό, με τα έξοδα να αφορούν αποκλειστικά την αρχική επένδυση και τα λειτουργικά κόστη της που απαιτούνται για την αγορά της δεξαμενής νερού και την διασύνδεση του ψυκτικού συστήματος του PEMEL (παραγωγός θερμότητας), με το DHN (καταναλωτής θερμότητας).

Παράλληλα, ως επιπρόσθετη μορφή εσόδων θεωρήθηκε η πώληση, στα πλαίσια της εμπορίας εκπομπών, των «δικαιωμάτων άνθρακα», τα οποία πλεονάζουν εξαιτίας της αποφυγής εκπομπής CO_2 στα συζευγμένα συστήματα που εξετάστηκαν. Το Σύστημα Εμπορίας Εκπομπών της ΕΕ (EU ETS), βρίσκεται σε ισχύ από το 2005 και λειτουργεί με βάση την αρχή του «cap and trade». Το ανώτατο όριο είναι ένα όριο που περιορίζει την συνολική ποσότητα των αερίων του θερμοκηπίου που μπορούν να εκπέμπονται, το οποίο μειώνεται ετησίως σύμφωνα με τον κλιματικό στόχο της ΕΕ. Το ανώτατο όριο εκφράζεται σε «δικαιώματα εκπομπής», όπου ένα δικαίωμα δίνει την άδεια εκπομπής ενός τόνου $CO_2 - eq$. Στο πλαίσιο του ανώτατου ορίου, οι εταιρείες λαμβάνουν ορισμένα δικαιώματα δωρεάν και αγοράζουν τα απαραίτητα υπολειπόμενα. Οι εταιρείες μπορούν επίσης να ανταλλάσσουν δικαιώματα μεταξύ τους. Εάν μια εγκατάσταση ή ένας φορέας εκμετάλλευσης μειώσει τις εκπομπές του, μπορεί είτε να κρατήσει τα πλεονάζοντα δικαιώματα για να τα χρησιμοποιήσει στο μέλλον είτε να τα πουλήσει [100]. Στο πλαίσιο αυτό και σύμφωνα με την τρέχουσα χρηματιστηριακή τιμή των «δικαιωμάτων εκπομπών», τα έσοδα από την αποφυγή εκπομπής CO_2 , ανέρχονται στα $C_{CO_2-eg} = 65 \text{ €/tn}$ [101].

Για την οικονομική ανάλυση θεωρήθηκε επιτόκιο αναγωγής $i = 8\%$, ως μέθοδος απόσβεσης χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος σταθερής απόσβεσης, ο συντελεστής φορολόγησης λήφθηκε ίσος με 20% και η επένδυση θεωρήθηκε πως πραγματοποιείται με ίδια κεφάλαια, χωρίς δανεισμό ή επιχορήγηση.

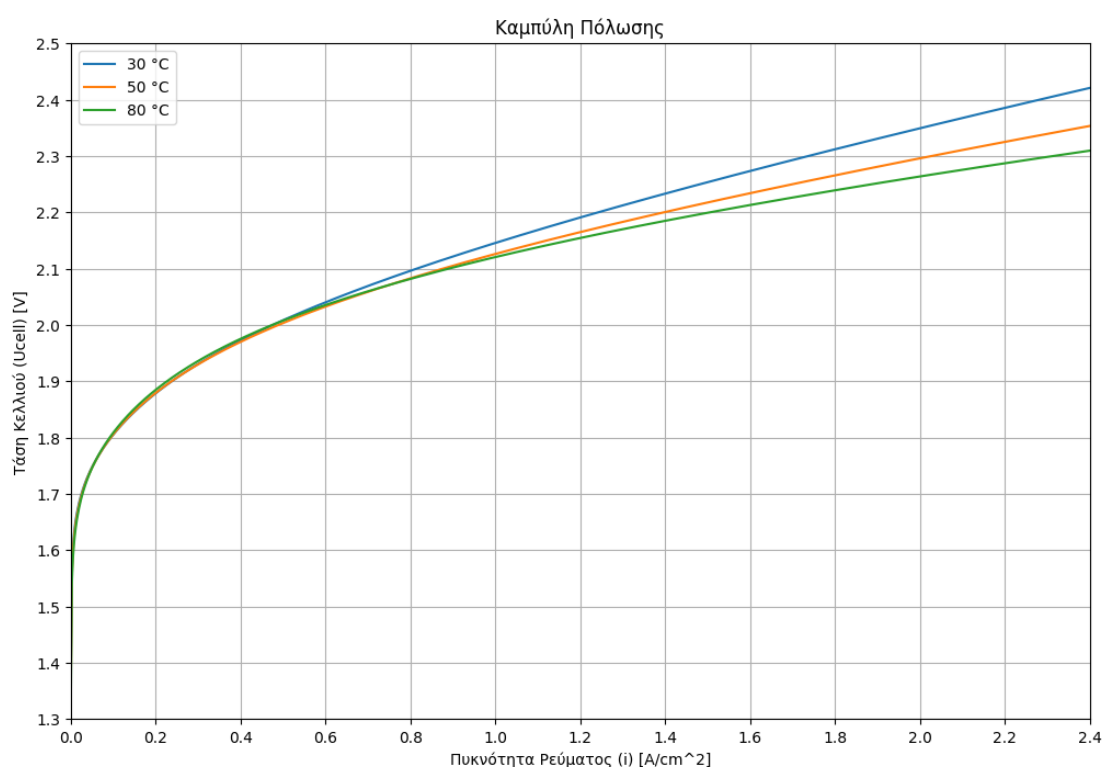
5 Αποτελέσματα

Έχοντας αναλύσει το θεωρητικό υπόβαθρο, την μεθοδολογία και τα απαραίτητα δεδομένα για την τεchnο-οικονομική αξιολόγηση των συζευγμένων συστημάτων, στο παρόν κεφάλαιο παρατίθενται και σχολιάζονται τα τεχνικά, περιβαλλοντικά και οικονομικά αποτελέσματα της μελέτης.

5.1 Αποτελέσματα Τεχνικής Ανάλυσης

5.1.1 Θεωρητική Μοντελοποίηση PEMEL

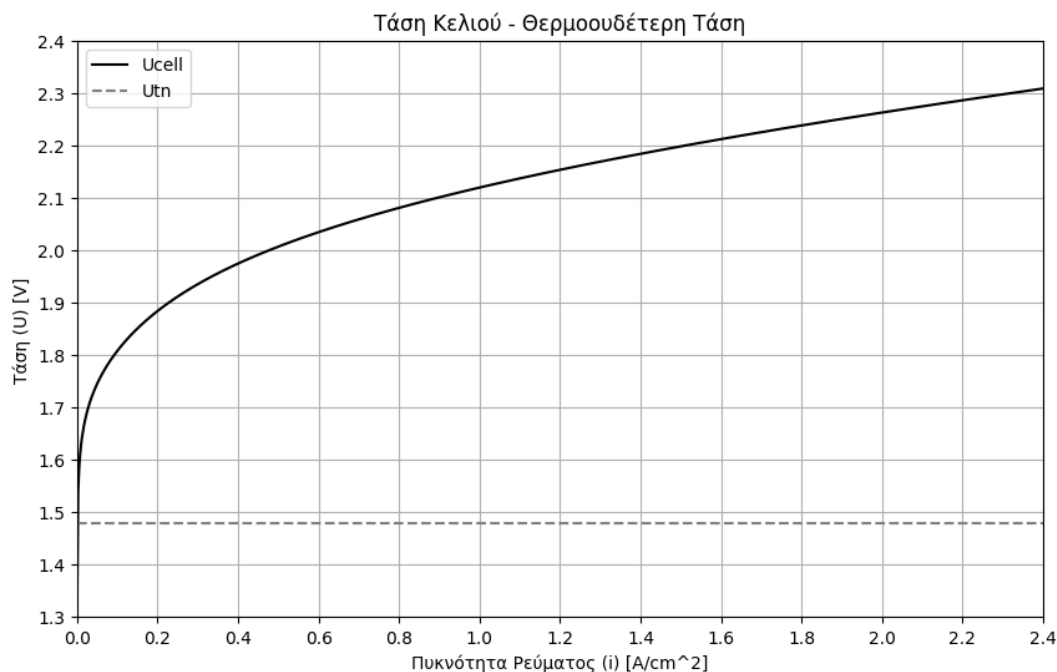
Με την κατάστρωση του ηλεκτροχημικού μοντέλου για τον προσδιορισμό της ανοιχτής τάσης κυκλώματος και των υπερδυναμικών που χρειάζεται να ασκηθούν για την πραγματοποίηση της αντίδρασης και με δεδομένα τα τεχνικά χαρακτηριστικά του υπό μελέτη *PEM Silyzer 200 – Siemens* υπολογίστηκε η τάση κελιού συναρτήσει της πυκνότητας ρεύματος για διαφορετικές για διαφορετικές θερμοκρασίες, η οποία απεικονίζεται γραφικά με την καμπύλη πόλωσης στο Διάγραμμα 5-1.



Διάγραμμα 5-1: Καμπύλη πόλωσης για διάφορες θερμοκρασίες.

Παρατηρείται πως για υψηλότερες θερμοκρασίες λειτουργίας η απαιτούμενη τάση κελιού, που πρέπει να ασκηθεί για να πραγματοποιηθεί η αντίδραση, είναι μικρότερη από ότι για χαμηλότερες θερμοκρασίες.

Ειδικότερα για την θερμοκρασία λειτουργίας του κελιού $\theta = 80^{\circ}\text{C}$, η καμπύλη πόλωσης σε σύγκριση με την θερμοουδέτερη τάση παρουσιάζεται στο Διάγραμμα 5-2.



Διάγραμμα 5-2: Καμπύλη Πόλωσης για $T=80^{\circ}\text{C}$.

Στο ονομαστικό σημείο λειτουργίας του ηλεκτρολύτη για την θεωρητική μοντελοποίηση, με βάση το ηλεκτροχημικό και το θερμικό μοντέλο προκύπτουν τα ακόλουθα αποτελέσματα.

Πίνακας 5-1: Αποτελέσματα θεωρητικής μοντελοποίησης.

Παράμετρος	Σύμβολο	Τιμή
Παραγόμενο H_2 στην Κάθοδο	$m_{\text{H}_2, \text{cat}}$	17.68 kg/hr
Παραγόμενο O_2 στην Άνοδο	$m_{\text{O}_2, \text{an}}$	141.45 kg/hr
Καταναλισκόμενο H_2O	$m_{\text{H}_2\text{O}, \text{cons}}$	159.14 kg/hr
Διαπερατότητα H_2	$m_{\text{H}_2, \text{perm}}$	$7.54 \cdot 10^{-4}$ kg/hr
Διαπερατότητα O_2	$m_{\text{O}_2, \text{perm}}$	$6.03 \cdot 10^{-3}$ kg/hr
Διαπερατότητα H_2	$m_{\text{H}_2\text{O}, \text{perm}}$	$1.36 \cdot 10^{-2}$ kg/hr
Τάση Κελιού	U_{cell}	2.24 V
Αριθμός Κελίων	N_{cell}	266
Παραγόμενη Θερμότητα	Q_{gen}	363.31 kW
Συνολικές Απώλειες Θερμότητας	Q_{loss}	510.91 W
Διαθέσιμη Παραγόμενη Θερμότητα	Q_{cool}	362.80 kW

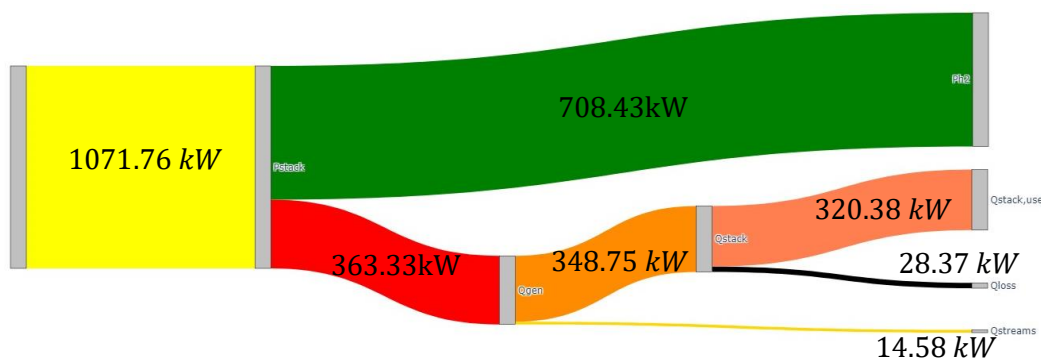
5.1.2 Μοντελοποίηση PEMEL σε Περιβάλλον AspenPlus®

Στο ονομαστικό σημείο λειτουργίας του ηλεκτρολύτη από την μοντελοποίηση του σε περιβάλλον AspenPlus®, με απόρριψη της θερμότητας στο ψυκτικό σύστημα και χωρίς την αξιοποίηση της προκύπτουν τα ακόλουθα αποτελέσματα.

Πίνακας 5-2: Αποτελέσματα μοντελοποίησης σε περιβάλλον AspenPlus®.

Σύστημα	Παράμετρος	Σύμβολο	Τιμή	
PEM Silyzer 200	Παραγόμενο H_2	$m_{H_2,prod}$	17.98 kg/h	
	Παραγόμενο O_2	$m_{O_2,prod}$	142.66 kg/h	
	Καταναλισκόμενο H_2O	$m_{H_2O,cons}$	161.30 kg/h	
	Μοριακή Καθαρότητα H_2 (χωρίς ξηραντήρα)	$c_{H_2,prod}$	99.9895 %	
	Ισοδύναμη Ισχύς H_2	P_{H_2}	708.43kW	
	Παραγόμενη Θερμότητα	Q_{gen}	363.33kW	
	Παραγόμενη Θερμότητα Ρευμάτων Αερίων	$Q_{streams}$	14.58kW	
	Παραγόμενη Θερμότητα Κυψέλης	Q_{stack}	348.75kW	
	Απώλειες λόγω Ακτινοβολίας και Συναγωγής	$Q_{rad,conv}$	510.91W	
	Απώλειες Συστήματος Ψύξης Κυψέλης	$Q_{satck,loss}$	27.86kW	
	Βαθμός Απόδοσης PEMEL	$\eta_{PEM,HHV}$	66.10%	
	Ψυκτικό Σύστημα	Παροχή Μάζας Νερού	$m_{H_2O,cool}$	4,856.53 kg/h
		Θερμοκρασία Εξόδου Ψυκτικού Νερού	$\theta_{cool,out}$	75 °C
Θερμική Ισχύς Ψυκτικού Κυκλώματος		$P_{cool,th}$	334.96kW	

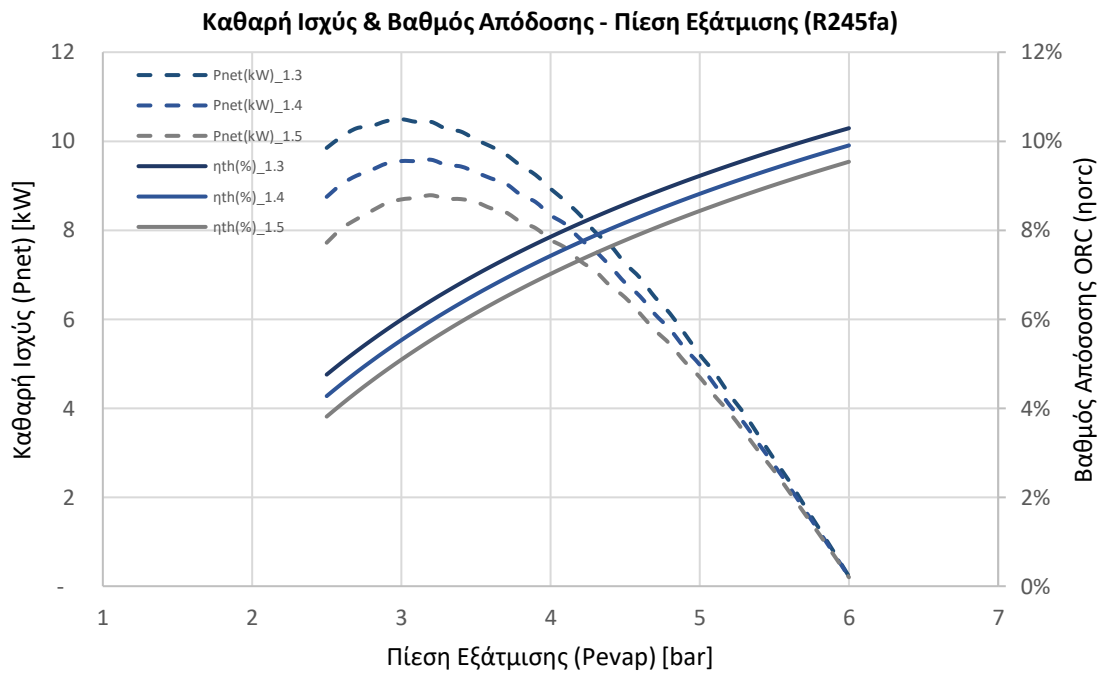
Ενώ η ροή της ενέργειας για το σημείο λειτουργίας σε ονομαστικό φορτίο παρουσιάζεται στο Διάγραμμα 5-3.



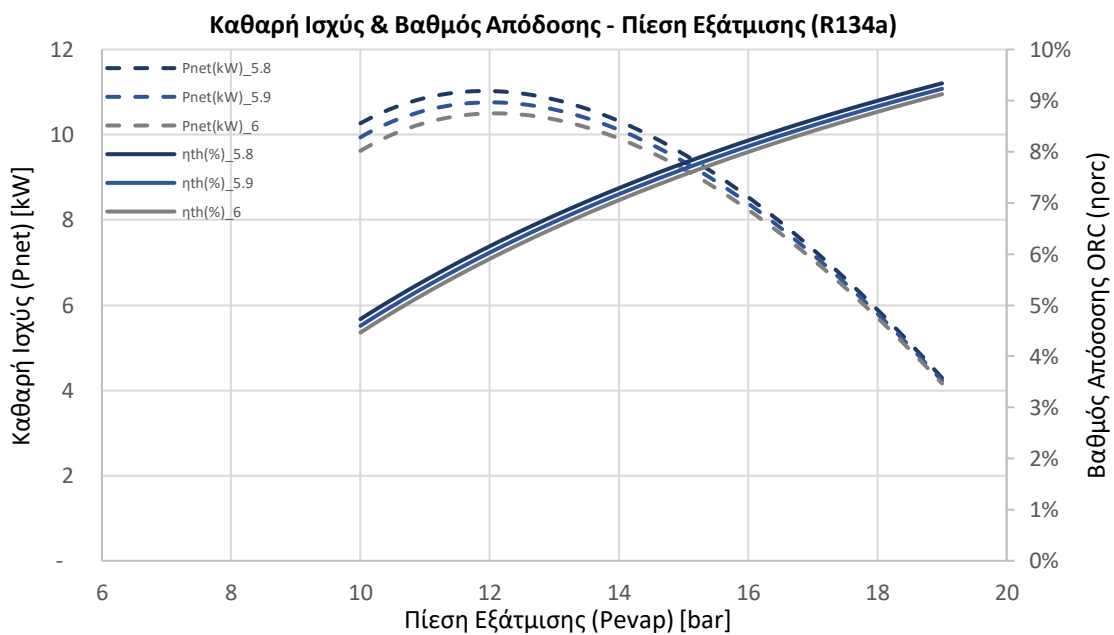
Διάγραμμα 5-3: Διάγραμμα ροής ενέργειας, Sankey.

5.1.3 Μοντελοποίηση ORC σε Περιβάλλον AspenPlus®

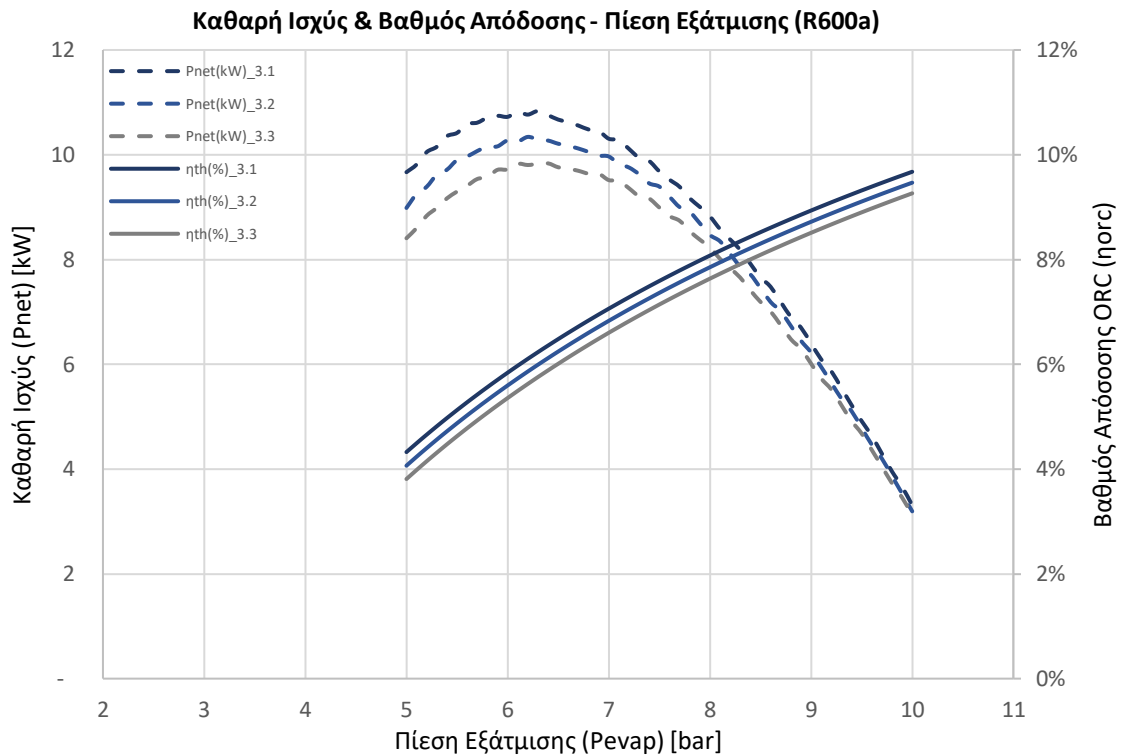
Παρακάτω συνοψίζονται τα αποτελέσματα της μοντελοποίησης του ORC για τα εξεταζόμενα εργαζόμενα μέσα. Συγκεκριμένα στα Διαγράμματα 5-4 – 5-6 παρουσιάζεται η παραγόμενη καθαρή ισχύς, P_{net} , και ο θερμικός βαθμός απόδοσης, η_{ORC} , του ORC, συναρτήσει της πίεσης εξάτμισης, p_{evap} , για διαφορετικές πιέσεις συμπύκνωσης, p_{cond} .



Διάγραμμα 5-4: Καθαρή ισχύς & βαθμός απόδοσης συναρτήσει της πίεσης εξάτμισης (R245fa).



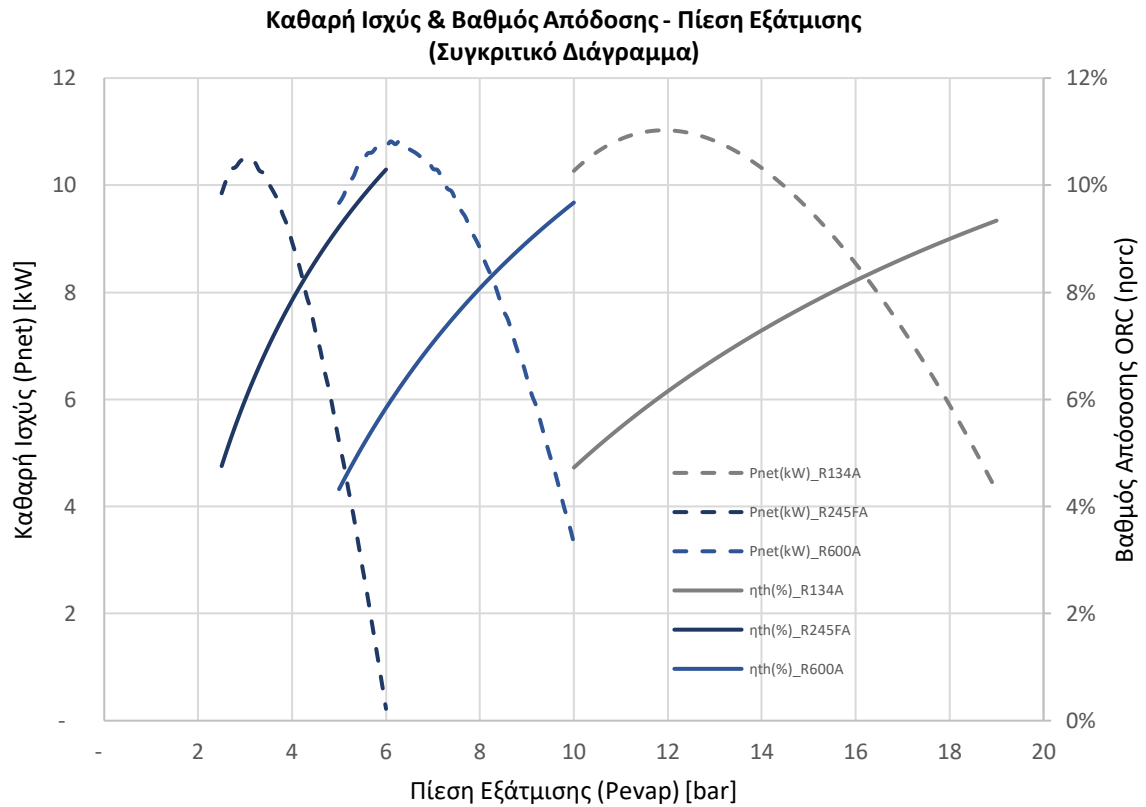
Διάγραμμα 5-5: Καθαρή ισχύς & βαθμός απόδοσης συναρτήσει της πίεσης εξάτμισης (R134a).



Διάγραμμα 5-6 : Καθαρή ισχύς & βαθμός απόδοσης συναρτήσει της πίεσης εξάτμισης (R600a).

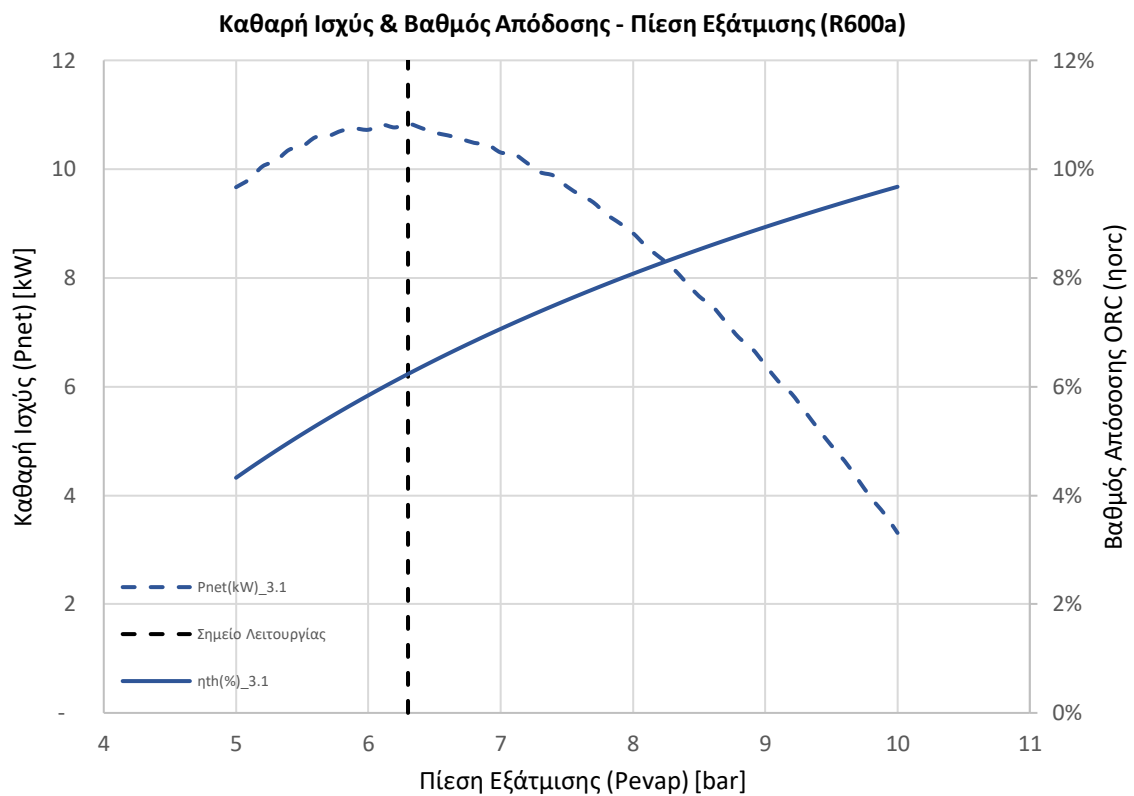
Αυτό που παρατηρείται και στις τρεις περιπτώσεις είναι πως με αύξηση της πίεσης εξάτμισης, p_{evap} , ο θερμικός βαθμός, η_{ORC} , αυξάνεται ενώ η παραγόμενη καθαρή ισχύς P_{net} , αφού παρουσιάσει μέγιστο, μειώνεται. Επίσης εμφανές είναι πως ο ORC επιτυγχάνει καλύτερες επιδόσεις για την χαμηλότερη τιμή της πίεσης συμπύκνωσης, p_{cond} και στις τρεις περιπτώσεις. Το μέγιστο που παρουσιάζει η καμπύλη της καθαρής ισχύος P_{net} , οφείλεται στο γεγονός πως παρότι η διαφορά ενθαλπίας αυξάνεται για δεδομένη πίεση συμπύκνωσης, p_{cond} , με αύξηση της πίεσης εξάτμισης, p_{evap} η παροχή μάζας του εργαζόμενου μέσου μειώνεται ώστε να αποφευχθεί η θερμοκρασιακή διασταύρωση στον εναλλάκτη.

Παρακάτω στο Διάγραμμα 5-7 παρουσιάζονται συγκριτικά η καθαρή ισχύς και ο βαθμός απόδοσης συναρτήσει της πίεσης εξάτμισης των τριών εργαζόμενων μέσων. Παρατηρείται πως καλύτερες επιδόσεις επιτυγχάνει το R134a, ακολουθεί το R600a και έπειτα το R245fa.



Διάγραμμα 5-7: Καθαρή ισχύς & βαθμός απόδοσης συναρτήσει της πίεσης εξάτμισης (Συγκριτικό Διάγραμμα).

Λαμβάνοντας υπόψιν την θερμοδυναμική επίδοση και τις περιβαλλοντικές ιδιότητες των ρευστών όπως παρουσιάζονται στον Πίνακα 4-6, επιλέγεται ως εργαζόμενο μέσο το R600a, το οποίο συνδυάζει καλή απόδοση, χαμηλό δείκτη GWP, μηδενικό δείκτη ODP και χαμηλά επίπεδα τοξικότητας. Για το εργαζόμενο αυτό μέσο, το σημείο λειτουργίας επιλέγεται για την πίεση εξάτμισης, p_{evap} , όπου η καθαρή ισχύς είναι μέγιστη, όπως φαίνεται στο Διάγραμμα 5-8.



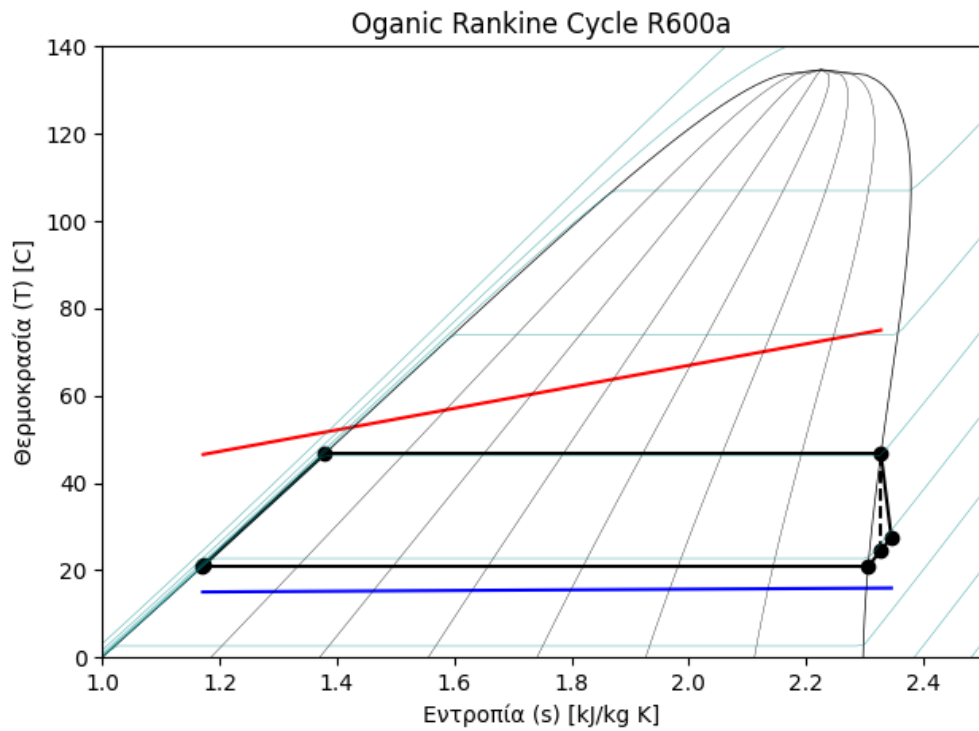
Διάγραμμα 5-8: Καθαρή ισχύς & βαθμός απόδοσης συναρτήσει της πίεσης εξάτμισης, R600a στο σημείο λειτουργίας.

Για το επιλεγμένο σημείο λειτουργίας προκύπτουν τα τεχνικά χαρακτηριστικά που συνοψίζονται στον Πίνακα 5-3.

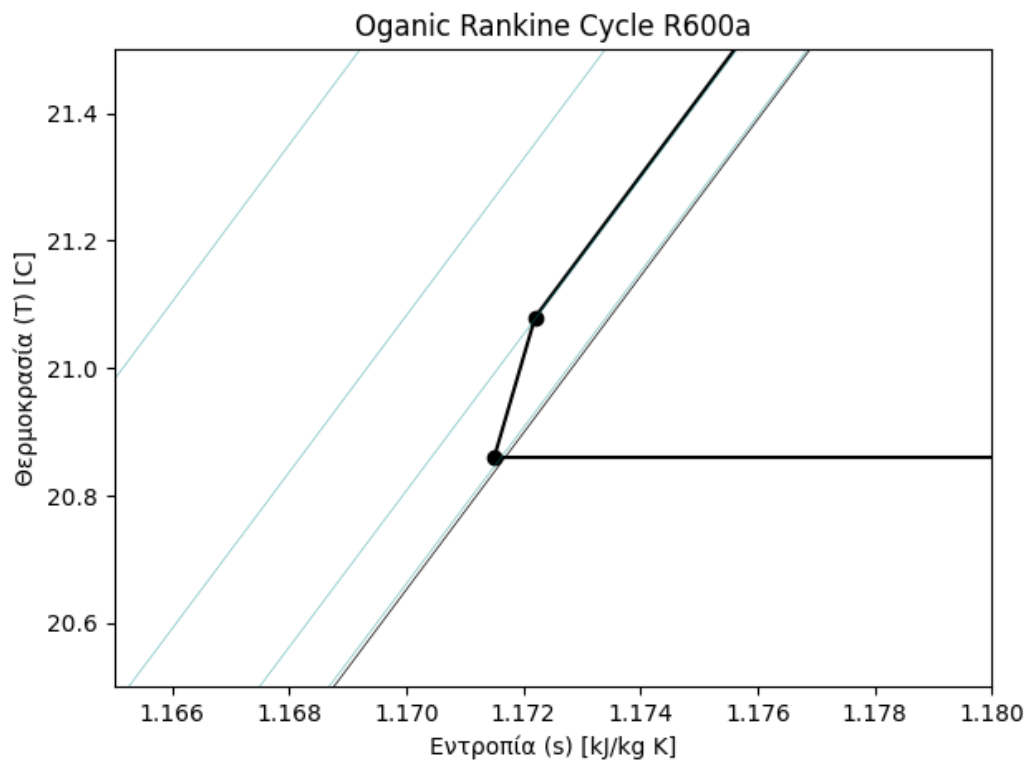
Πίνακας 5-3: Τεχνικά χαρακτηριστικά Οργανικού Κύκλου Rankine στο σημείο λειτουργίας.

Παράμετρος	Σύμβολο	Τιμή
Πίεση Εξάτμισης	$p_{evap,orc}$	6.3bar
Πίεση Συμπύκνωσης	$p_{cond,orc}$	3.1bar
Παροχή Μάζας R600a	\dot{m}_{R600a}	1696.08kg/h
Παροχή Μάζας Ψυκτικού Νερού στον Συμπυκνωτή (Ποτάμι)	$\dot{v}_{cool,cond}$	0.05 m ³ /s
Θερμοκρασία Νερού στην Έξοδο του Εξατμιστή	$\theta_{wat,evap}$	46.50 °C
Ισχύς Εκτονωτή	P_{exp}	11.14kW
Κατανάλωση Αντλίας	P_{pump}	0.30kW
Καθαρή Ισχύς ORC	P_{net}	10.83kW
Θερμική Ισχύς στον Εξατμιστή	Q_{evap}	173.84kW
Θερμικός Βαθμός Απόδοσης ORC	η_{orc}	6.23%

Επιπλέον ο θερμοδυναμικός κύκλος ORC στο σημείο λειτουργίας παρουσιάζεται στην καμπύλη θερμοκρασίας-εντροπίας $T - s$, όπως φαίνεται στο Διάγραμμα 5-9.

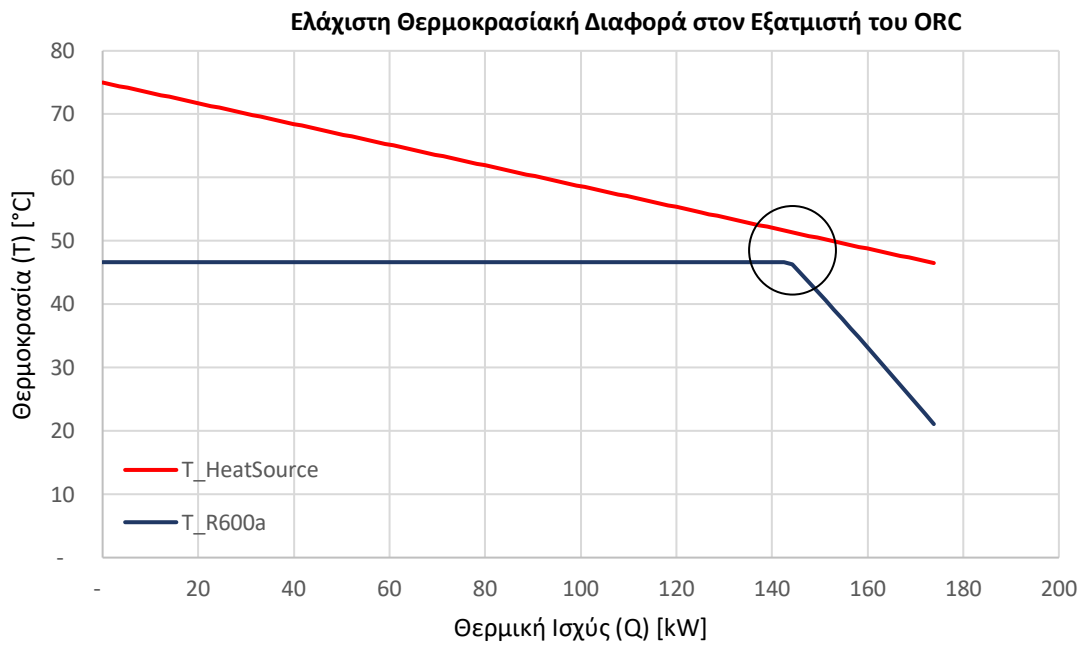


Διάγραμμα 5-9: Διάγραμμα T-s, ORC R600a.

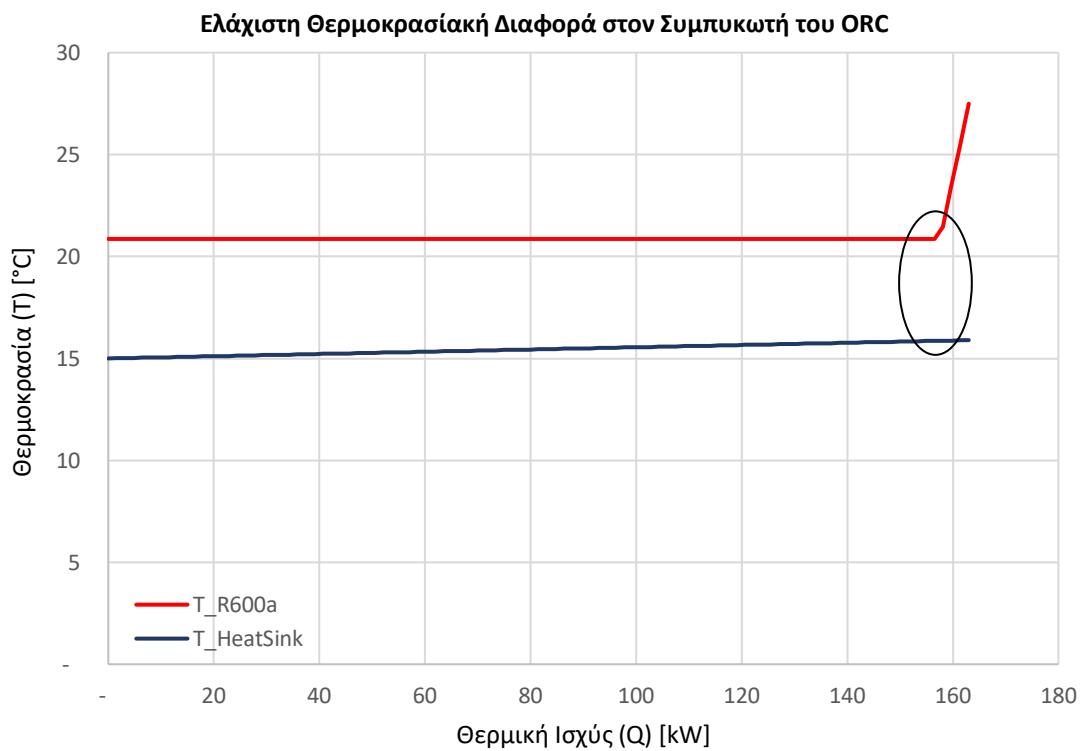


Διάγραμμα 5-10: Διάγραμμα T-s, ORC R600a (μεγέθυνση).

Επίσης απεικονίζεται η ελάχιστη θερμοκρασιακή διαφορά στον εξατμιστή και στον συμπυκνωτή στο Διάγραμμα 5-11 και στο Διάγραμμα 5-12 αντίστοιχα.



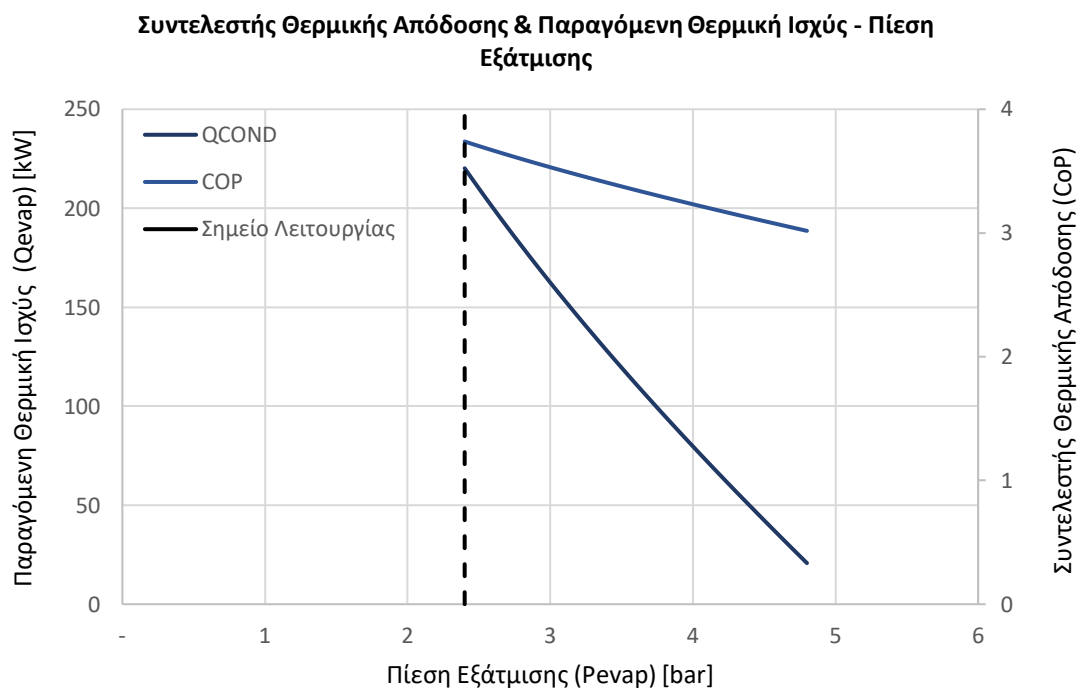
Διάγραμμα 5-11: Ελάχιστη θερμοκρασιακή διαφορά στον εξατμιστή του ORC.



Διάγραμμα 5-12: Ελάχιστη θερμοκρασιακή διαφορά στον συμπυκνωτή του ORC.

5.1.4 Μοντελοποίηση ΗΤΗΡ σε Περιβάλλον AspenPlus®

Τα αποτελέσματα της ανάλυσης ευαισθησίας για την αντλία θερμότητας υψηλών θερμοκρασιών, βάσει των δεδομένων και των παραδοχών του Πίνακα 4-11 παρουσιάζονται στο Διάγραμμα 5-13.



Διάγραμμα 5-13: Συντελεστής θερμικής απόδοσης & παραγόμενη θερμική ισχύς συναρτήσει της πίεσης εξάτμισης.

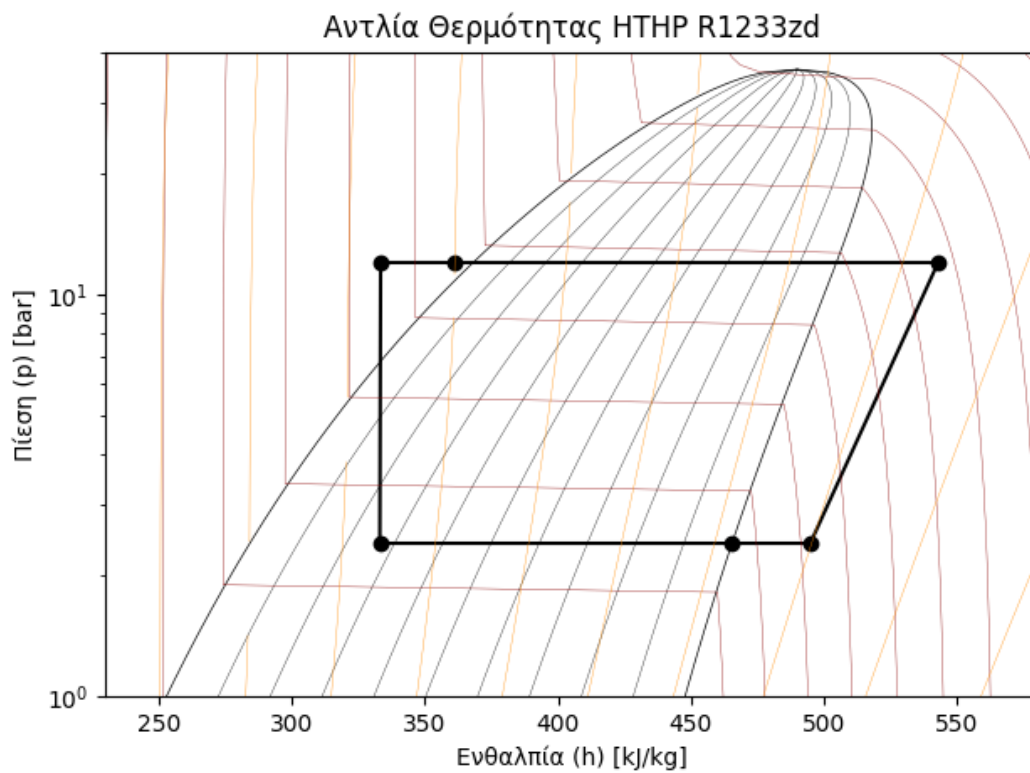
Παρατηρείται πως τόσο η απορριπτόμενη θερμότητα στον συμπυκνωτή, Q_{cond} όσο και ο συντελεστής θερμικής απόδοσης, CoP είναι μέγιστα για την μικρότερη επιτρεπόμενη πίεση εξάτμισης p_{evap} , για την οποία επιλέγεται το σημείο λειτουργίας. Για το επιλεγμένο σημείο λειτουργίας προκύπτουν τα τεχνικά χαρακτηριστικά που συνοψίζονται στον Πίνακα 5-4.

Πίνακας 5-4: Τεχνικά χαρακτηριστικά αντλίας θερμότητας υψηλών θερμοκρασιών στο σημείο λειτουργίας.

Παράμετρος	Σύμβολο	Τιμή
Πίεση Εξάτμισης	$p_{evap,hthp}$	2.4bar
Πίεση Συμπύκνωσης	$p_{cond,hthp}$	12 bar
Παροχή Μάζας R1233zd	$m_{R1233zd}$	4349.90kg/h
Παροχή Μάζας Ατμού	m_{steam}	318.54 kg/h
Θερμοκρασία Ατμού	θ_{steam}	120°C

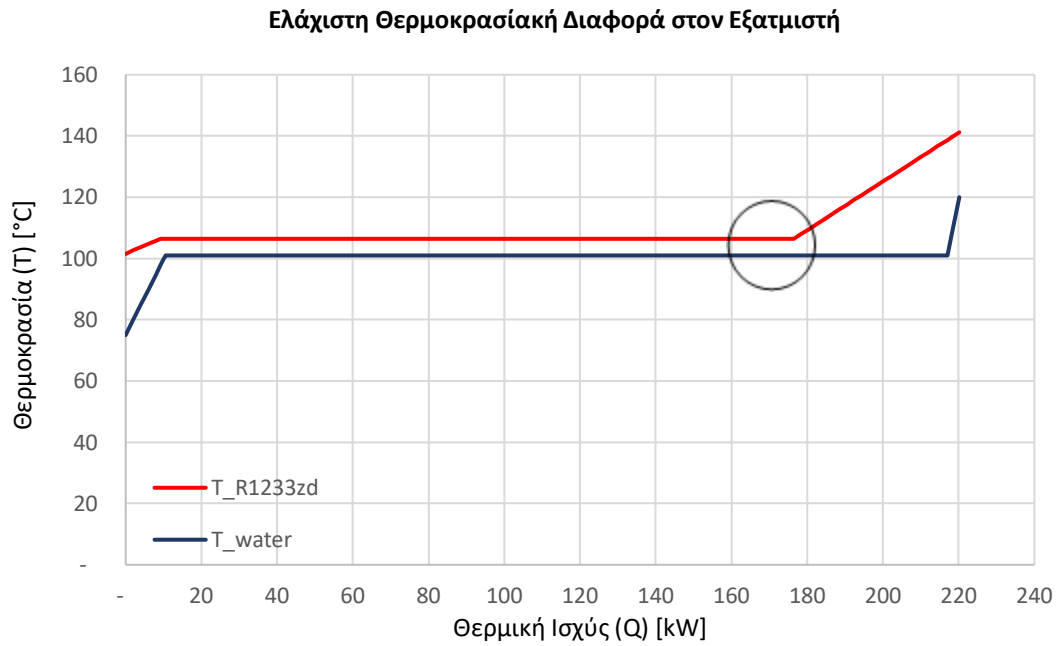
Θερμοκρασία Νερού στην Έξοδο του Εξατμιστή	$\theta_{wat, evap}$	48.56 °C
Ελάχιστη Θερμοκρασιακή Διαφορά στον Εξατμιστή	PP_{evap}	5 K
Ελάχιστη Θερμοκρασιακή Διαφορά στον Συμπυκνωτή	PP_{cond}	25.10 K
Ελάχιστη Θερμοκρασιακή Διαφορά στον ΙΗΧ	$PP_{IH\chi}$	5.40 K
Θερμική Ισχύς στον Συμπυκνωτή	Q_{cond}	220.18kW
Ισχύς Συμπιεστή	P_{comp}	58.89kW
Συντελεστής Θερμικής Απόδοσης	CoP	3.74

Επιπλέον ο θερμοδυναμικός κύκλος της ΗΗΤΡ στο σημείο λειτουργίας παρουσιάζεται στην καμπύλη πίεσης-ενθαλπίας $p - h$, όπως φαίνεται στο Διάγραμμα 5-14.

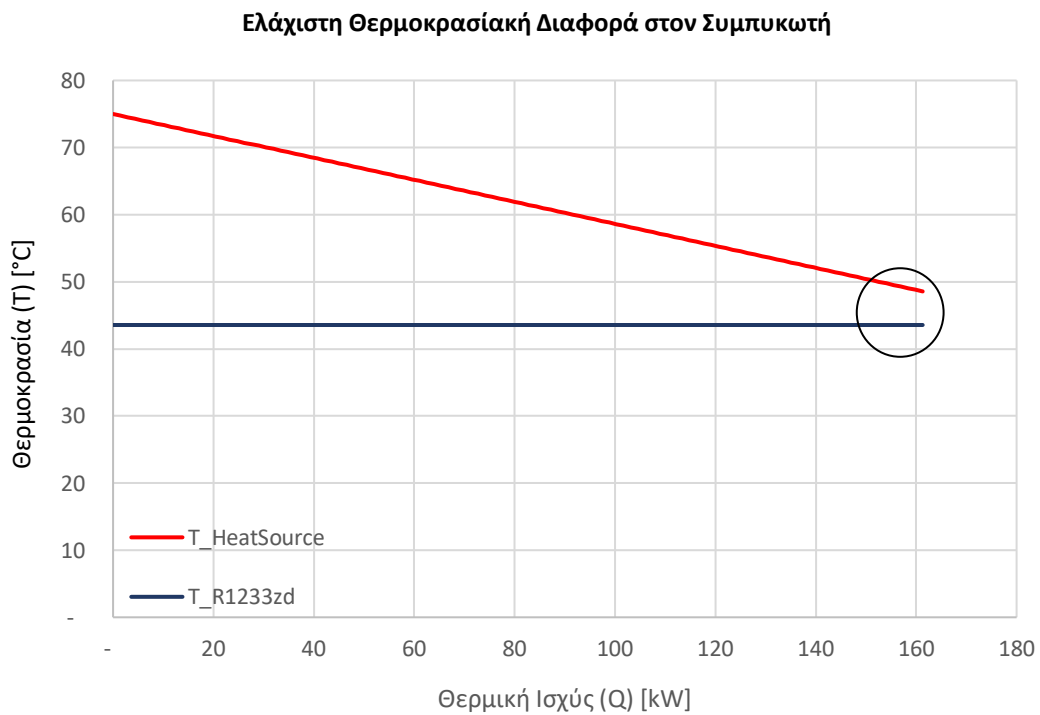


Διάγραμμα 5-14: Διάγραμμα $p-h$, ΗΗΤΡ R1233zd.

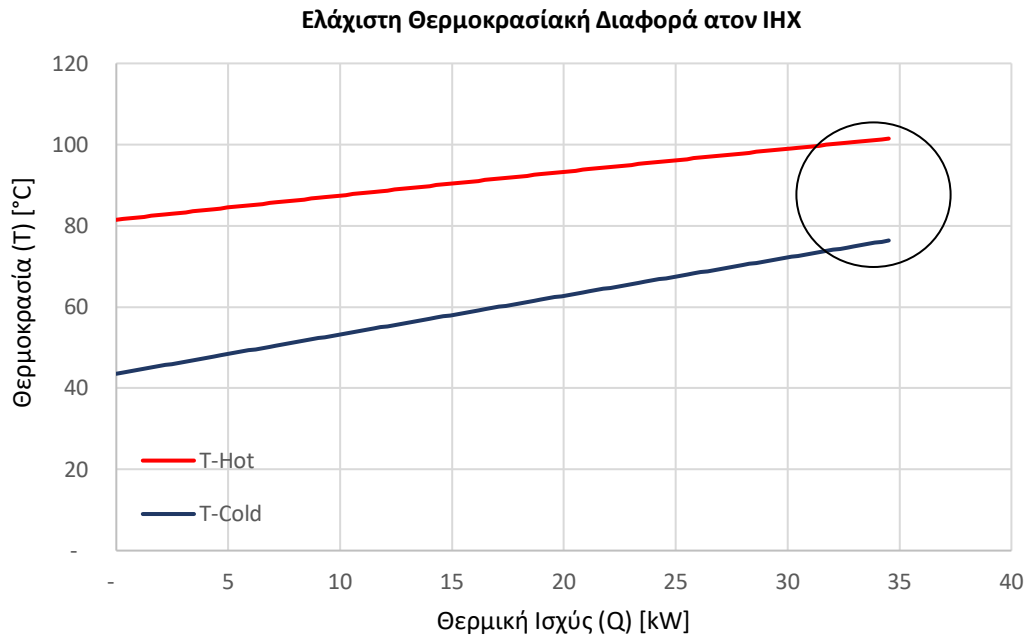
Επίσης απεικονίζεται η ελάχιστη θερμοκρασιακή διαφορά στον εξατμιστή, τον συμπυκνωτή και τον εσωτερικό εναλλάκτη στο Διάγραμμα 5-15, 5-16, 5-17 αντίστοιχα.



Διάγραμμα 5-15: Ελάχιστη θερμοκρασιακή διαφορά στον εξατμιστή της ΗΤΗΡ.



Διάγραμμα 5-16: Ελάχιστη θερμοκρασιακή διαφορά στον συμπυκνωτή της ΗΤΗΡ.



Διάγραμμα 5-17: Ελάχιστη θερμοκρασιακή διαφορά στον ΙΗΧ της ΗΤΗΡ.

5.1.5 Ποσδιδόμενη Θερμότητα στο DHN

Στους Πίνακες 5-5 – 5-7, παρουσιάζονται οι ιδιότητες της προσδιδόμενης στο DHN θερμότητας για κάθε σενάριο, θεωρώντας πως η θερμοκρασία επιστροφής ισούται με 20°C. Υπενθυμίζεται ότι στο πρώτο σενάριο, στο LTDHN τροφοδοτείται η θερμότητα που υπολείπεται αφού η θερμική πηγή χρησιμοποιηθεί στον εξατμιστή του ORC. Για το δεύτερο σενάριο στο LTDHN τροφοδοτείται η υπολειπόμενη θερμότητα αφού η θερμική πηγή χρησιμοποιηθεί στον εξατμιστή της ΗΤΗΡ. Στο τρίτο σενάριο στο HTDHN τροφοδοτείται το σύνολο της ανακτώμενης απορριπτόμενης θερμότητας της ηλεκτρολυτικής συστοιχίας.

Πίνακας 5-5: Ιδιότητες της προσδιδόμενης στο DHN, για το συζευγμένο σύστημα PEML, ORC, LTDHN.

Παράμετρος	Σύμβολο	Τιμή
Προσδιδόμενη Θερμότητα στο LTDHN1	Q_{LTDHN1}	161.13kW
Θερμοκρασία Προσδιδόμενης Θερμότητας	θ_{LTDHN1}	46.50°C

Πίνακας 5-6: Ιδιότητες της προσδιδόμενης στο DHN, για το συζευγμένο σύστημα PEML, ΗΤΗΡ, LTDHN.

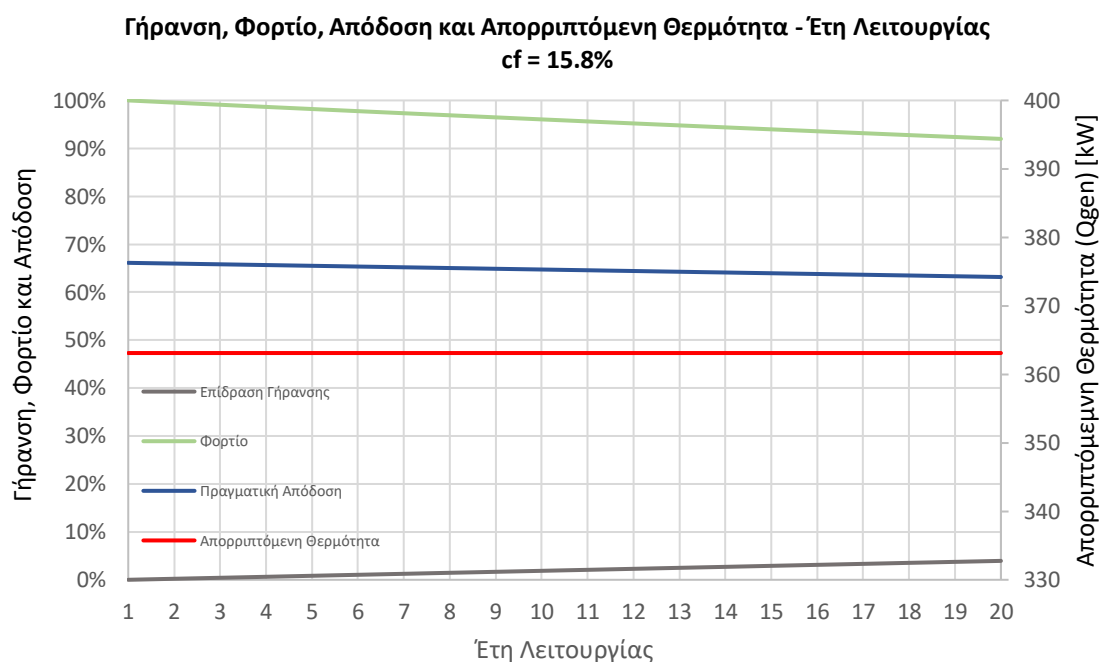
Παράμετρος	Σύμβολο	Τιμή
Προσδιδόμενη Θερμότητα στο LTDHN2	Q_{LTDHN2}	173.68kW
Θερμοκρασία Προσδιδόμενης Θερμότητας	θ_{LTDHN2}	48.56°C

Πίνακας 5-7: Ιδιότητες της προσδιδόμενης στο DHN, για το συζευγμένο σύστημα PEML, HTDHN.

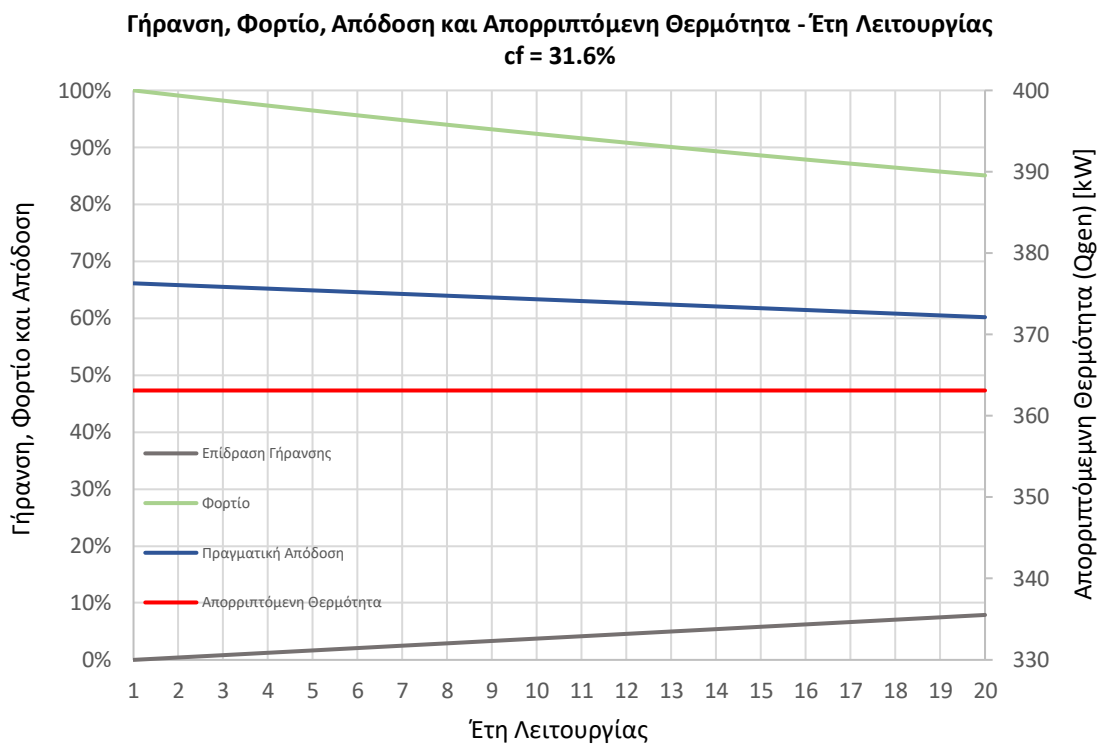
Παράμετρος	Σύμβολο	Τιμή
Προσδιδόμενη Θερμότητα στο HTDHN	Q_{HTDHN}	334.96kW
Θερμοκρασία Προσδιδόμενης Θερμότητας	θ_{HTDHN}	75°C

5.1.6 Συνθήκες Λειτουργίας PEMEL

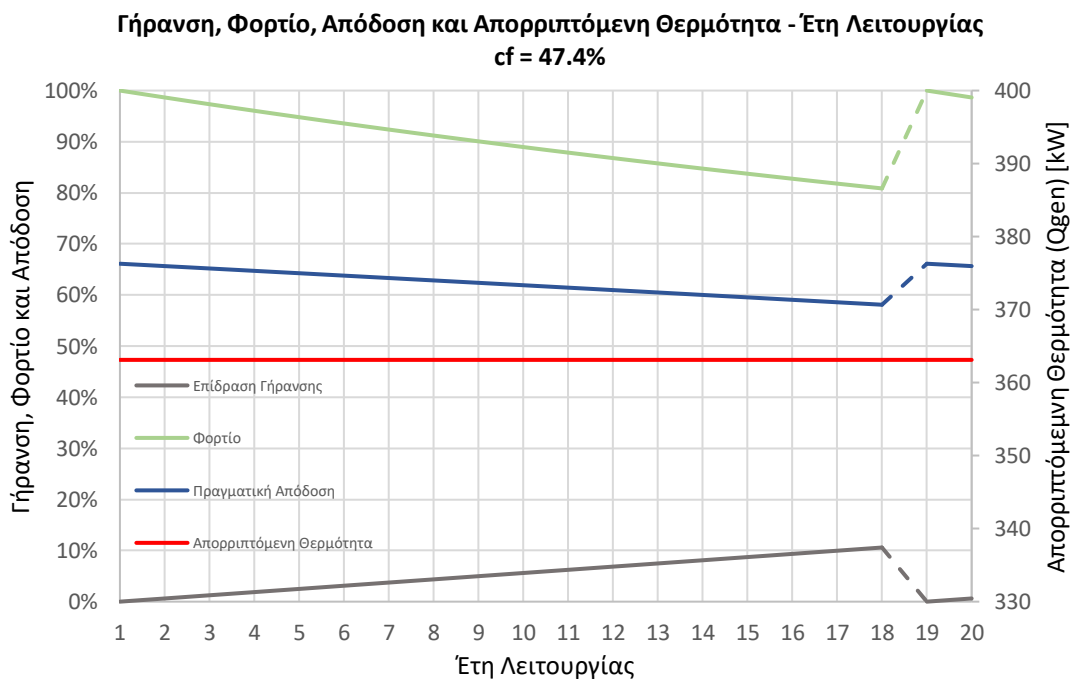
Παρακάτω στα Διαγράμματα 5-18 – 5-22, παρουσιάζεται η εξέλιξη της επίδρασης της γήρανσης, του φορτίου και του βαθμού απόδοσης συναρτήσει των ετών λειτουργίας, για τα πέντε διαφορετικά σενάρια εγκατεστημένης ισχύος του φωτοβολταϊκού πάρκου.



Διάγραμμα 5-18: Γήρανση, φορτίο, απόδοση και απορριπτόμενη θερμότητα ηλεκτρολύτη συναρτήσει των ετών λειτουργίας για cf = 15.8%.

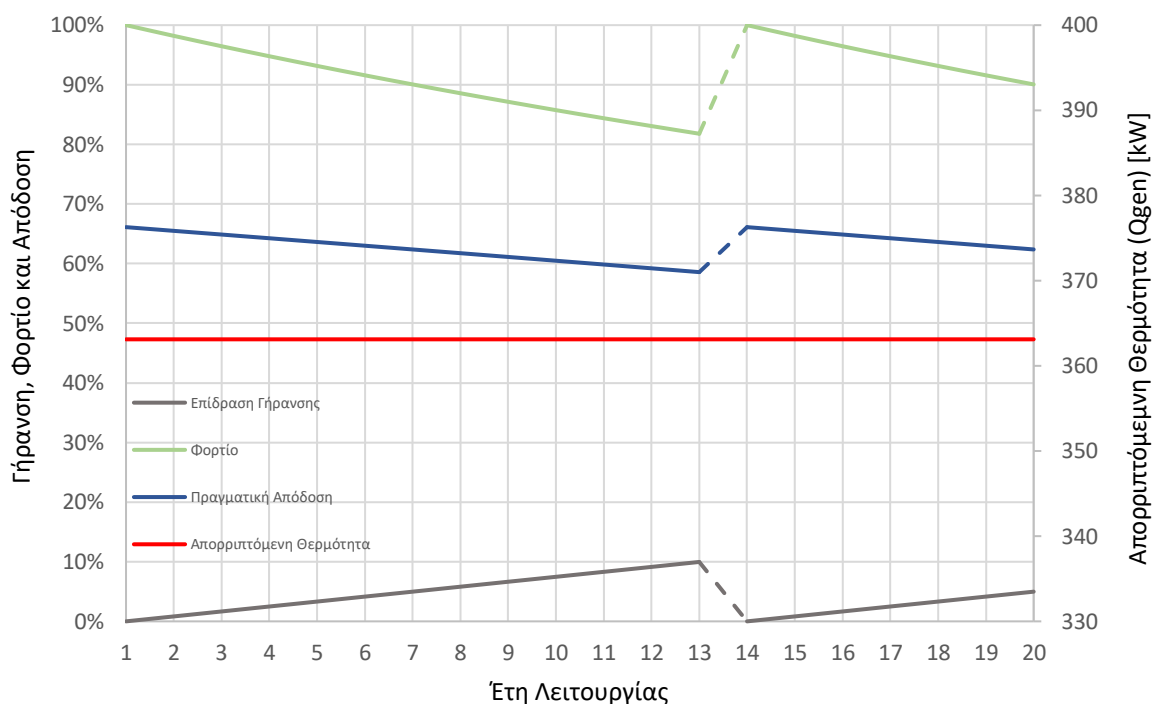


Διάγραμμα 5-19: Γήρανση, φορτίο, απόδοση και απορριπτόμενη θερμότητα ηλεκτρολύτη συναρτήσεως των ετών λειτουργίας για $cf = 31.6\%$.



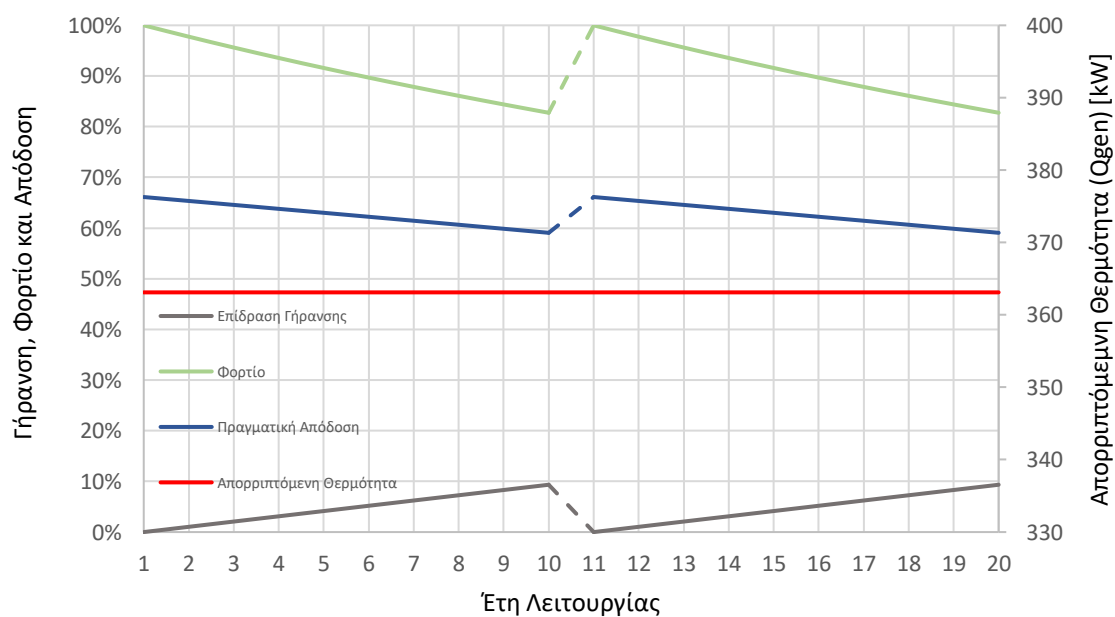
Διάγραμμα 5-20: Γήρανση, φορτίο, απόδοση και απορριπτόμενη θερμότητα ηλεκτρολύτη συναρτήσεως των ετών λειτουργίας για $cf = 47.4\%$.

Γήρανση, Φορτίο, Απόδοση και Απορριπτόμενη Θερμότητα - Έτη Λειτουργίας
 $cf = 63.2\%$



Διάγραμμα 5-21: Γήρανση, φορτίο, απόδοση και απορριπτόμενη θερμότητα ηλεκτρολύτη συναρτήσσει των ετών λειτουργίας για $cf = 63.2\%$.

Γήρανση, Φορτίο, Απόδοση και Απορριπτόμενη Θερμότητα - Έτη Λειτουργίας
 $cf = 79\%$

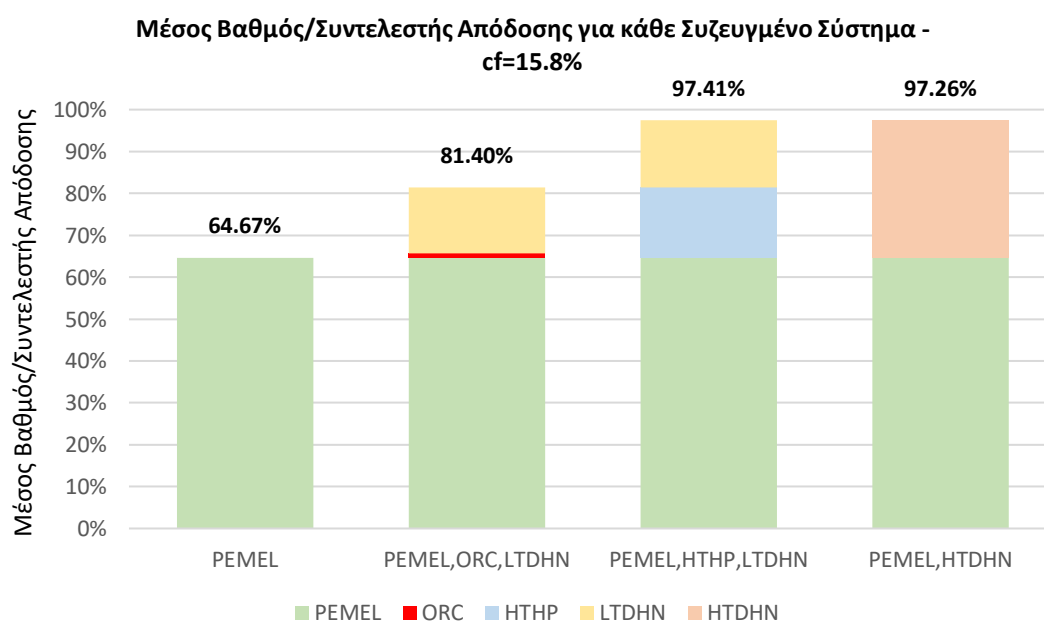


Διάγραμμα 5-22: Γήρανση, φορτίο, απόδοση και απορριπτόμενη θερμότητα ηλεκτρολύτη συναρτήσσει των ετών λειτουργίας για $cf = 79\%$.

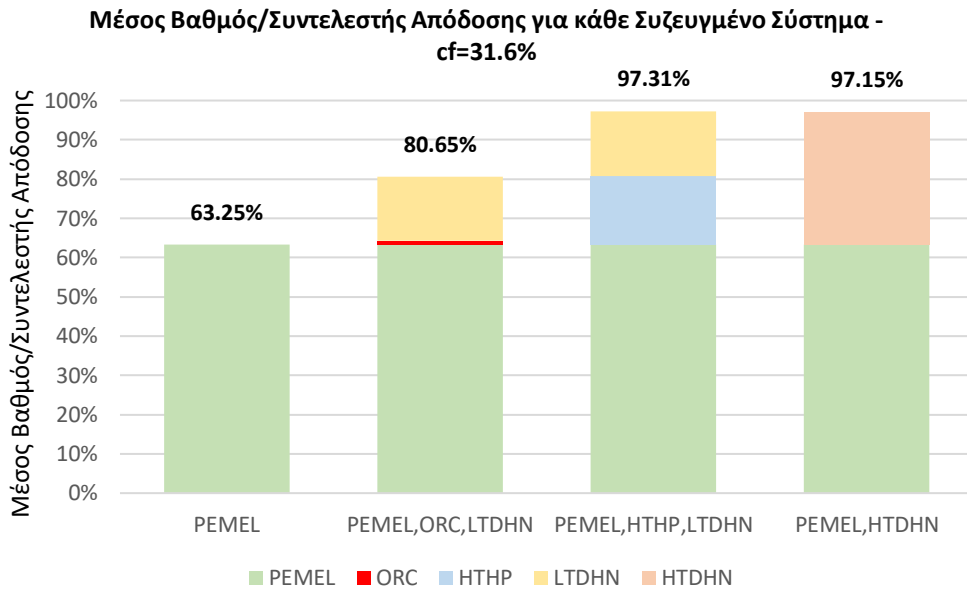
Παρατηρείται πως με το πέρας των ετών και την εντατικοποίηση της επίδρασης της γήρανσης, το φορτίο του PEMEL θα πρέπει να μειώνεται ώστε να διατηρηθεί σταθερή η απορριπτόμενη θερμότητα. Η επίδραση της γήρανσης επιδεινώνει τον βαθμό απόδοσης του PEMEL και έτσι λειτουργώντας τον ηλεκτρολύτη σε χαμηλότερα φορτία ο βαθμός απόδοσης βελτιώνεται και η επιδείνωση αντισταθμίζεται. Επίσης, γίνεται αντιληπτό πως η επίτευξη της απαιτούμενης σταθερής απορριπτόμενης θερμότητας σε χαμηλότερά από το ονομαστικό φορτίο, οδηγεί σε μείωση της τελικής προκύπτουσας πραγματικής απόδοσης της κυψέλης ηλεκτρόλυσης, με το πέρας των ετών. Η ασυνέχεια που παρατηρείται στα διαγράμματα επισημαίνει πως σε εκείνο το έτος πραγματοποιείται αντικατάσταση του PEMEL, ώστε να μην ξεπεραστεί οι μέγιστη διάρκεια ζωής των 75,000 hr λειτουργίας. Για μεγαλύτερους συντελεστές φορτίου, η επίδραση της γήρανσης είναι εντονότερη, η μέγιστη διάρκεια ζωής επιτυγχάνεται γρηγορότερα και συνεπώς η αντικατάσταση του ηλεκτρολύτη συμβαίνει νωρίτερα.

5.1.7 Μέσοι Βαθμοί/Συντελεστές Απόδοσης

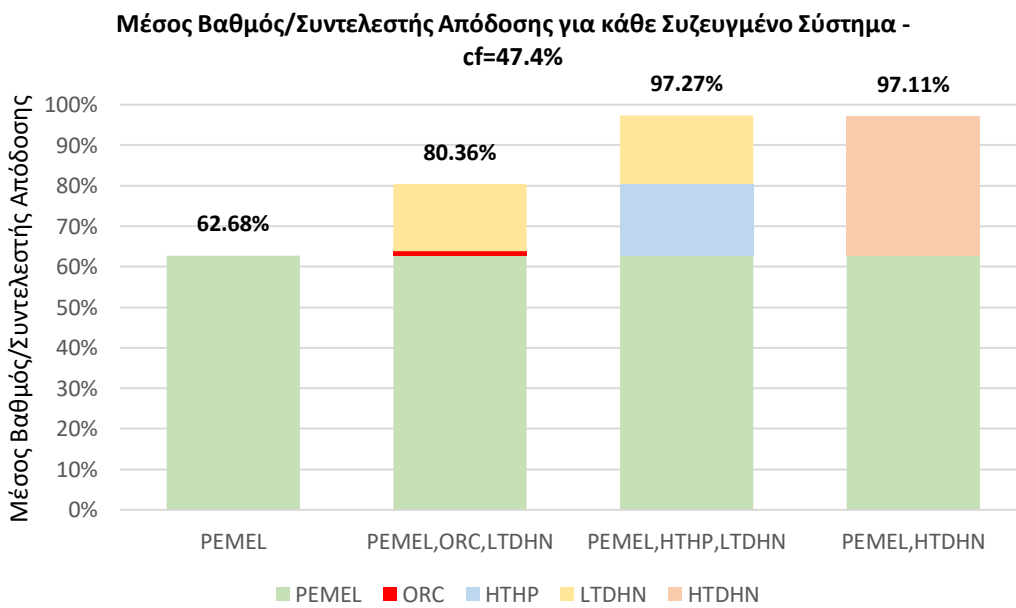
Παρακάτω στα Διαγράμματα 5-23 - 5-27, παρουσιάζονται οι μέσοι βαθμοί/συντελεστές απόδοσης των συζευγμένων συστημάτων για όλη την διάρκεια ζωής του έργου, για τα διαφορετικά σενάρια ετήσιου συντελεστή φορτίου.



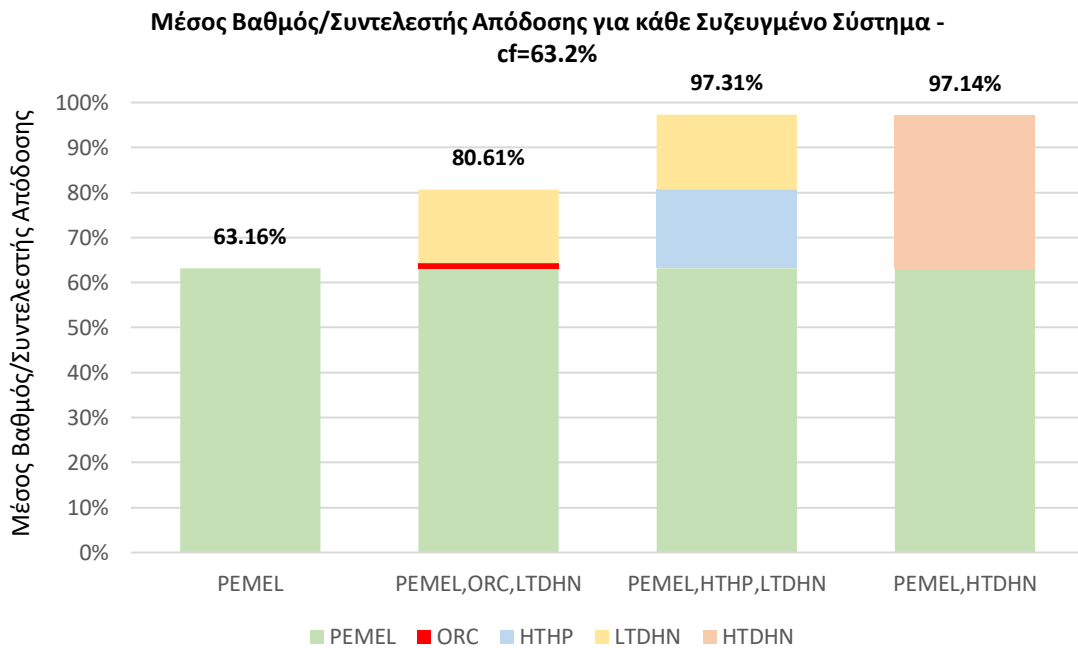
Διάγραμμα 5-23: Μέσος Βαθμός/Συντελεστής Απόδοσης για κάθε Συζευγμένο Σύστημα - cf=15.8%



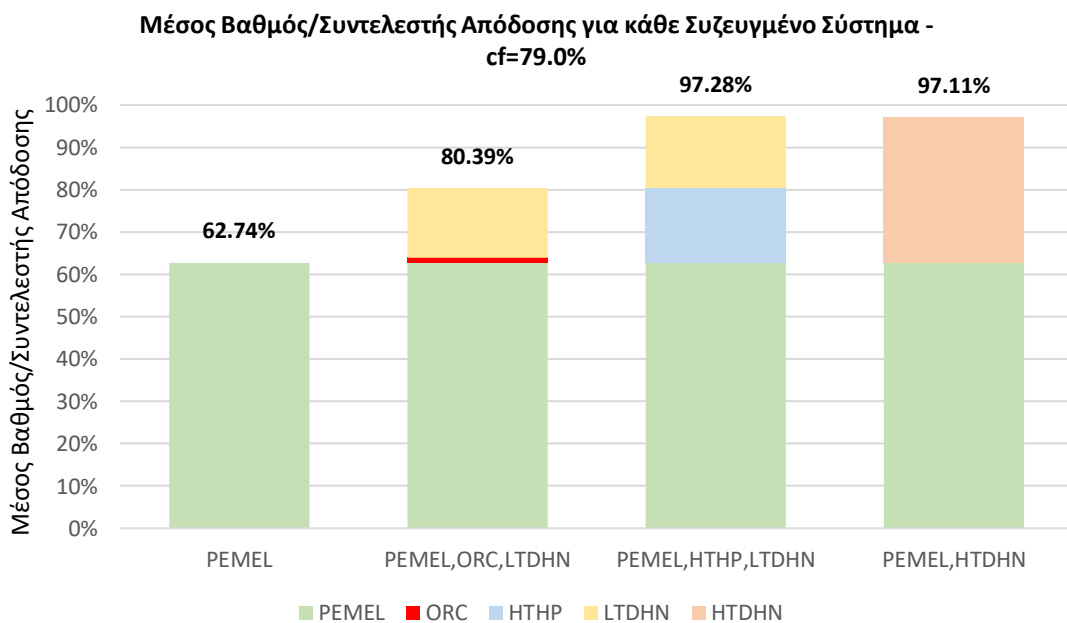
Διάγραμμα 5-24: Μέσος Βαθμός/Συντελεστής Απόδοσης για κάθε Συζευγμένο Σύστημα - cf=31.6%



Διάγραμμα 5-25: Μέσος Βαθμός/Συντελεστής Απόδοσης για κάθε Συζευγμένο Σύστημα - cf=47.4%



Διάγραμμα 5-26: Μέσος Βαθμός/Συντελεστής Απόδοσης για κάθε Συζευγμένο Σύστημα - cf=63.2%



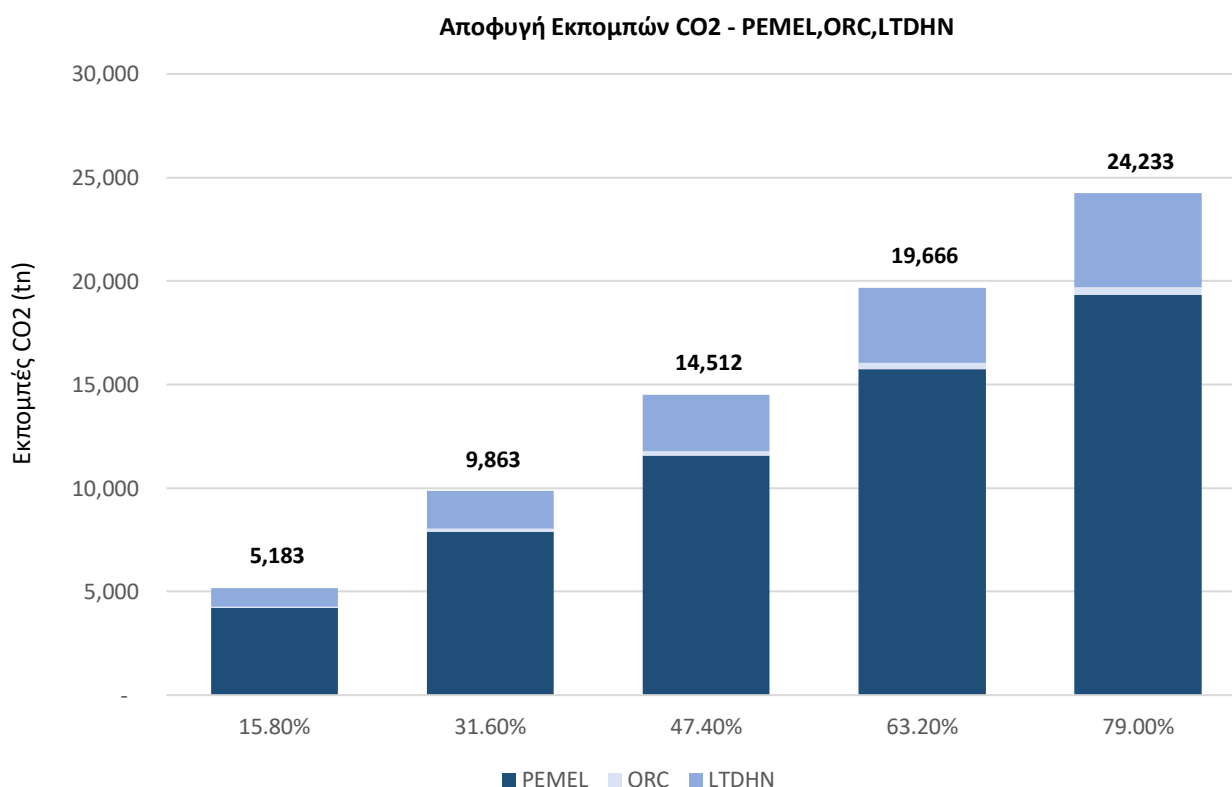
Διάγραμμα 5-27: Μέσος Βαθμός/Συντελεστής Απόδοσης για κάθε Συζευγμένο Σύστημα - cf=79.0%

Παρατηρείται σε όλες τις περιπτώσεις πως ο μέσος βαθμός/συντελεστής απόδοσης της 20ετίας του συστήματος παραγωγής υδρογόνου βελτιώνεται με την σύζευξη του με κάθε σύστημα ανάκτησης θερμότητας, με τον βέλτιστο βαθμό απόδοσης να επιτυγχάνεται για όλους τους συντελεστές φορτιού με την σύζευξη του PEMEL με HTHP και LTDHN. Επίσης

είναι αξιοσημείωτο πως οι βαθμοί απόδοσης κάθε σεναρίου είναι μέγιστοι για $cf = 15.8\%$ και φθίνουν ως και $cf = 47.4\%$, ενώ έπειτα αυξάνονται για $cf = 63.2\%$, και μειώνονται και πάλι για $cf = 79.0\%$. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι ενώ από το $cf = 15.8\%$ ως το $cf = 47.4\%$, η πραγματική απόδοση του ηλεκτρολύτη μειώνεται μιας και η επίδραση της γήρανσης αυξάνεται, γεγονός που παύει να ισχύει για $cf = 63.2\%$, μιας και ο ηλεκτρολύτης αντικαθίσταται στο 13^ο έτος λειτουργίας του, με αποτέλεσμα η μέση πραγματική απόδοση του, για τον ορίζοντα της μελέτης να βελτιώνεται. Στην περίπτωση του $cf = 79.0\%$, παρότι ο ηλεκτρολύτης αντικαθίσταται στο 10^ο έτος αποσβένεται εκ νέου πλήρως ως το 20^ο έτος.

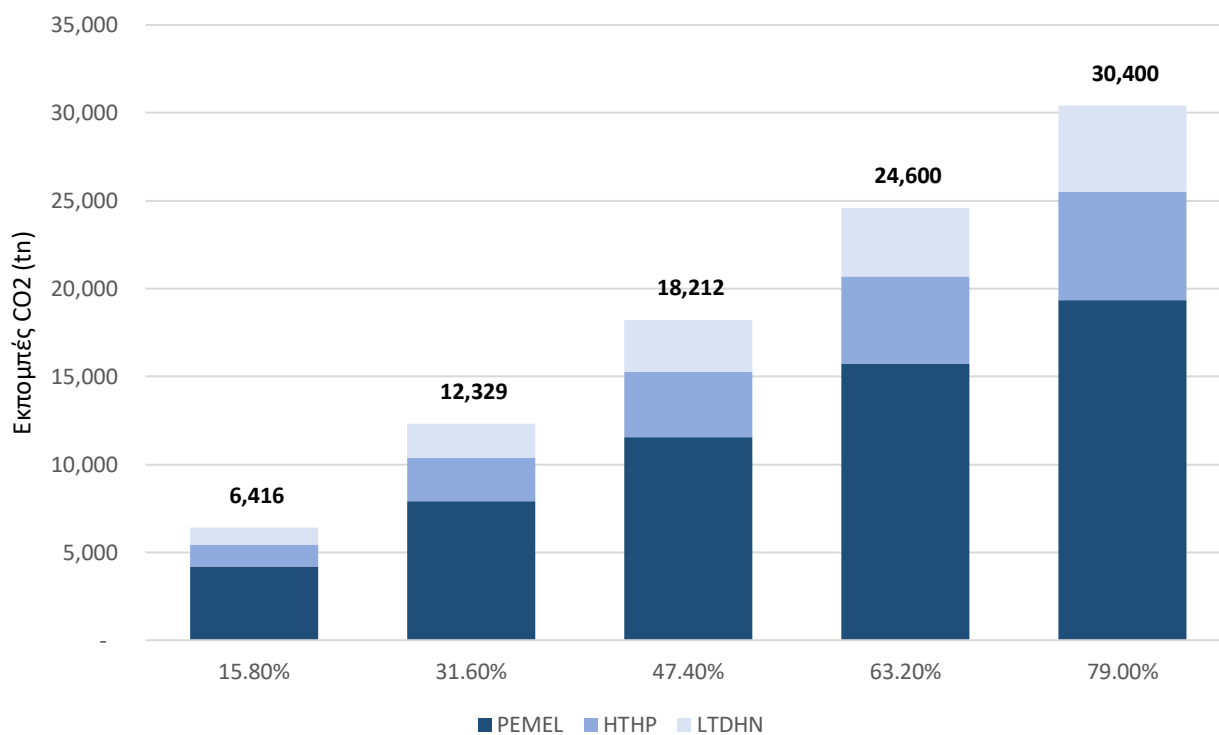
5.2 Αποτελέσματα Περιβαλλοντικής Ανάλυσης

Παρακάτω στα Διαγράμματα 5-38 – 5-30, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της περιβαλλοντικής ανάλυσης και συγκεκριμένα η ποσότητα ισοδύναμων εκπομπών CO_2 που αποφεύγεται, από την χρήση «πράσινων» έναντι συμβατικών τεχνολογιών. Ειδικότερα εξετάστηκε πόσοι τόνοι CO_2 αποφεύγονται καθ' όλο τον επενδυτικό ορίζοντα της 20ετίας, εάν η μέθοδος παραγωγής του υδρογόνου ήταν η αναμόρφωση μεθανίου με ατμό (SMR), εάν η αξιοποιήσιμη θερμότητα προερχόταν από λέβητα φυσικού αερίου και εάν η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια στον ORC, προερχόταν από το ενεργειακό μίγμα του δικτύου. Συνεπώς στα παρακάτω διαγράμματα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για τα τρία διαφορετικά τεχνικά σενάρια για τις πέντε διαφορετικές περιπτώσεις συντελεστή φορτίου.

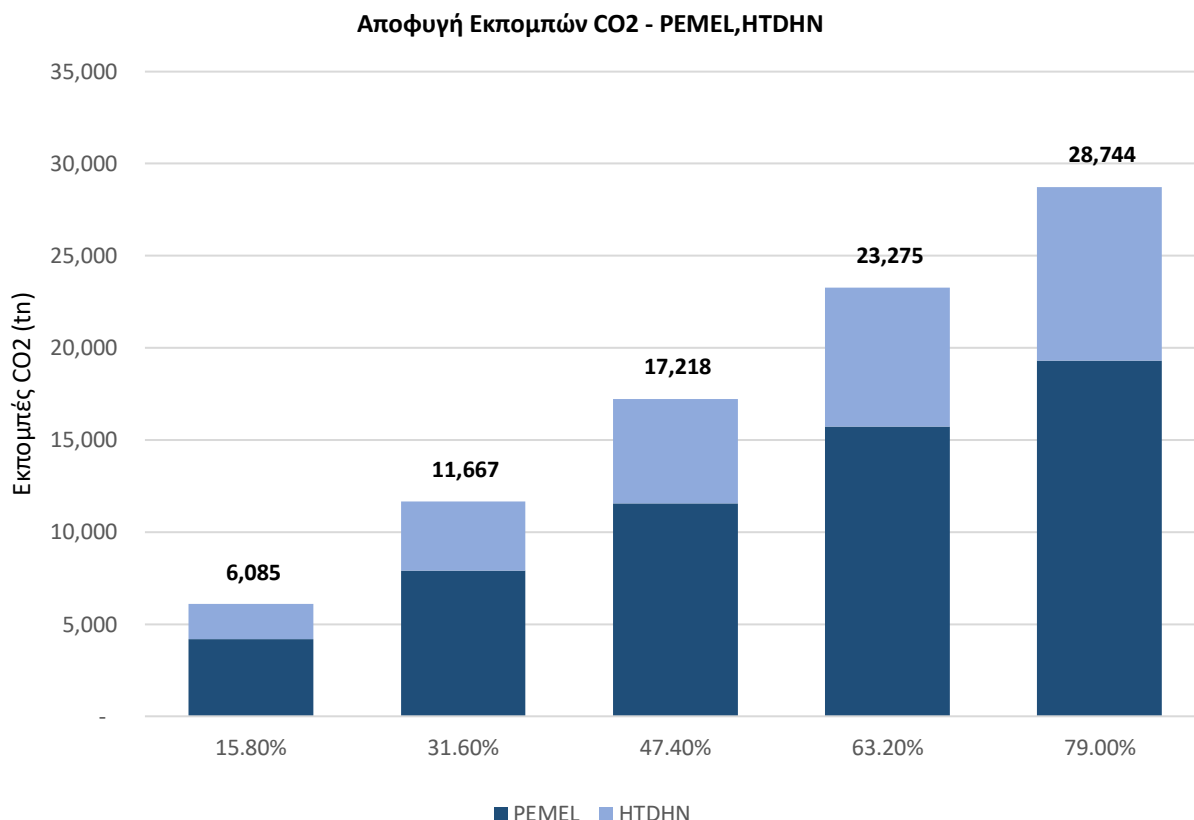


Διάγραμμα 5-28: Αποφυγή Εκπομπών CO_2 συζευγμένου συστήματος PEMEL,ORC,LTDHN συναρτήσεως των ετών λειτουργίας.

Αποφυγή Εκπομπών CO₂ - PEMEL,HTHP,LTDHN



Διάγραμμα 5-29: Αποφυγή Εκπομπών CO₂ συζευγμένου συστήματος PEMEL,HTHP,LTDHN συναρτήσει των ετών λειτουργίας.



Διάγραμμα 5-30: Αποφυγή Εκπομπών CO₂ συζευγμένου συστήματος PEMEL,HTDHN συναρτήσει των ετών λειτουργίας.

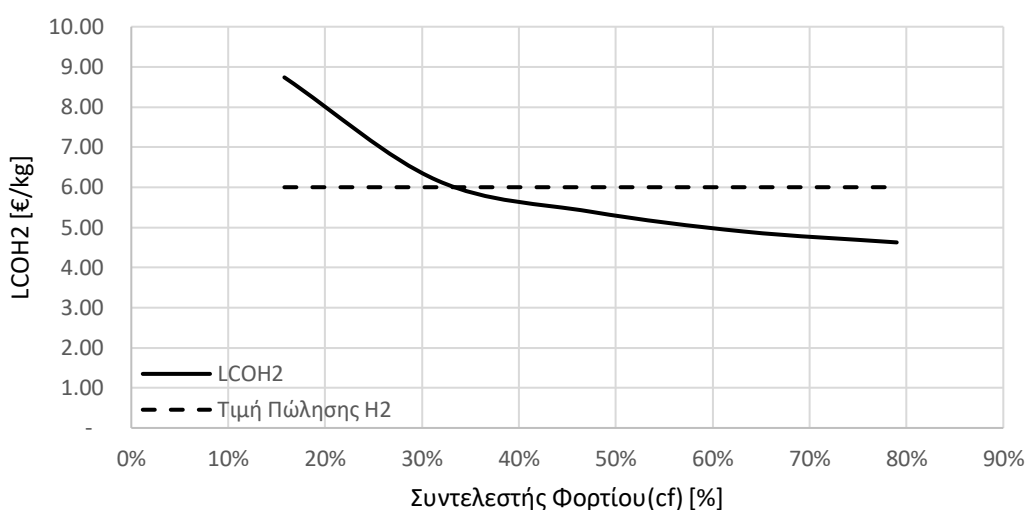
Για όλα τα συζευγμένα συστήματα παρατηρείται αύξηση της ποσότητας των εκπομπών άνθρακα που αποφεύγονται, με την αύξηση του συντελεστή φορτίου. Η μεγαλύτερη μείωση του ανθρακικού αποτυπώματος, συγκρίνοντας με τις συμβατικές τεχνολογίες, παρατηρείται για το συζευγμένο σύστημα PEMEL, ΗΤΗΡ, LTDHN μιας και για το σενάριο αυτό υποκαθίσταται η μεγαλύτερη ποσότητα ισχύος.

5.3 Αποτελέσματα Οικονομικής Ανάλυσης

5.3.1 Σταθμισμένα Κόστη

Στα Διαγράμματα 5-31 – 5-34, παρουσιάζονται τα σταθμισμένα κόστη των ενεργειακών εκροών και συγκεκριμένα του υδρογόνου, της ηλεκτρικής ενέργειας, της θερμότητας και του ατμού για τα τρία σενάρια αξιοποίησης της απορριπτόμενης θερμότητας και οι αντίστοιχες τιμές πώλησης τους συναρτήσει του συντελεστή φορτίου 4-14.

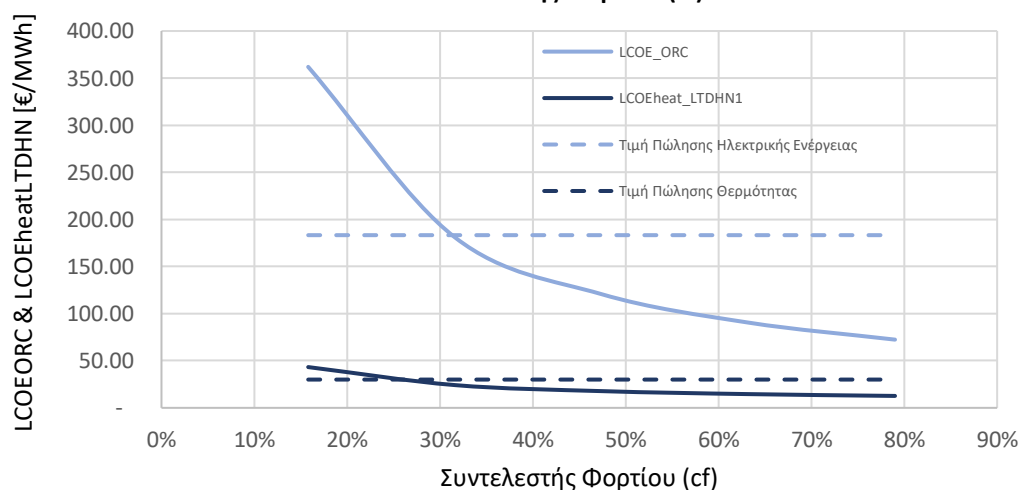
Σταθμισμένο Κόστος Παραγωγής Η2 (LCOH2) - Συντελεστής Φορτίου (cf)



Διάγραμμα 5-31: Σταθμισμένο κόστος παραγωγής υδρογόνου συναρτήσει συντελεστή φορτίου.

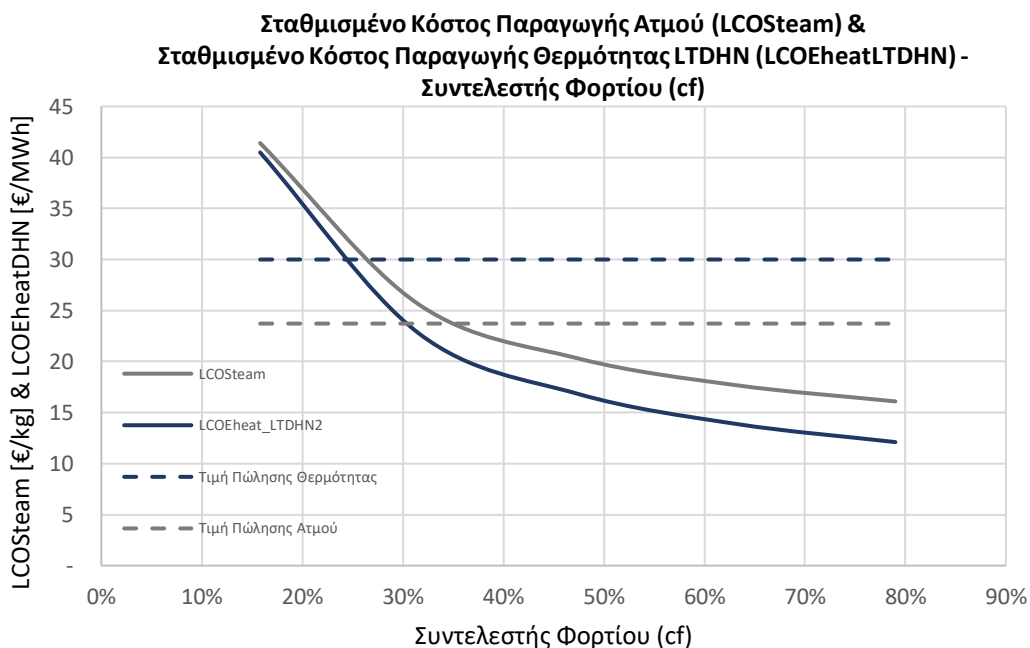
Το $LCOH$ λαμβάνει την τιμή 8.74 €/kg για $cf = 15.8\%$ και μειώνεται ως και 4.62 €/kg για $cf = 79.0\%$.

Σταθμισμένο Κόστος Παραγωγής Ηλεκτρικής Ενέργειας ORC (LCOE_{ORC}) & Σταθμισμένο Κόστος Παραγωγής Θερμότητας LTDHN (LCOE_{heatLTDHN}) - Συντελεστής Φορτίου (cf)



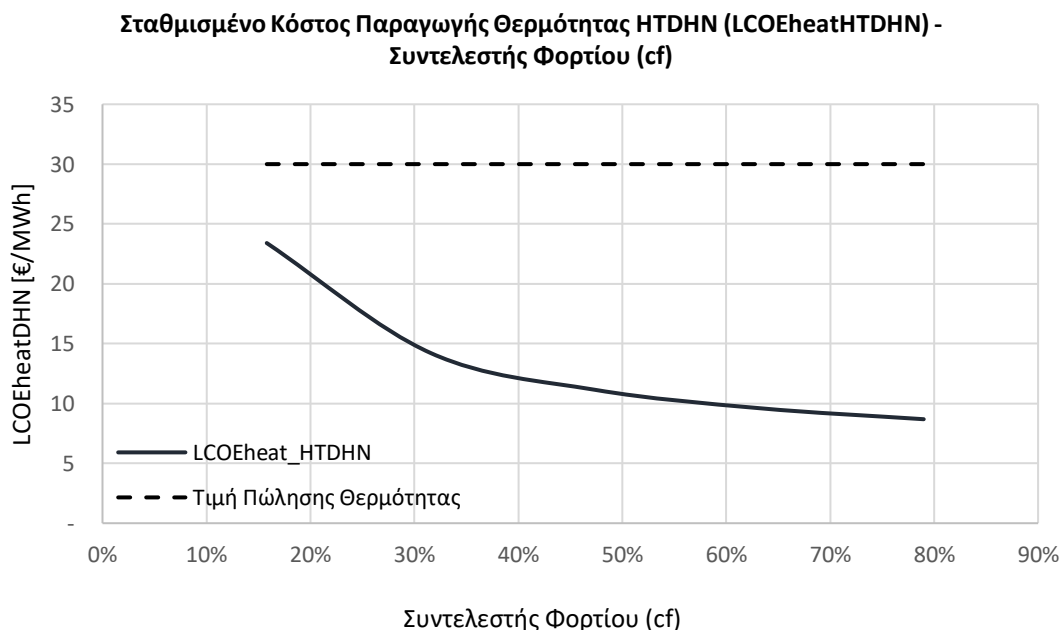
Διάγραμμα 5-32: Σταθμισμένο κόστος ηλεκτρικής ενέργειας ORC και θερμότητας LTDHN συναρτήσει του συντελεστή φορτίου.

Για το συζευγμένο σύστημα PEMEL,ORC,LTDHN το $LCOE_{ORC}$ λαμβάνει την τιμή 361.96 €/MWh_{el} για $cf = 15.8\%$ και μειώνεται ως και 72.39 €/MWh_{el} για $cf = 79.0\%$, ενώ το $LCOE_{heatLTDHN}$ μειώνεται από 43.25 €/MWh_{th} σε 12.66 €/MWh_{th} αντίστοιχα.



Διάγραμμα 5-33: Σταθμισμένο κόστος ατμού ΗΤΗΡ και θερμότητας LTDHN συναρτήσει του συντελεστή φορτίου.

Για το συζευγμένο σύστημα PEMEL, ΗΤΗΡ, LTDHN το LCO_{Steam} λαμβάνει την τιμή 41.41 €/kg για $cf = 15.8\%$ και μειώνεται ως και 16.09 €/kg για $cf = 79.0\%$, ενώ το $LCO_{Heat_{DHN}}$ μειώνεται από 40.49 €/MWh_{th} σε 12.10 €/MWh_{th} αντίστοιχα.

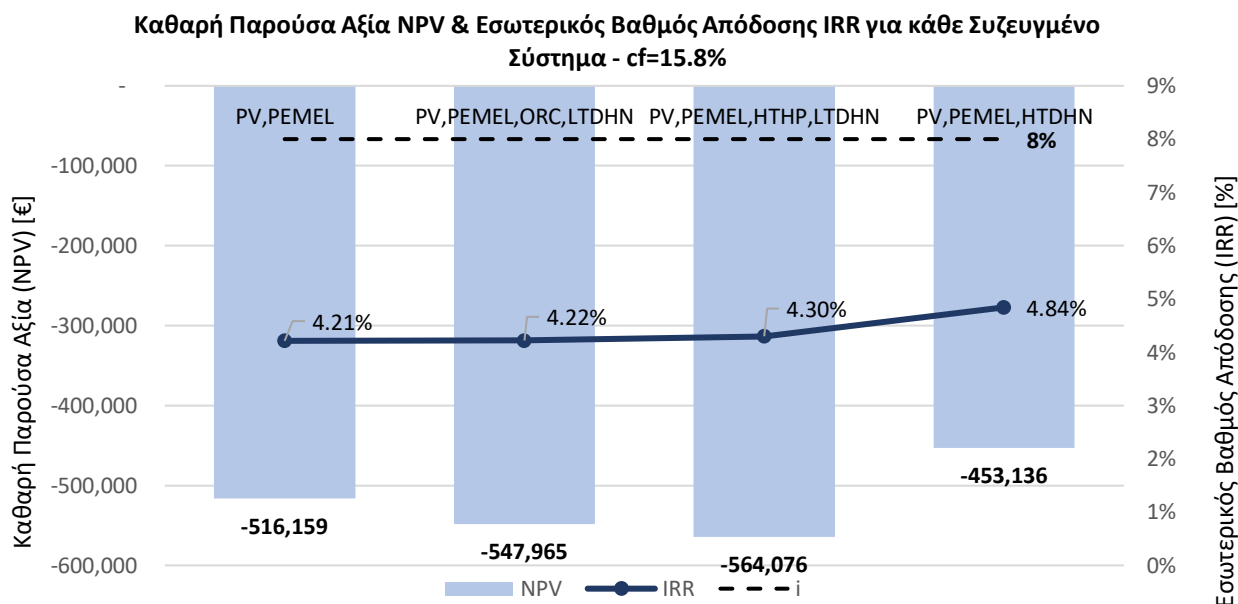


Διάγραμμα 5-34: Σταθμισμένο κόστος θερμότητας ΗΤDHN συναρτήσει του συντελεστή φορτίου.

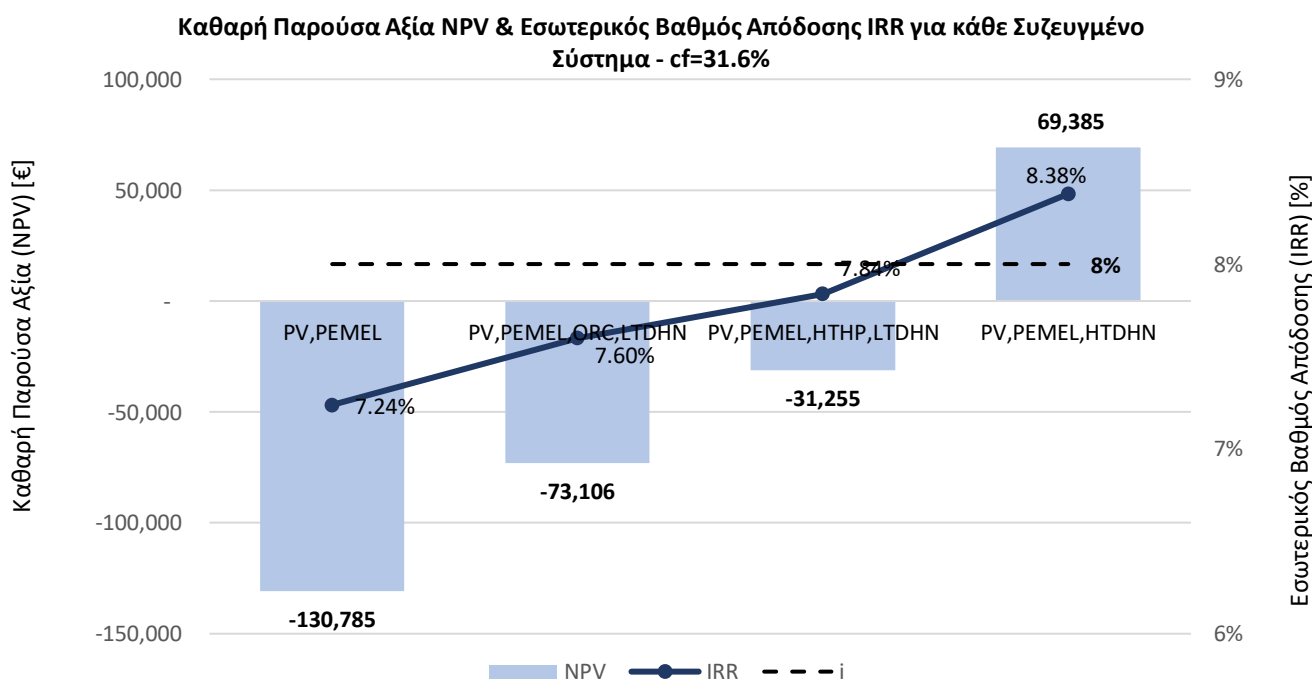
Για το συζευγμένο σύστημα PEM, ΗΤDHN το $LCO_{Heat_{DHN}}$ λαμβάνει την τιμή 23.41 €/MWh_{th} για $cf = 15.8\%$ και μειώνεται ως και 8.69 €/MWh_{th} για $cf = 79.0\%$.

5.3.2 Κριτήρια Αξιολόγησης Επενδύσεων

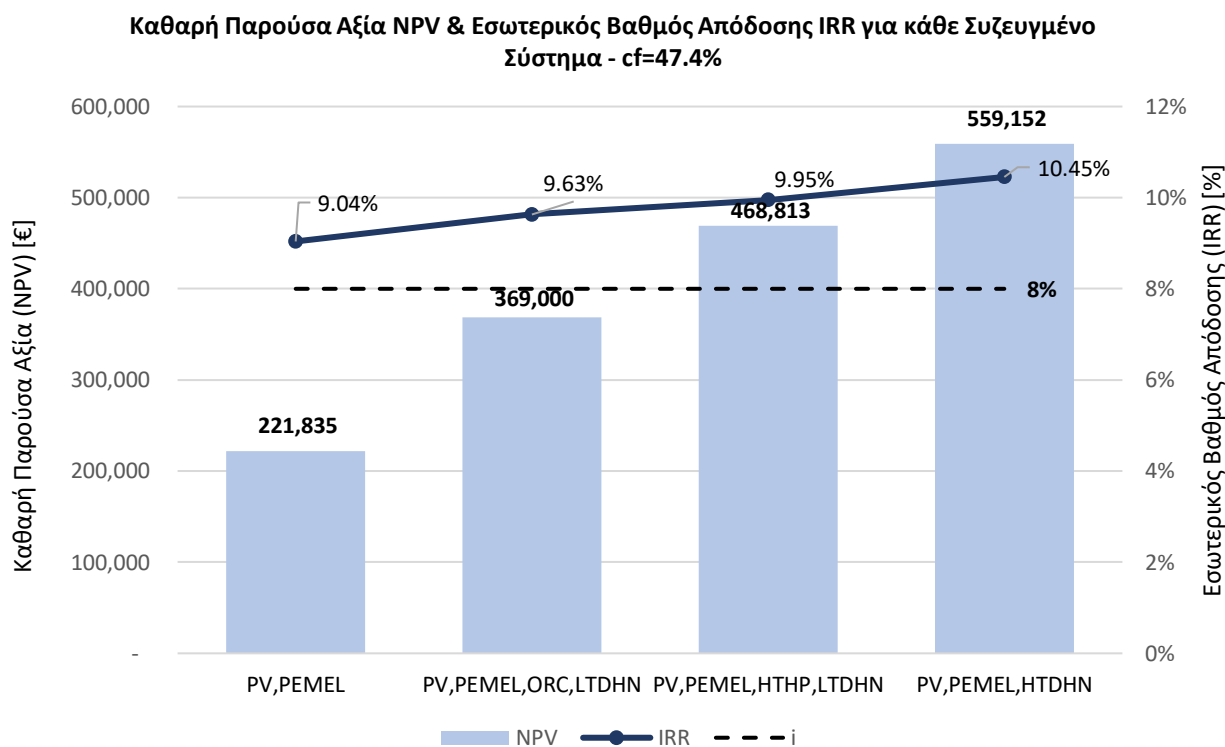
Παρακάτω στα Διαγράμματα 5-35 – 5-39 παρουσιάζονται τα κριτήρια αξιολόγησης NPV, IRR της επένδυσης για κάθε συντελεστή φορτίου.



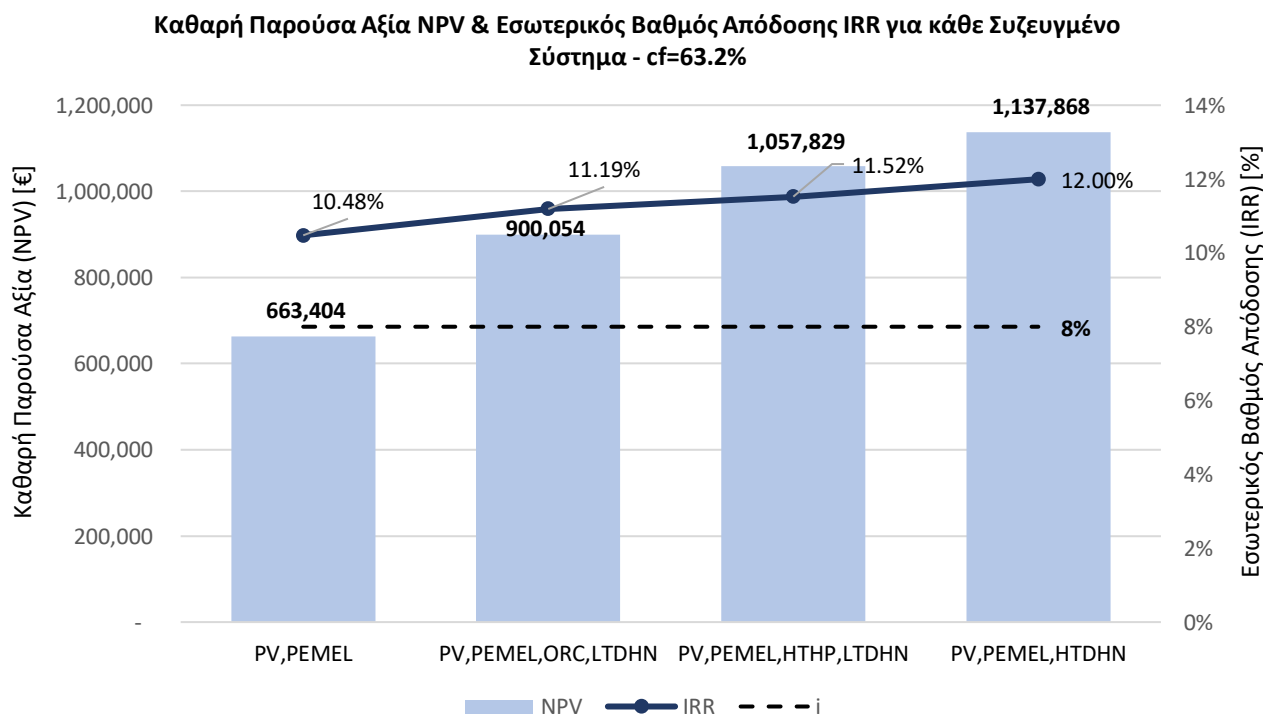
Διάγραμμα 5-35: Καθαρή Παρούσα Αξία NPV & Εσωτερικός Βαθμός Απόδοσης IRR για κάθε συζευγμένο σύστημα - cf=15.8%



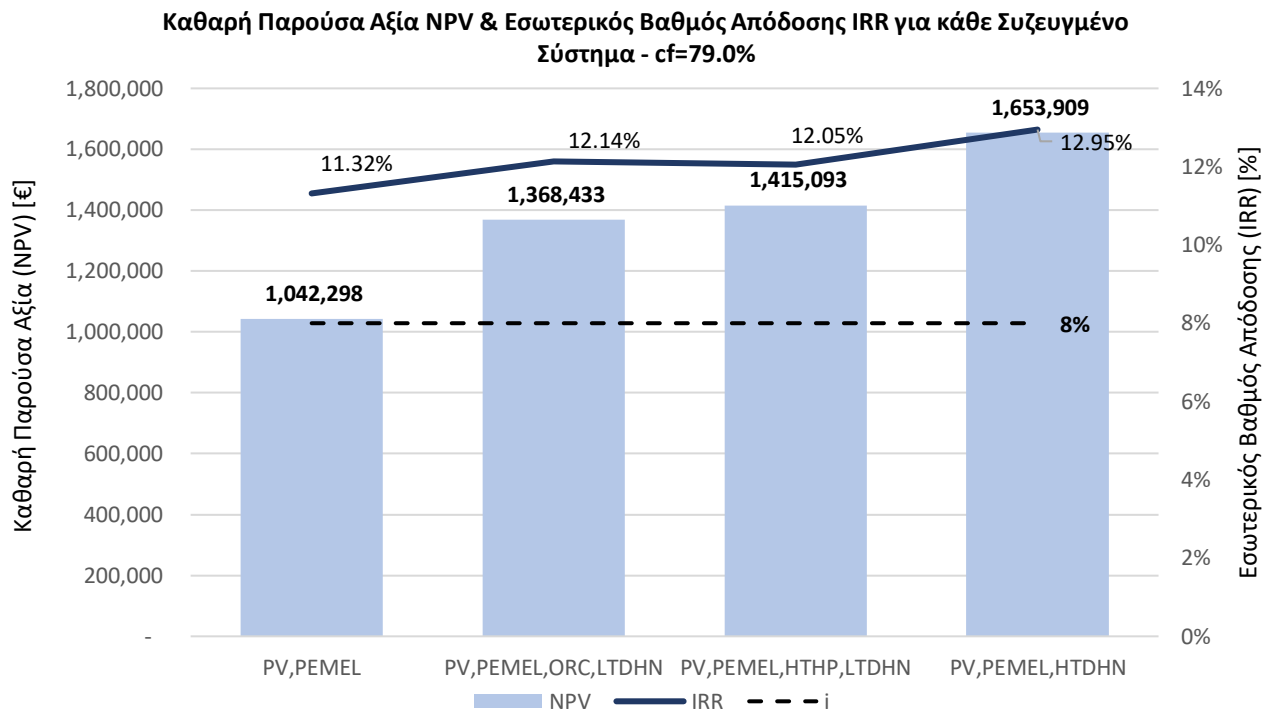
Διάγραμμα 5-36: Καθαρή Παρούσα Αξία NPV & Εσωτερικός Βαθμός Απόδοσης IRR για κάθε συζευγμένο σύστημα - cf=31.6%



Διάγραμμα 5-37: Καθαρή Παρούσα Αξία NPV & Εσωτερικός Βαθμός Απόδοσης IRR για κάθε συζευγμένο σύστημα - cf=47.4%



Διάγραμμα 5-38: Καθαρή Παρούσα Αξία NPV & Εσωτερικός Βαθμός Απόδοσης IRR για κάθε συζευγμένο σύστημα - cf=63.2%



Διάγραμμα 5-39: Καθαρή Παρούσα Αξία NPV & Εσωτερικός Βαθμός Απόδοσης IRR για κάθε συζευγμένο σύστημα - $cf=79.0\%$

Παρατηρείται πως η σύζευξη του PEMEL με τα συστήματα ανάκτησης θερμότητας βελτιώνει τους επενδυτικούς δείκτες NPV, IRR για όλους τους συντελεστές φορτίου πλην της σύζευξης του με ORC, LTDHN και HTHP, LTDHN για $cf = 15.8\%$. Για $cf = 15.8\%$ οι παραγόμενες ενεργειακές εκροές από τα συστήματα ανάκτησης θερμότητας ORC, LTDHN και HTHP, LTDHN πωλούνται σε τιμές μικρότερες από το απαιτούμενο σταθμισμένο κόστος παραγωγής τους με αποτέλεσμα να δημιουργούνται επιπλέον ροές εξόδων και ο NPV να επιδεινώνεται. Στις υπόλοιπες περιπτώσεις με αύξηση του συντελεστή φορτίου μειώνονται τα σταθμισμένα κόστη και η σύζευξη του PEMEL με τα συστήματα αξιοποίησης της απορριπτόμενης θερμότητας, συντελεί στην βελτίωση των δεικτών NPV, IRR και στην επιπλέον κερδοφορία της επένδυσης.

Η θετικότερη επίδραση της ανάκτησης της απορριπτόμενης θερμότητας της συστοιχίας ηλεκτρόλυσης, στην οικονομική σκοπιμότητα της επένδυσής, παρατηρείται για το συζευγμένο σύστημα PV, PEMEL, HTDHN για $cf = 79.0\%$, στο οποίο οι δείκτες NPV και IRR αυξάνονται από 1,042,298€ και 11.32% σε 1,653,909€ και 12.95% αντίστοιχα.

6 Συμπεράσματα – Μελλοντική Εργασία

6.1 Συμπεράσματα

Η παγκόσμια και ευρωπαϊκή στρατηγική για την αναχαίτηση της κλιματικής καταστροφής, προτάσσουν την ανάδειξη ουδέτερων ενεργειακών φορέων και την βελτίωση της απόδοσης των ενεργειακών συστημάτων. Τα έργα πράσινου υδρογόνου που ανακοινώνονται πληθαίνουν συνεχώς και οι τεχνολογίες ηλεκτρόλυσης αναμένεται να κυριαρχήσουν κατά το τελευταίο στάδιο της εδραίωσης της οικονομίας υδρογόνου. Η βελτίωση του βαθμού απόδοσης και της οικονομικής βιωσιμότητας των έργων παραγωγής ανανεώσιμου υδρογόνου, μέσω της σύζευξης τους με τεχνολογίες ανάκτησης της απορριπτόμενης θερμότητας, δύναται να βελτιώσει την ανταγωνιστικότητα τους έναντι στις συμβατικές τεχνολογίες και να επιταχύνει την εδραίωση τους.

Η παρούσα εργασία εστιάζει στην μοντελοποίηση ενός PEM ηλεκτρολύτη ονομαστικής ισχύος 1071.76 kW, με βάση τα δεδομένα λειτουργίας του *PEM Sylizer 200 – Siemens*, ο οποίος λειτουργεί στα πλαίσια του ερευνητικού προγράμματος HYFLEXPOWER. Αρχικά σε περιβάλλον AspenPlus® προσομοιώθηκε η λειτουργία του ηλεκτρολύτη στο ονομαστικό φορτίο με βαθμό απόδοσης 66.10% και παραγωγή υδρογόνου 17.98 kg/h, ενώ έπειτα ενσωματώθηκε σε αυτόν ψυκτικό κύκλωμα με δυνατότητα ανάκτησης 92%, της διαθέσιμης στην ηλεκτρολυτική κυψέλη, θερμότητα, με την συνολική θερμική ισχύ που εν τέλει απορρίπτεται στο σύστημα ψύξης να είναι 334.96kW. Για την αξιοποίηση της θερμότητας αυτής καταστρώθηκαν τρία διαφορετικά σενάρια. Το πρώτο προβλέπει την χρήση της θερμότητας σε σύστημα ORC και τροφοδοσία της υπολειπόμενης θερμικής ισχύος χαμηλής θερμοκρασίας σε δίκτυο τηλεθέρμανσης. Το δεύτερο αξιοποιεί την πλεονάζουσα θερμότητα σε μια ΗΤΗΡ για την αναβάθμιση της θερμοκρασίας του απαγωγού θερμότητας και την παραγωγή ατμού και τροφοδοτεί επίσης θερμικούς καταναλωτές με την υπολειπόμενη θερμότητα μέσω δικτύου τηλεθέρμανσης. Τέλος, το τρίτο σενάριο πραγματεύεται την άμεση τροφοδοσία της απορριπτόμενης, από την ηλεκτρολυτική συστοιχία, θερμότητας, θερμοκρασίας 75°C, σε DHN. Τα παραπάνω σενάρια εξετάζονται έπειτα για πέντε περιπτώσεις συντελεστή φορτίου, με την ηλεκτρική ενέργεια που καταναλώνεται για την διεργασία της ηλεκτρόλυσης να προέρχεται από φωτοβολταϊκό πάρκο, με την μορφή ενός off-site physical PPA. Έχοντας ως στόχο την διατήρηση σταθερής απορριπτόμενης θερμότητας καθ' όλη την διάρκεια ζωής του έργου, το φορτίο λειτουργίας του ηλεκτρολύτη προσαρμόζεται συναρτήσει της επίδρασης της γήρανσης.

Η αποκλειστική παραγωγή υδρογόνου χωρίς ανάκτηση της θερμότητας οδηγεί, στην βέλτιστη περίπτωση, σε μέσο βαθμό απόδοσης 64.67%, αποφυγή εκπομπών CO₂ 19.3 ktn και εσωτερικού βαθμού απόδοσης 11.32%, ενώ το LCOH να λαμβάνει ελάχιστη τιμή ίση με 4.62€/kg. Για το πρώτο εξεταζόμενο συζευγμένο σύστημα, PEMEL, ORC, LTDHN, η καθαρή παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια από τον ORC και η παρεχόμενη στο LTDHN θερμότητα προκύπτουν ίσα με 10.83kW και 161.13kW αντίστοιχα, ενώ στην βέλτιστη περίπτωση επιτυγχάνεται μέσος βαθμός απόδοσης 81.40%, αποφυγή εκπομπών CO₂ 24.2 ktn και εσωτερικός βαθμός απόδοσης 12.14%. Αναφορικά με το δεύτερο σενάριο, PEMEL, ΗΤΗΡ, LTDHN, η παραγόμενη από την ΗΤΗΡ θερμική ισχύς είναι 220.18kW με $CoP = 3.74$ και η παρεχόμενη στο LTDHN θερμότητα ισούται με 173.68kW. Στην βέλτιστη περίπτωση του

σεναρίου αυτού, υπολογίζεται μέσος συντελεστής απόδοσης 97.41%, αποφυγή εκπομπών CO_2 30.4 ktn και εσωτερικού βαθμού απόδοσης 12.05%. Τέλος, στο τρίτο σενάριο PEMEL, HTDHN, η παρεχόμενη στο HTDHN προκύπτει ίση με 334.96kW και κατά την βέλτιστη περίπτωση επιτυγχάνεται μέσος βαθμός απόδοσης 97.26%, αποφυγή εκπομπών CO_2 28.7 ktn και εσωτερικού βαθμού απόδοσης 12.95%, για τον ορίζοντα αξιολόγησης του έργου.

Εν κατακλείδι, η παρούσα διπλωματική εργασία αποδεικνύει πως η αξιοποίηση της απορριπτόμενης θερμότητας μιας ηλεκτρολυτικής συστοιχίας, δύναται να βελτιώσει τον βαθμό απόδοσης του συνολικού συστήματος, συμβάλλει στην απανθρακοποίηση των ενεργειακών συστημάτων και αυξάνει την επενδυτική ασφάλεια των έργων παραγωγής πράσινου υδρογόνου.

6.2 Μελλοντική Εργασία

Με αφορμή την παρούσα διπλωματική εργασία, έχει αξία η περαιτέρω μελέτη των συζευγμένων συστημάτων παραγωγής υδρογόνου και αξιοποίησης της απορριπτόμενης θερμότητας. Μερικές προτάσεις για περαιτέρω έρευνα περιλαμβάνουν:

- Την μελέτη συστήματος πολυπαραγωγής. Συγκεκριμένα πέρα από την παραγωγή πράσινου υδρογόνου και την ανάκτηση της απορριπτόμενης θερμότητάς, έχει αξία η ενσωμάτωση στην ανάλυση, της παραγωγής συνθετικών καυσίμων και της εκ νέου μετατροπής του υδρογόνου ή των καυσίμων αυτών, σε ηλεκτρική ενέργεια, στα πλαίσια ενός ενοποιημένου ενεργειακού συστήματος.
- Την μελέτη του συστήματος για άμεση φυσική διασύνδεση του με κάποια ΑΠΕ και για συνθήκες δυναμικής ζήτησης. Συγκεκριμένα θα είχε ενδιαφέρον η τεchnο-οικονομική μελέτη των συζευγμένων συστημάτων για ένα αποκεντρωμένο σενάριο, χωρίς διασύνδεση τους με το δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας και λαμβάνοντας υπόψιν την δυναμική καμπύλη ζήτησης των παραγόμενων ενεργειακών αγαθών.
- Την θερμο-οικονομική βελτιστοποίηση των συστημάτων ανάκτησης θερμότητας. Συγκεκριμένα, ωφέλιμη θα ήταν η τεchnο-οικονομική βελτιστοποίηση του ORC ή της ΗΤΗΡ, με στόχο την ελαχιστοποίηση των σταθμισμένων κοστών παραγωγής των ενεργειακών αγαθών τους, για τις συνθήκες του υπό μελέτη συστήματος.
- Την αξιολόγηση του κύκλου ζωής και της βιωσιμότητας των συζευγμένων συστημάτων. Ο υπολογισμός των οικονομικών, κοινωνικών και περιβαλλοντικών δεικτών της εγκατάστασης θα συνεισέφεραν σε μια πιο εμπειριστατωμένη άποψη αναφορικά με την βιωσιμότητάς της.

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 3-1: Χρωματική κατηγοριοποίηση υδρογόνου.	13
Πίνακας 3-2: Τεχνολογικά χαρακτηριστικά μεθόδων ηλεκτρόλυσης.	23
Πίνακας 3-3: Καίριοι δείκτες απόδοσης αλκαλικής ηλεκτρόλυσης.	24
Πίνακας 3-4: Καίριοι δείκτες απόδοσης ηλεκτρόλυσης μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων.	25
Πίνακας 3-5: Καίριοι δείκτες απόδοσης ηλεκτρόλυσης στερεού οξειδίου.	25
Πίνακας 3-6: Δείκτες ODP και GWP και κατηγοριοποίηση ασφάλειας κατά ASHRAE ορισμένων εργαζόμενων μέσων [44], [45].	30
Πίνακας 3-7: Κατηγοριοποίηση ασφαλείας εργαζόμενων μέσων κατά ASHRAE [46].	30
Πίνακας 3-8: Βιομηχανικοί τομείς διεργασιών υψηλής θερμοκρασίας [49].	32
Πίνακας 4-1: Πραγματικά Δεδομένα PEM Silyzer 200 - Siemens	38
Πίνακας 4-2: Χαρακτηριστικά του υπό μελέτη PEMel.	39
Πίνακας 4-3: Συντελεστής μεταφοράς φορτίου και πυκνότητα ρεύματος ανταλλαγής για την άνοδο και την κάθοδο.	41
Πίνακας 4-4: Δεδομένα Υπολογισμού Απωλειών Θερμότητας [66].	44
Πίνακας 4-5: Παραδοχές μοντέλου συστήματος ηλεκτρόλυσης.	48
Πίνακας 4-6: Θερμοδυναμικές ιδιότητες εργαζόμενων μέσων [43], [72].	50
Πίνακας 4-7: Παραδοχές μοντέλου ORC.	51
Πίνακας 4-8: Περιβαλλοντικές Ιδιότητες Εργαζόμενων Μέσων [44], [45].	54
Πίνακας 4-9: Τεχνικά χαρακτηριστικά του δικτύου τηλεθέρμανσης χαμηλών θερμοκρασιών.	56
Πίνακας 4-10: Θερμοδυναμικά χαρακτηριστικά και περιβαλλοντικές ιδιότητες R1233zd.	57
Πίνακας 4-11: Δεδομένα Αντλίας Θερμότητας Υψηλών Θερμοκρασιών.	58
Πίνακας 4-12: Τεχνικά χαρακτηριστικά του δικτύου τηλεθέρμανσης χαμηλών θερμοκρασιών.	61
Πίνακας 4-13: Τεχνικά χαρακτηριστικά του δικτύου τηλεθέρμανσης υψηλών θερμοκρασιών.	61
Πίνακας 4-14: Συντελεστές φορτίου φωτοβολταϊκού πάρκου και συστήματος παραγωγής υδρογόνου.	63
Πίνακας 4-15: Παραδοχές μοντέλου λέβητα φυσικού αερίου.	66
Πίνακας 4-16: Ένταση άνθρακα και βαθμός απόδοσης λέβητα φυσικού αερίου.	67
Πίνακας 4-17: Οικονομικά δεδομένα φωτοβολταϊκού πάρκου.	71
Πίνακας 4-18: Οικονομικά δεδομένα συστήματος ηλεκτρόλυσης μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων.	72
Πίνακας 4-19: Οικονομικά δεδομένα οργανικού κύκλου Rankine.	72
Πίνακας 4-20: Οικονομικά δεδομένα αντλίας θερμότητας υψηλών θερμοκρασιών.	73
Πίνακας 4-21: Οικονομικά δεδομένα δικτύων τηλεθέρμανσης.	73
Πίνακας 5-1: Αποτελέσματα θεωρητικής μοντελοποίησης.	76
Πίνακας 5-2: Αποτελέσματα μοντελοποίησης σε περιβάλλον <i>AspenPlus</i> ®.	77
Πίνακας 5-3: Τεχνικά χαρακτηριστικά Οργανικού Κύκλου Rankine στο σημείο λειτουργίας.	81
Πίνακας 5-4: Τεχνικά χαρακτηριστικά αντλίας θερμότητας υψηλών θερμοκρασιών στο σημείο λειτουργίας.	84
Πίνακας 5-5: Ιδιότητες της προσδιδόμενης στο DHN, για το συζευγμένο σύστημα PEML, ORC, LTDHN.	87
Πίνακας 5-6: Ιδιότητες της προσδιδόμενης στο DHN, για το συζευγμένο σύστημα PEML, HTHP, LTDHN.	87

Πίνακας 5-7:Ιδιότητες της προσδιδόμενης στο DHN, για το συζευγμένο σύστημα PEML, HTDHN.....	88
---	----

Κατάλογος Διαγραμμάτων

Διάγραμμα 2-1: Κατανάλωση ενέργειας ανά άτομο σε συνάρτηση με το κατά κεφαλήν ΑΕΠ, 2021 [6].	3
Διάγραμμα 2-2: Μεταβολή της παγκόσμιας επιφανειακής θερμοκρασίας σε σύγκριση με τον μακροπρόθεσμο μέσο όρο από το 1951 έως το 1980 [9].	4
Διάγραμμα 2-3: Εξέλιξη παγκόσμιων εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου ανά τομέα [11]. ..	5
Διάγραμμα 3-1: Παραγωγή υδρογόνου ανά τεχνολογία, 2020-2022 [3].	14
Διάγραμμα 3-2: Απαίτηση ηλεκτρικής ενέργειας, θερμότητας και ολικής ενέργειας ηλεκτρόλυσης συναρτήσει της θερμοκρασίας [27].	16
Διάγραμμα 3-3: Αντιστρέψιμη και Θερμοουδέτερη τάση ηλεκτρόλυσης συναρτήσει της θερμοκρασίας [27].	18
Διάγραμμα 3-4: Διαγράμματα T-s για ξηρά, ισημερινικά και υγρά οργανικά ρευστά [40]....	29
Διάγραμμα 3-5: Εξέλιξη των δικτύων τηλεθέρμανσης, 1η έως 4η γενιά [54].	35
Διάγραμμα 4-1: Καμπύλη κορεσμού, p-h, R245fa.	53
Διάγραμμα 4-2: Καμπύλη κορεσμού, p-h, R134a.	53
Διάγραμμα 4-3: Καμπύλη κορεσμού, p-h, R600a.	53
Διάγραμμα 4-4: Καμπύλη κορεσμού, p-h, R1233zd.	59
Διάγραμμα 4-5: Συνάρτηση βαθμού απόδοσης – φορτίου.	64
Διάγραμμα 5-1:Καμπύλη πόλωσης για διάφορες θερμοκρασίες.	75
Διάγραμμα 5-2:Καμπύλη Πόλωσης για T=80°C.	76
Διάγραμμα 5-3: Διάγραμμα ροής ενέργειας, Sankey.....	77
Διάγραμμα 5-4: Καθαρή ισχύς & βαθμός απόδοσης συναρτήσει της πίεσης εξάτμισης (R245fa).	78
Διάγραμμα 5-5: Καθαρή ισχύς & βαθμός απόδοσης συναρτήσει της πίεσης εξάτμισης (R134a).	78
Διάγραμμα 5-6 : Καθαρή ισχύς & βαθμός απόδοσης συναρτήσει της πίεσης εξάτμισης (R600a).	79
Διάγραμμα 5-7: Καθαρή ισχύς & βαθμός απόδοσης συναρτήσει της πίεσης εξάτμισης (Συγκριτικό Διάγραμμα).	80
Διάγραμμα 5-8: Καθαρή ισχύς & βαθμός απόδοσης συναρτήσει της πίεσης εξάτμισης, R600a στο σημείο λειτουργίας.	81
Διάγραμμα 5-9: Διάγραμμα T-s, ORC R600a.	82
Διάγραμμα 5-10: Διάγραμμα T-s, ORC R600a (μεγέθυνση).	82
Διάγραμμα 5-11: Ελάχιστη θερμοκρασιακή διαφορά στον εξατμιστή του ORC.....	83
Διάγραμμα 5-12: Ελάχιστη θερμοκρασιακή διαφορά στον συμπυκνωτή του ORC.	83
Διάγραμμα 5-13: Συντελεστής θερμικής απόδοσης & παραγόμενη θερμική ισχύς συναρτήσει της πίεσης εξάτμισης.	84
Διάγραμμα 5-14: Διάγραμμα p-h, HTHP R1233zd.	85
Διάγραμμα 5-15: Ελάχιστη θερμοκρασιακή διαφορά στον εξατμιστή της HTHP.....	86
Διάγραμμα 5-16: Ελάχιστη θερμοκρασιακή διαφορά στον συμπυκνωτή της HTHP.	86
Διάγραμμα 5-17: Ελάχιστη θερμοκρασιακή διαφορά στον ΙΗΧ της HTHP.....	87

Διάγραμμα 5-18: Γήρανση, φορτίο, απόδοση και απορριπτόμενη θερμότητα ηλεκτρολύτη συναρτήσει των ετών λειτουργίας για $cf = 15.8\%$	88
Διάγραμμα 5-19: Γήρανση, φορτίο, απόδοση και απορριπτόμενη θερμότητα ηλεκτρολύτη συναρτήσει των ετών λειτουργίας για $cf = 31.6\%$	89
Διάγραμμα 5-20: Γήρανση, φορτίο, απόδοση και απορριπτόμενη θερμότητα ηλεκτρολύτη συναρτήσει των ετών λειτουργίας για $cf = 47.4\%$	89
Διάγραμμα 5-21: Γήρανση, φορτίο, απόδοση και απορριπτόμενη θερμότητα ηλεκτρολύτη συναρτήσει των ετών λειτουργίας για $cf = 63.2\%$	90
Διάγραμμα 5-22: Γήρανση, φορτίο, απόδοση και απορριπτόμενη θερμότητα ηλεκτρολύτη συναρτήσει των ετών λειτουργίας για $cf = 79\%$	90
Διάγραμμα 5-23: Μέσος Βαθμός/Συντελεστής Απόδοσης για κάθε Συζευγμένο Σύστημα - $cf=15.8\%$	91
Διάγραμμα 5-24: Μέσος Βαθμός/Συντελεστής Απόδοσης για κάθε Συζευγμένο Σύστημα - $cf=31.6\%$	92
Διάγραμμα 5-25: Μέσος Βαθμός/Συντελεστής Απόδοσης για κάθε Συζευγμένο Σύστημα - $cf=47.4\%$	92
Διάγραμμα 5-26: Μέσος Βαθμός/Συντελεστής Απόδοσης για κάθε Συζευγμένο Σύστημα - $cf=63.2\%$	93
Διάγραμμα 5-27: Μέσος Βαθμός/Συντελεστής Απόδοσης για κάθε Συζευγμένο Σύστημα - $cf=79.0\%$	93
Διάγραμμα 5-28: Αποφυγή Εκπομπών CO ₂ συζευγμένου συστήματος PEM,ORC,LTDHN συναρτήσει των ετών λειτουργίας.....	94
Διάγραμμα 5-29: Αποφυγή Εκπομπών CO ₂ συζευγμένου συστήματος PEM,HTHP,LTDHN συναρτήσει των ετών λειτουργίας.....	95
Διάγραμμα 5-30: Αποφυγή Εκπομπών CO ₂ συζευγμένου συστήματος PEM,HTDHN συναρτήσει των ετών λειτουργίας.....	96
Διάγραμμα 5-31: Σταθμισμένο κόστος παραγωγής υδρογόνου συναρτήσει συντελεστή φορτίου.	97
Διάγραμμα 5-32: Σταθμισμένο κόστος ηλεκτρικής ενέργειας ORC και θερμότητας LTDHN συναρτήσει του συντελεστή φορτίου.....	97
Διάγραμμα 5-33: Σταθμισμένο κόστος ατμού HTHP και θερμότητας LTDHN συναρτήσει του συντελεστή φορτίου.	98
Διάγραμμα 5-34: Σταθμισμένο κόστος θερμότητας HTDHN συναρτήσει του συντελεστή φορτίου.	98
Διάγραμμα 5-35: Καθαρή Παρούσα Αξία NPV & Εσωτερικός Βαθμός Απόδοσης IRR για κάθε συζευγμένο σύστημα - $cf=15.8\%$	99
Διάγραμμα 5-36: Καθαρή Παρούσα Αξία NPV & Εσωτερικός Βαθμός Απόδοσης IRR για κάθε συζευγμένο σύστημα - $cf=31.6\%$	99
Διάγραμμα 5-37: Καθαρή Παρούσα Αξία NPV & Εσωτερικός Βαθμός Απόδοσης IRR για κάθε συζευγμένο σύστημα - $cf=47.4\%$	100
Διάγραμμα 5-38: Καθαρή Παρούσα Αξία NPV & Εσωτερικός Βαθμός Απόδοσης IRR για κάθε συζευγμένο σύστημα - $cf=63.2\%$	100
Διάγραμμα 5-39: Καθαρή Παρούσα Αξία NPV & Εσωτερικός Βαθμός Απόδοσης IRR για κάθε συζευγμένο σύστημα - $cf=79.0\%$	101

Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 2-1: Σχηματική αναπαράσταση Power-to-X [22].	9
Εικόνα 3-1: Σχηματική απεικόνιση αλκαλικού ηλεκτρολύτη [27].	19
Εικόνα 3-2: Σχηματική απεικόνιση ηλεκτρολύτη μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων [27].	20
Εικόνα 3-3: Σχηματική απεικόνιση ηλεκτρολύτη στερεού οξειδίου [27].	22
Εικόνα 3-4: Σχηματική αναπαράσταση εγκατάστασης συστήματος ηλεκτρόλυσης [27].	23
Εικόνα 3-5: Μονογραμμικό κύκλωμα α) απλού ORC β) ORC με οικονομητήρα [39].	28
Εικόνα 3-6: Θερμοδυναμικό διάγραμμα T-s απλού ORC και ORC με οικονομητήρα [42].	28
Εικόνα 3-7: α) Μονογραμμικό κύκλωμα απλής αντλίας θερμότητας β) Θερμοδυναμικό διάγραμμα P-h [50].	31
Εικόνα 3-8: Μονογραμμικό κύκλωμα α) αντλίας θερμότητας με εσωτερικό εναλλάκτη θερμότητας β)) αντλίας θερμότητας διπλής συμπίεσης [50].	32
Εικόνα 4-1: Σχηματική απεικόνιση της διεργασίας Power-to-X-to-Power στο HYFLEXPOWER [58].	38
Εικόνα 4-2: Απεικόνιση PEM Silyzer 200 – Siemens.	39
Εικόνα 4-3: Μοντελοποίηση PEMel σε περιβάλλον <i>AspenPlus</i> ®.	46
Εικόνα 4-4: Σχηματική αναπαράσταση διπολικών πλακών με κύκλωμα ψυκτικού σε PEM κυψέλη καυσίμου [71].	47
Εικόνα 4-5: Μοντελοποίηση PEMel και ψυκτικού κυκλώματος σε περιβάλλον <i>AspenPlus</i> ®.	48
Εικόνα 4-6: Τοποθεσία HYFLEXPOWER.	51
Εικόνα 4-7: Εγκαταστάσεις HYFLEXPOWER [57].	51
Εικόνα 4-8: Μοντελοποίηση απλού ORC σε περιβάλλον <i>AspenPlus</i> ®.	52
Εικόνα 4-9: Μοντελοποίηση συστήματος ηλεκτρόλυσης και ανάκτησης θερμότητας μέσω ORC σε περιβάλλον <i>AspenPlus</i> ®.	55
Εικόνα 4-10: Μοντελοποίηση ΗΤΗΡ με ΙΗΧ σε περιβάλλον <i>AspenPlus</i> ®.	58
Εικόνα 4-11: Μοντελοποίηση συστήματος ηλεκτρόλυσης και αναβάθμισης απορριπτόμενης θερμότητας μέσω ΗΤΗΡ σε περιβάλλον <i>AspenPlus</i> ®.	60
Εικόνα 4-12: Σχηματική απεικόνιση σύμβασης προμήθειας ανανεώσιμης ενέργειας μέσω δικτύου [88].	62
Εικόνα 4-13: Μοντελοποίηση λέβητα φυσικού αερίου σε περιβάλλον <i>AspenPlus</i> ®.	67

- [1] EUROPEAN COMMISSION, “A hydrogen strategy for a climate-neutral Europe.” [Online]. Available: <https://www.eu2018.at/calendar-events/political-events/BMNT->
- [2] I. Herausgeber, “Fortschreibung der Nationalen Wasserstoffstrategie NWS 2023.” [Online]. Available: www.bmwk.de
- [3] I. - International Energy Agency, “Global Hydrogen Review 2023,” 2023. [Online]. Available: www.iea.org
- [4] D. Burrin, S. Roy, A. P. Roskilly, and A. Smallbone, “A combined heat and green hydrogen (CHH) generator integrated with a heat network,” *Energy Convers Manag*, vol. 246, Oct. 2021, doi: 10.1016/j.enconman.2021.114686.
- [5] “The net-zero transition What it would cost, what it could bring McKinsey Global Institute in collaboration with McKinsey Sustainability and McKinsey’s Global Energy & Materials and Advanced Industries Practices,” 2022.
- [6] U.S. Energy Information Administration, *Energy use per person vs. GDP per capita, 2021*. 2023. [Online]. Available: <https://ourworldindata.org/grapher/energy-use-per-person-vs-gdp-per-capita>
- [7] United Nations, “What Is Climate Change?,” <https://www.un.org/>.
- [8] European Commission, “Causes of climate change,” <https://climate.ec.europa.eu/>.
- [9] NASA’s Goddard Institute for Space Studies (GISS), “GLOBAL LAND-OCEAN TEMPERATURE INDEX,” <https://climate.nasa.gov/vital-signs/global-temperature/>.
- [10] European Parliament, “Climate change: the greenhouse gases causing global warming,” <https://www.europarl.europa.eu/>.
- [11] P. R. and M. R. Hannah Ritchie, “Emissions by sector: where do greenhouse gases come from?,” <https://ourworldindata.org/emissions-by-sector>.
- [12] <https://climate.ec.europa.eu/>, “Consequences of climate change - European Commission.”
- [13] World Health Organization, “Climate change,” <https://www.who.int>.
- [14] United Nations Framework Convention on Climate Change, “What is the Paris Agreement?” [Online]. Available: https://unfccc.int/sites/default/files/resource/cma4_auv_2_cover_decision.pdf
- [15] V. Masson-Delmotte *et al.*, “Global warming of 1.5°C An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty Edited by Science Officer Science Assistant Graphics Officer Working Group I Technical Support Unit,” 2019. [Online]. Available: www.environmentalgraphiti.org

- [16] European Commission, “Delivering the European Green Deal Making transport sustainable for all.” [Online]. Available: https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal/delivering-european-green-deal_en
- [17] European Commission, “European Climate Law - European Commission”.
- [18] European Commission, “UN Climate Change Conference: World agrees to transition away from fossil fuels and reduce global emissions by 43% by 2030.”
- [19] “Clean Hydrogen Joint Undertaking”.
- [20] G. Buffo, P. Marocco, D. Ferrero, A. Lanzini, and M. Santarelli, “Power-to-X and power-to-power routes,” in *Solar Hydrogen Production: Processes, Systems and Technologies*, Elsevier, 2019, pp. 529–557. doi: 10.1016/B978-0-12-814853-2.00015-1.
- [21] C. Wulf, J. Linssen, and P. Zapp, “Power-to-gas-concepts, demonstration, and prospects,” in *Hydrogen Supply Chain: Design, Deployment and Operation*, Elsevier, 2018, pp. 309–345. doi: 10.1016/B978-0-12-811197-0.00009-9.
- [22] “link-thyssenkrupp_Green-Hydrogen-and-Chemicals-concept-development”.
- [23] “Στρατηγική για το υδρογόνο για μια κλιματικά ουδέτερη Ευρώπη.”
- [24] European Commission, “Hydrogen,” <https://energy.ec.europa.eu/>.
- [25] J. M. M. Arcos and D. M. F. Santos, “The Hydrogen Color Spectrum: Techno-Economic Analysis of the Available Technologies for Hydrogen Production,” *Gases*, vol. 3, no. 1, pp. 25–46, Feb. 2023, doi: 10.3390/gases3010002.
- [26] J. Incer-Valverde, A. Korayem, G. Tsatsaronis, and T. Morosuk, “‘Colors’ of hydrogen: Definitions and carbon intensity,” *Energy Conversion and Management*, vol. 291. Elsevier Ltd, Sep. 01, 2023. doi: 10.1016/j.enconman.2023.117294.
- [27] S. Dutta and C. Mustansar Hussain, “Sustainable Fuel Technologies Handbook.”
- [28] R. García-Valverde, N. Espinosa, and A. Urbina, “Simple PEM water electrolyser model and experimental validation,” in *International Journal of Hydrogen Energy*, Jan. 2012, pp. 1927–1938. doi: 10.1016/j.ijhydene.2011.09.027.
- [29] I. International Energy Agency, “Electrolysers.” Accessed: Jan. 03, 2024. [Online]. Available: www.iea.org
- [30] G. Chisholm and L. Cronin, “Hydrogen From Water Electrolysis,” in *Storing Energy: With Special Reference to Renewable Energy Sources*, Elsevier Inc., 2016, pp. 315–343. doi: 10.1016/B978-0-12-803440-8.00016-6.
- [31] S. Shiva Kumar and V. Himabindu, “Hydrogen production by PEM water electrolysis – A review,” *Materials Science for Energy Technologies*, vol. 2, no. 3. KeAi Communications Co., pp. 442–454, Dec. 01, 2019. doi: 10.1016/j.mset.2019.03.002.
- [32] R. Nazerifard, L. Khani, M. Mohammadpourfard, B. Mohammadi-Ivatloo, and G. G. Akkurt, “Design and thermodynamic analysis of a novel methanol, hydrogen, and power trigeneration system based on renewable energy and flue gas carbon dioxide,” *Energy Convers Manag*, vol. 233, Apr. 2021, doi: 10.1016/j.enconman.2021.113922.

- [33] Ευρωπαϊκή Επιτροπή, “Σχέδιο REPowerEU.” Accessed: Feb. 06, 2024. [Online]. Available: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EL/TXT/PDF/?uri=CELEX:52020DC0301>
- [34] Κακαράς Εμμανουήλ and Καρέλλας Σωτήριος, *Αποκεντρωμένα Θερμικά Συστήματα*. 2015.
- [35] H. Jouhara, N. Khordehgah, S. Almahmoud, B. Delpech, A. Chauhan, and S. A. Tassou, “Waste heat recovery technologies and applications,” *Thermal Science and Engineering Progress*, vol. 6. Elsevier Ltd, pp. 268–289, Jun. 01, 2018. doi: 10.1016/j.tsep.2018.04.017.
- [36] F. Jonsson and A. Miljanovic, “Utilization of Waste Heat from Hydrogen Production,” Mälardalen University, 2022.
- [37] A. Schuster, S. Karellas, E. Kakaras, and H. Spliethoff, “Energetic and economic investigation of Organic Rankine Cycle applications,” *Appl Therm Eng*, vol. 29, no. 8–9, pp. 1809–1817, Jun. 2009, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2008.08.016.
- [38] L. Li, Y. T. Ge, and S. A. Tassou, “Experimental Study on a Small-scale R245fa Organic Rankine Cycle System for Low-grade Thermal Energy Recovery,” in *Energy Procedia*, Elsevier Ltd, 2017, pp. 1827–1832. doi: 10.1016/j.egypro.2017.03.531.
- [39] S. Quoilin, M. Van Den Broek, S. Declaye, P. Dewallef, and V. Lemort, “Techno-economic survey of organic rankine cycle (ORC) systems,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 22. pp. 168–186, 2013. doi: 10.1016/j.rser.2013.01.028.
- [40] A. María Villarreal Vives, R. Wang, S. Roy, and A. Smallbone, “Techno-economic analysis of large-scale green hydrogen production and storage,” *Appl Energy*, vol. 346, Sep. 2023, doi: 10.1016/j.apenergy.2023.121333.
- [41] R. Kong, T. Deethayat, A. Asanakham, N. Vorayos, and T. Kiatsiriroat, “Thermodynamic performance analysis of a R245fa organic Rankine cycle (ORC) with different kinds of heat sources at evaporator,” *Case Studies in Thermal Engineering*, vol. 13, Mar. 2019, doi: 10.1016/j.csite.2018.100385.
- [42] J. C. Jiménez-García, A. Ruiz, A. Pacheco-Reyes, and W. Rivera, “A Comprehensive Review of Organic Rankine Cycles,” *Processes*, vol. 11, no. 7. Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI), Jul. 01, 2023. doi: 10.3390/pr11071982.
- [43] B. Mashadi, A. Kakaee, and A. Jafari Horestani, “Low-temperature Rankine cycle to increase waste heat recovery from the internal combustion engine cooling system,” *Energy Convers Manag*, vol. 182, pp. 451–460, Feb. 2019, doi: 10.1016/j.enconman.2018.12.010.
- [44] J. Song, Y. Song, and C. wei Gu, “Thermodynamic analysis and performance optimization of an Organic Rankine Cycle (ORC) waste heat recovery system for marine diesel engines,” *Energy*, vol. 82, pp. 976–985, Mar. 2015, doi: 10.1016/j.energy.2015.01.108.
- [45] Linde GmbH, “Refrigerants Environmental Data. Ozone Depletion and Global Warming Potential.” [Online]. Available: www.linde-gas.com/refrigerants

- [46] "Update on New Refrigerants Designations and Safety Classifications." Accessed: Dec. 19, 2023. [Online]. Available: <https://www.ashrae.org/>
- [47] J. Jiang, B. Hu, R. Z. Wang, N. Deng, F. Cao, and C. C. Wang, "A review and perspective on industry high-temperature heat pumps," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 161. Elsevier Ltd, Jun. 01, 2022. doi: 10.1016/j.rser.2022.112106.
- [48] D. Wu, B. Hu, R. Z. Wang, H. Fan, and R. Wang, "The performance comparison of high temperature heat pump among R718 and other refrigerants," *Renew Energy*, vol. 154, pp. 715–722, Jul. 2020, doi: 10.1016/j.renene.2020.03.034.
- [49] B. Zühlsdorf, *IE A High-Temperature Heat Pumps Task 1-Technologies Task Report Operating Agent*. [Online]. Available: <https://heatpumpingtechnologies.org>
- [50] C. Arpagaus, F. Bless, M. Uhlmann, J. Schiffmann, and S. S. Bertsch, "High temperature heat pumps: Market overview, state of the art, research status, refrigerants, and application potentials," *Energy*, vol. 152. Elsevier Ltd, pp. 985–1010, Jun. 01, 2018. doi: 10.1016/j.energy.2018.03.166.
- [51] H. Lund *et al.*, "4th Generation District Heating (4GDH). Integrating smart thermal grids into future sustainable energy systems.," *Energy*, vol. 68. Elsevier Ltd, pp. 1–11, Apr. 15, 2014. doi: 10.1016/j.energy.2014.02.089.
- [52] H. Lund *et al.*, "Perspectives on fourth and fifth generation district heating," *Energy*, vol. 227, Jul. 2021, doi: 10.1016/j.energy.2021.120520.
- [53] 4DH, "4GDH DEFINITION." Accessed: Jan. 08, 2024. [Online]. Available: <https://www.4dh.eu/>
- [54] J. Eric and B. Vad, "Progression of District Heating-1st to 4th generation." [Online]. Available: www.4dh.dk
- [55] W. J. Tiktak, "Heat Management of PEM Electrolysis."
- [56] F. Jonsson, "UTILIZATION OF WASTE HEAT FROM HYDROGEN PRODUCTION A case study on the Botnia Link H2 Project in Luleå, Sweden."
- [57] <https://www.hyflexpower.eu/>, "HYFLEXPOWER will develop the world's first industrial-scale power-to-X-to-power demonstrator with an advanced hydrogen turbine."
- [58] Siemens Energy, "HYFLEXPOWER consortium successfully operates a gas turbine with 100 percent renewable hydrogen, a world first."
- [59] N. Skordoulis, E. I. Koytsoumpa, and S. Karellas, "Techno-economic evaluation of medium scale power to hydrogen to combined heat and power generation systems," *Int J Hydrogen Energy*, vol. 47, no. 63, pp. 26871–26890, Jul. 2022, doi: 10.1016/j.ijhydene.2022.06.057.
- [60] "SCALING PEM ELECTROLYSIS TO 100MW HANNOVER MESSE APRIL 2017 SIMON BOURNE CTO - PDF Free Download".

- [61] D. S. Falcão and A. M. F. R. Pinto, "A review on PEM electrolyzer modelling: Guidelines for beginners," *Journal of Cleaner Production*, vol. 261. Elsevier Ltd, Jul. 10, 2020. doi: 10.1016/j.jclepro.2020.121184.
- [62] N. V. Dale, M. D. Mann, and H. Salehfar, "Semiempirical model based on thermodynamic principles for determining 6 kW proton exchange membrane electrolyzer stack characteristics," *J Power Sources*, vol. 185, no. 2, pp. 1348–1353, Dec. 2008, doi: 10.1016/j.jpowsour.2008.08.054.
- [63] M. Sartory *et al.*, "Theoretical and experimental analysis of an asymmetric high pressure PEM water electrolyser up to 155 bar," *Int J Hydrogen Energy*, vol. 42, no. 52, pp. 30493–30508, Dec. 2017, doi: 10.1016/j.ijhydene.2017.10.112.
- [64] T. Egeland-Eriksen, J. F. Jensen, Ø. Ulleberg, and S. Sartori, "Simulating offshore hydrogen production via PEM electrolysis using real power production data from a 2.3 MW floating offshore wind turbine," *Int J Hydrogen Energy*, vol. 48, no. 74, pp. 28712–28732, Aug. 2023, doi: 10.1016/j.ijhydene.2023.03.471.
- [65] R. Rivera-Tinoco *et al.*, "Investigation of power-to-methanol processes coupling electrolytic hydrogen production and catalytic CO₂ reduction," *Int J Hydrogen Energy*, vol. 41, no. 8, pp. 4546–4559, Mar. 2016, doi: 10.1016/j.ijhydene.2016.01.059.
- [66] A. Zaccara *et al.*, "Renewable hydrogen production processes for the off-gas valorization in integrated steelworks through hydrogen intensified methane and methanol syntheses," *Metals (Basel)*, vol. 10, no. 11, pp. 1–24, Nov. 2020, doi: 10.3390/met10111535.
- [67] Afshin J. Ghajar and Yunus A. Cengel, *Heat and Mass Transfer: Fundamentals and Applications*, 5th ed. McGraw-Hill Education, 2014.
- [68] Fluke Process Instruments, "Emissivity Values for Metals."
- [69] N. Roy and M. Radhouene, "Thermal management in green hydrogen production: design considerations," <https://hydrogentechworld.com>.
- [70] E. van der Roest, R. Bol, T. Fens, and A. van Wijk, "Utilisation of waste heat from PEM electrolyzers – Unlocking local optimisation," *Int J Hydrogen Energy*, vol. 48, no. 72, pp. 27872–27891, Aug. 2023, doi: 10.1016/j.ijhydene.2023.03.374.
- [71] L. Peng, P. Yi, and X. Lai, "Design and manufacturing of stainless steel bipolar plates for proton exchange membrane fuel cells," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 39, no. 36. Elsevier Ltd, pp. 21127–21153, Dec. 12, 2014. doi: 10.1016/j.ijhydene.2014.08.113.
- [72] R. Wang, L. Jiang, Z. Ma, A. Gonzalez-Diaz, Y. Wang, and A. P. Roskilly, "Comparative analysis of small-scale organic Rankine cycle systems for solar energy utilisation," *Energies (Basel)*, vol. 12, no. 5, Mar. 2019, doi: 10.3390/en12050829.
- [73] H. M. D. P. Herath, M. A. Wijewardane, R. A. C. P. Ranasinghe, and J. G. A. S. Jayasekera, "Working fluid selection of Organic Rankine Cycles," *Energy Reports*, vol. 6, pp. 680–686, Dec. 2020, doi: 10.1016/j.egy.2020.11.150.
- [74] A. Singh Panesar, "A study of organic Rankine cycle systems with the expansion process performed by twin screw machines."

- [75] S. Quoilin, S. Declaye, B. F. Tchanche, and V. Lemort, “Thermo-economic optimization of waste heat recovery Organic Rankine Cycles,” *Appl Therm Eng*, vol. 31, no. 14–15, pp. 2885–2893, 2011, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2011.05.014.
- [76] World Nuclear Association, “Cooling Power Plants,” <https://world-nuclear.org/>.
- [77] S. Malavika *et al.*, “Performance optimization of a heat pump for high temperature application,” in *Materials Today: Proceedings*, Elsevier Ltd, 2020, pp. 5278–5285. doi: 10.1016/j.matpr.2020.08.639.
- [78] RAKHOH, “Processing of Pulp to Paper and the Role of Steam Boilers in Paper Industry,” <https://rakhoh.com/>.
- [79] “Summary of technology,” 2023. [Online]. Available: www.heatpumpingtechnologies.org/annex58/
- [80] “Annex 58 High-Temperature Heat Pumps High Temperature Heat Pump Figure 1: 3.7 MW Enertime Heat Pump on Low-Pressure Steam.” [Online]. Available: www.heatpumpingtechnologies.org/annex58/
- [81] “combithermhthpannex58”.
- [82] “hthpannex58templatesuppliertechlogyrankfinal”.
- [83] “Annex 58 High-Temperature Heat Pumps Industrial Heat Pump Siemens Energy Figure 1: Exemplary model of a new Siemens Energy high temperature heat pump.” [Online]. Available: www.heatpumpingtechnologies.org/annex58/
- [84] “futraheat-annex-58-final”.
- [85] T. C. Roumpedakis, N. Fostieris, K. Braimakis, E. Monokrousou, A. Charalampidis, and S. Karellas, “Techno-Economic Optimization of Medium Temperature Solar-Driven Subcritical Organic Rankine Cycle,” *Thermo*, vol. 1, no. 1, pp. 77–105, Jun. 2021, doi: 10.3390/thermo1010007.
- [86] B. Zühlsdorf, *IE A High-Temperature Heat Pumps Task 1-Technologies Task Report Operating Agent*. [Online]. Available: <https://heatpumpingtechnologies.org>
- [87] “COMMISSION DELEGATED REGULATION (EU) 2023/1184,” *EUROPEAN COMMISSION*, Feb. 2023.
- [88] “Impact assessment of the RED II Delegated Acts on RFNBO and GHG accounting,” 2023.
- [89] “<https://www.renewables.ninja/>”
- [90] H. Zhang and T. Yuan, “Optimization and economic evaluation of a PEM electrolysis system considering its degradation in variable-power operations,” *Appl Energy*, vol. 324, Oct. 2022, doi: 10.1016/j.apenergy.2022.119760.
- [91] European Environment Agency, “Greenhouse gas emission intensity of electricity generation in Europe.” Accessed: Feb. 10, 2024. [Online]. Available: <https://www.eea.europa.eu/en/analysis/indicators/greenhouse-gas-emission-intensity-of-1>

- [92] Δ. Καλιαμπάκος and Δ. Δαμίγος, *Βοηθητικές Σημειώσεις Χρηματοοικονομικής και Κοινωνικοοικονομικής Αξιολόγησης Επενδύσεων*. 2012.
- [93] <https://www.statista.com/statistics/971982/solar-pv-capex-worldwide-utility-scale/>, “Benchmark capital expenditure for utility-scale solar photovoltaics worldwide from 2010 to 2020.”
- [94] G. Matute, J. M. Yusta, and N. Naval, “Techno-economic model and feasibility assessment of green hydrogen projects based on electrolysis supplied by photovoltaic PPAs,” *Int J Hydrogen Energy*, vol. 48, no. 13, pp. 5053–5068, Feb. 2023, doi: 10.1016/j.ijhydene.2022.11.035.
- [95] K. Braimakis, “MULTI-SCALE THERMO-ECONOMIC OPTIMIZATION AND THERMODYNAMIC ASSESSMENT OF ENERGETIC AND EXERGETIC EFFICIENCY IMPROVEMENT CONCEPTS OF ORGANIC RANKINE CYCLE.”
- [96] Eurostat, “Electricity prices for non-household consumers.” Accessed: Feb. 12, 2024. [Online]. Available: https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Electricity_price_statistics#Electricity_prices_for_non-household_consumers
- [97] S. Lecompte, H. Huisseune, M. van den Broek, S. De Schampheleire, and M. De Paepe, “Part load based thermo-economic optimization of the Organic Rankine Cycle (ORC) applied to a combined heat and power (CHP) system,” *Appl Energy*, vol. 111, pp. 871–881, 2013, doi: 10.1016/j.apenergy.2013.06.043.
- [98] “Steam System Opportunity Assessment for the Pulp and Paper, Chemical Manufacturing, and Petroleum Refining Industries Steam System Opportunity Assessment for the Pulp and Paper, Chemical Manufacturing, and Petroleum Refining Industries Main Report Main Report.”
- [99] “Energy Storage Technology Descriptions-EASE-European Association for Storage of Energy Thermal hot Water Storage Thermal energy Storage 1. Technical description.” [Online]. Available: www.ease-storage.eu
- [100] European Commission, “EU Emissions Trading System (EU ETS).” Accessed: Feb. 10, 2024. [Online]. Available: https://climate.ec.europa.eu/eu-action/eu-emissions-trading-system-eu-ets/what-eu-ets_en?etransnolive=1
- [101] “EU Carbon Permits.” Accessed: Feb. 10, 2024. [Online]. Available: <https://tradingeconomics.com/commodity/carbon>